



**Muş Alparslan Üniversitesi**

**MUŞ ALPARSLAN ÜNİVERSİTESİ / MUŞ ALPARSLAN UNIVERSITY**

**www.alparslan.edu.tr**

**e-ISSN: 2149-6455**

**Aralık/December 2024**

**Cilt/Volume 12**

**Sayı/Issue 02**

**FEN BİLİMLERİ  
DERGİSİ**  
THE JOURNAL of  
SCIENCE





**MAUNFBD**

**Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**  
**Mus Alparslan University Journal of Science**

**YIL/YEAR: 2024 • CİLT/VOLUME: 12 • SAYI/NUMBER: 2**

**Yazılarda ifade edilen görüş ve düşünceler yazarlarının kişisel görüşleri olup derginin ve bağlı bulunduğu kurumun görüşlerini yansıtmaz.**

The opinions and views expressed in papers published on the journal belong only to its author(s) and do not necessarily reflect the views of the journal and its publisher.



**MAUNFBD**

**Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**  
**Mus Alparslan University Journal of Science**

**Dağıtım**

Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından yapılmaktadır.

ISSN	: 2147-7930
e-ISSN	: 2149-6455
Basım Tarihi	: 30/12/2024
Cilt	: 12
Sayı	: 2
İlk Yayın Tarihi	: 2013
Basım Yeri	: Muş
Yayın Türü	: Yılda iki defa olmak üzere altı ayda bir (Haziran ve Aralık) elektronik olarak yayımlanan uluslararası hakemli ve süreli yayındır.
Yayın Dili	: Türkçe ve İngilizce'dir.
Adres	: Muş Alparslan Üniversitesi Kampüsü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır Yolu 7. Km, 49250 – MUŞ / TÜRKİYE
e-posta	: msufbd@alparslan.edu.tr
URL	: <a href="https://dergipark.org.tr/tr/pub/msufbd">https://dergipark.org.tr/tr/pub/msufbd</a>

## MAUNFBD

# Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Mus Alparslan University Journal of Science

Yıl/Year: 2024 • Cilt/Volume: 12 • Sayı/Number: 2

### Yayın Kurulu • Editorial Board

<b>Muş Alparslan Üniversitesi Adına</b> Sahibi / Owner	<b>Prof. Dr. Mustafa ALİCAN (Rektör)</b> Muş Alparslan Üniversitesi / Türkiye
<b>Editör / Editor-in-Chief</b>	<b>Dr. Öğretim Üyesi Harun ÖNLÜ</b> Muş Alparslan Üniversitesi / Türkiye
<b>Editör Yardımcıları/ Associate Editors</b>	<b>Doç. Dr. Abdullah AYDIN</b> Muş Alparslan Üniversitesi / Türkiye <b>Doç. Dr. Zeynal TOPALCENGİZ</b> Muş Alparslan Üniversitesi / Türkiye <b>Doç. Dr. Abdulhakim ZEYBEK</b> Muş Alparslan Üniversitesi / Türkiye
<b>Editör Kurulu-Alan Editörleri / Editorial Board Members</b>	<b>Prof. Dr. Murad Aydın ŞANDA</b> Muş Alparslan Üniversitesi / Türkiye <b>Prof. Dr. Gökhan ZENGİN</b> Selçuk Üniversitesi / Türkiye <b>Prof. Dr. Mahmut TOPRAK</b> Bingöl Üniversitesi/ Türkiye <b>Prof. Dr. Kenan YILDIRIM</b> Muş Alparslan Üniversitesi / Türkiye <b>Doç. Dr. Derya EFE</b> Giresun Üniversitesi / Türkiye <b>Doç. Dr. Hüseyin KOÇ</b> Muş Alparslan Üniversitesi / Türkiye <b>Doç. Dr. Abdulhakim ZEYBEK</b> Muş Alparslan Üniversitesi / Türkiye <b>Doç. Dr. Abdullah AYDIN</b> Muş Alparslan Üniversitesi / Türkiye <b>Doç. Dr. Zeynal TOPALCENGİZ</b> Muş Alparslan Üniversitesi / Türkiye <b>Dr. Juan Fernando MUÑOZ</b> University of Florida / Ekvador <b>Dr. Svetlana GOROKHOVA</b> Uznyj Matematıceskij Institut VNC RAN / Rusya <b>Dr. Adam BAKER</b> US Food and Drug Administration (FDA) / ABD <b>Dr. Surendra BARPETE</b> ICARDA / Hindistan <b>Dr. Öğr. Üyesi Sabahattin İLBİRA</b> Amasya Üniversitesi / Türkiye <b>Dr. Öğr. Üyesi Ömer ARSLAN</b> Muş Alparslan Üniversitesi / Türkiye <b>Dr. Öğr. Üyesi Şeyma ÖNLÜ</b> Muş Alparslan Üniversitesi / Türkiye <b>Dr. Öğr. Üyesi Fuat YETİŞSİN</b> Muş Alparslan Üniversitesi / Türkiye
<b>Danışmanlar Kurulu/ Advisory Board</b>	<b>Prof. Dr. Güleray AĞAR</b> Atatürk Üniversitesi / Türkiye <b>Prof. Dr. Cemil TUNÇ</b> Yüzüncü Yıl Üniversitesi / Türkiye <b>Prof. Dr. Arzu GÖRMEZ</b> Dokuz Eylül Üniversitesi / Türkiye <b>Prof. Dr. Nevzat ESİM</b> Bingöl Üniversitesi / Türkiye <b>Prof. Dr. ERCAN BURSAL</b> Muş Alparslan Üniversitesi / Türkiye <b>Prof. Dr. Ekrem ALMAZ</b> Muş Alparslan Üniversitesi / Türkiye <b>Prof. Dr. Talat KÖRPİNAR</b> Muş Alparslan Üniversitesi / Türkiye <b>Prof. Dr. Muhammed ÇINAR</b> Muş Alparslan Üniversitesi / Türkiye <b>Doç. Dr. Furkan ORHAN</b> Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi/ Türkiye <b>Doç. Dr. Selçuk SAĞIR</b>



Muş Alparslan Üniversitesi / Türkiye  
**Doç. Dr. Salih ÖZER**  
Muş Alparslan Üniversitesi / Türkiye

**MAUNFBD**  
**Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**  
**Mus Alparslan University Journal of Science**

Yıl: 2024 • Cilt: 12 • Sayı: 2

**Amaç ve Kapsam**

Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimler Dergisi, temel bilimler, mühendislik bilimleri, çevre ve enerji alanlarında ulusal ve uluslararası düzeyde yapılan bilimsel nitelikli ve özgün çalışmaları bilimsel bir yaklaşımla ele almak amacıyla yayımlanan uluslararası hakemli bir dergidir. Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisinin temel amacı; uluslararası alanda bilim ve teknolojiye yenilikler ve gelişmeler, güncel ortaya konulan bilimsel çalışmalar, tespit edilen sorunların ve çözüm önerilerinin tartışıldığı özgün ve nitelikli makaleler yayımlanan bilimsel bir dergi olmaktır. Ayrıca Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, yükseköğretim kurumlarında görev alan akademisyenler, lisansüstü öğrenciler, sanayi ve endüstride çalışan kişilerin akademik ve mesleki gelişmelerine katkı sağlayan bilimsel, nitelikli akademik çalışmaların yaygınlaştırılmasına hizmet etmeyi hedeflenmektedir.

Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi; temel bilimleri, tarım ve uygulamalı bilimleri, doğa bilimleri ve mühendislik alanları ile alakalı konularda özgün ve nitelikli bilimsel çalışmaları kapsamaktadır. Dergide, yukarıda belirtilen alanlarda yapılmış deneysel ve teorik ilerlemeleri içeren bilimsel ve özgün araştırma makalesi türündeki bilimsel çalışmalara ve güncel içerikli derlemelere yer verilmektedir. Dergide yayımlanan tüm makalelere DOI numarası atanmakta ve yayımlanan makaleler için herhangi bir ücret talep edilmemektedir. Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisinde yayımlanan yazıların bilimsel ve hukukî sorumluluğu, yazarlarına aittir. Yayımlanan yazıların bütün yayın hakları Muş Alparslan Üniversitesi'ne ait olup yayın, yayıncının izni olmadan kısmen veya tamamen elektronik ortama taşınmaz. Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, özgün bilimsel araştırmalar ile uygulama çalışmalarına yer veren Haziran ve Aralık sayısı olmak üzere yılda iki defa düzenli olarak yayımlanan bir dergidir.

Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimler Dergisi aşağıdaki indekslerce taranmaktadır:

- **TR Dizin**
- Academic keys
- CAB Abstract
- CiteFactor
- COSMOS IF
- CrossRef DOI
- DRJI (Directory of Research Journals Indexing)
- Eurasian Scientific Journal Index (ESJI)
- Index Copernicus
- Infobase index
- International Innovative Journal Impact Factor (IIJIF),
- ResearchBib
- ROAD
- Scientific Indexing Service
- Sindex
- SOBİAD

**MAUNFBD**  
**Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**  
**Mus Alparslan University Journal of Science**

Yıl/Year: 2024 • Cilt/Volume: 12 • Sayı/Number: 2

**Aims and Scope**

Muş Alparslan University Journal of Science is an international refereed journal that is published with a scientific approach to handle scientific and original studies in the fields of basic sciences, engineering sciences, environment and energy. The main aim of Muş Alparslan University Science Journal is to become a scientific journal which published original and qualified articles, current scientific studies, their identified problems, and their solution suggestions, discussing innovations and developments in science and technology in the international surroundings. In addition, Muş Alparslan University Journal of Sciences is aimed to serve the dissemination of scientific and qualified academic studies which contributed to the academic and professional development of academicians, graduate students, working people in industry.

Muş Alparslan University Journal of Science covers original and qualified scientific studies in the fields of basic sciences, agriculture and applied sciences, natural sciences, and engineering. There are scientific, original research articles and current content reviews that include experimental and theoretical advances mentioned above in the fields in the journal. All published articles in the journal are assigned a DOI number and no fee is charged for the published articles. The authors belong to scientific and legal responsibility of the articles published in Muş Alparslan University Journal of Science. Muş Alparslan University belongs to all publishing rights of the published articles, and it cannot be published to the electronic medium partially or completely without the permission of the publisher. Muş Alparslan University Journal of Science including the June and December issues is a regular journal published twice a year that is included original scientific research and application studies. Muş Alparslan University Journal of Science is included in the following abstracting and indexing services:

- **TR Dizin**
- Academic keys
- CAB Abstract
- CiteFactor
- COSMOS IF
- CrossRef DOI
- DRJI (Directory of Research Journals Indexing)
- Eurasian Scientific Journal Index (ESJI)
- Index Copernicus
- Infobase index
- International Innovative Journal Impact Factor (IIJIF),
- ResearchBib
- ROAD
- Scientific Indexing Service
- Sindex
- SOBIAD

**MAUNFBD**  
**Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**  
**Mus Alparslan University Journal of Science**

Yıl/Year: 2024 • Cilt/Volume: 12 • Sayı/Number: 2

**MAUNFBD Dergi Yayın Etiği ve Sorumluluklar**

**MAUNFBD** Dergisinde uygulanan yayın süreçlerinde yazarlar, hakemler ve editörler etik ilkelere yönelik standartlara uyması önem taşımaktadır. **MAUNFBD** Dergisinde yayın etiği kapsamında tüm yazarlar, hakemler ve editörler aşağıdaki etik sorumlulukları taşıması beklenmektedir. Aşağıda yer alan etik görev ve sorumluluklar oluşturulurken açık erişim olarak **Committee on Publication Ethics (COPE)** tarafından yayınlanan etik kurallara ve sorumluluklar dikkate alınarak hazırlanmıştır.

**Yazarların Etik Sorumlulukları**

Yazar(lar)ın gönderdikleri çalışmaların özgün olması beklenmektedir. Yazar(lar)ın başka çalışmalardan yararlanmaları veya başka çalışmaları kullanmaları durumunda eksiksiz ve doğru bir biçimde atıfta bulunmaları ve/veya alıntı yapmaları gerekmektedir. Çalışmanın oluşturulmasında içeriğe katkı sağlamayan kişiler, yazar olarak eklenmemelidir. Yazarlar çalışmalarını aynı anda birden fazla derginin başvuru sürecinde bulunduramaz. Her bir başvuru önceki başvurunun tamamlanmasını takiben başlatılabilir. Başka bir dergide yayınlanmış çalışma **MAUNFBD** Dergisine gönderilemez. Yayınlanmak üzere gönderilen tüm çalışmaların varsa çıkar çatışması teşkil edebilecek durumları ve ilişkileri açıklanmalıdır. Yazar(lar)dan değerlendirme süreçleri çerçevesinde makalelerine ilişkin ham veri talep edilebilir, böyle bir durumda yazar(lar) beklenen veri ve bilgileri yayın kurulu ve bilim kuruluna sunmaya hazır olmalıdır. Değerlendirme süreci başlamış bir çalışmanın yazar sorumluluklarının değiştirilmesi (Yazar ekleme, yazar sırası değiştirme, yazar çıkartma gibi) teklif edilemez. Yazar(lar) kullanılan verilerin kullanım haklarına, araştırma/analizlerle ilgili gerekli izinlere sahip olduklarını veya deney yapılan deneklerin rızasının alındığını gösteren belgeye sahip olmalıdır. Yazar(lar)ın yayınlanmış, erken görünüm veya değerlendirme aşamasındaki çalışmasıyla ilgili bir yanlış ya da hatayı fark etmesi durumunda, dergi editörünü veya yayıncıyı bilgilendirme, düzeltme veya geri çekme işlemlerinde editörle iş birliği yapma yükümlülüğü bulunmaktadır.

**Editörlerin Etik Görev ve Sorumlulukları**

**MAUNFBD** Dergisindeki editörler ve alan editörleri, açık erişim olarak Dergipark sayfasında yayınlanan **Committee on Publication Ethics (COPE)** tarafından belirtilen etik görev ve sorumluluklara sahip olmalıdır:

**Genel Görev ve Sorumluluklar**

Sürekli olarak derginin gelişimini sağlama, dergide yayınlanan çalışmaların kalitesini geliştirmeye yönelik süreçleri yürütme, okuyucuların ve yazarların bilgi ihtiyaçlarını karşılamaya yönelik çaba sarfetme, düzeltme, açıklama gerektiren konularda yayın açısından açıklık ve şeffaflık gösterme. Fikri mülkiyet hakları ve etik standartlardan taviz vermeden iş süreçlerini devam ettirme editörün görev ve sorumluluklarındandır.

**Hakemlerin Etik Sorumlulukları**

Sadece uzmanlık alanı ile ilgili çalışma değerlendirmeyi kabul etmelidir. Tarafsızlık ve gizlilik içerisinde değerlendirme yapılmalıdır. Gizlilik ilkesi gereği inceledikleri çalışmaları değerlendirme sürecinden sonra imha etmelidir. Değerlendirme sürecinde çıkar çatışması ile karşı karşıya olduğunu düşünürse, çalışmayı incelemeyi reddederek, dergi editörünü bilgilendirmelidir. Değerlendirmeyi nesnel bir şekilde sadece çalışmanın içeriği ile ilgili olarak yapılmalıdır. Değerlendirmeyi yapıcı ve nazik bir dille yapılmalıdır. Düşmanlık, iftira ve hakaret içeren aşağılayıcı kişisel yorumlar yapmamalıdır. Değerlendirmeyi kabul ettikleri çalışmayı zamanında ve yukarıdaki etik sorumluluklarda gerçekleştirilmelidir.

**Yayıncının Etik Sorumlulukları**

**MAUNFBD** Dergisinde gönderilen çalışmaların tüm süreçlerinden editör sorumludur. Bağımsız editör kararı oluşturulmasını taahhüt eder. **MAUNFBD** Dergisinde ekonomik ya da politik kazançlar göz önüne alınmaksızın karar verici kişi editördür. **MAUNFBD** Dergisinde yayınlanmış her makalenin mülkiyet ve telif hakkını korumak zorundadır. Editöre ilişkin her türlü bilimsel suiistimal ve intihalle ilgili önlemleri alma sorumluluğuna sahiptir.

**Yazarlar ile İlişkiler**

Editör, çalışmaların önemi, özgün değeri, geçerliliği, anlatımın açıklığı ve derginin amaç ve hedeflerine dayanarak olumlu ya da olumsuz karar vermemelidir. Yayın kapsamına uygun olan çalışmaların ciddi problemi olmadığı sürece ön değerlendirme aşamasına alınmalıdır. Editör, çalışma ile ilgili ciddi bir sorun olmadıkça, olumlu yöndeki hakem

önerilerini göz ardı etmemelidir. Yeni editör, çalışmalara yönelik olarak önceki editör tarafından verilen kararları ciddi bir sorun olmadıkça değiştirmemelidir. **MAUNFBD** Dergisinde bir Yazar Rehberi yayınlamalıdır. Yazarlara açıklayıcı ve bilgilendirici şekilde bildirim ve dönüş sağlanmalıdır.

### **Hakemler ile İlişkiler**

Editör; dergi yayın politikalarında yer alan **Kör Hakemlik ve Değerlendirme Süreci** politikalarını uygulamakla yükümlüdür. Hakemleri yayının alan konusuna uygun olarak seçilmelidir. Yayının değerlendirme sürecinde gerekli tüm bilgileri hakemlere sağlamakla yükümlüdür. Yazarlar ve hakemler arasından çıkar çatışması olup olmadığını gözetmek durumundadır. Yayının değerlendirme sürecinde hakemlerin kimlik bilgilerini gizli tutmalıdır. Hakemleri tarafsız, bilimsel ve nesnel bir dille çalışmayı değerlendirmeleri için teşvik etmelidir. Hakem havuzunun geniş bir yelpazeden oluşması için adımlar atmalıdır. Hakemlerin performansını artırıcı uygulama ve politikalar belirlemelidir. Bilimsel olmayan değerlendirmeleri engellemelidir.

### **Okuyucu ile İlişkiler**

Editör tüm okuyucuların ihtiyaç duydukları bilgi, beceri ve deneyim beklentilerini dikkate alarak karar vermelidir. Yayımlanan çalışmaların okuyucu, araştırmacı, uygulayıcı ve bilimsel literatüre katkı sağlamasına ve özgün nitelikte olmasına dikkat etmelidir. Editör okuyuculardan gelen geri bildirimleri dikkate almak, açıklayıcı ve bilgilendirici geri bildirim vermekle yükümlüdür.

### **Yayın Kurulu ile İlişkiler**

Editör, tüm yayın kurulu üyelerinin süreçleri yayın politikaları ve yönergelere uygun ilerletmesini sağlamalıdır. Yayın kurulu üyelerini yayın politikaları hakkında bilgilendirmeli ve gelişmelerden haberdar etmelidir. Yeni yayın kurulu üyelerini yayın politikaları konusunda eğitmeli, ihtiyaç duydukları bilgileri sağlamalıdır.

### **Dergi Sahibi ve Yayıncı ile İlişkiler**

Editör ile yayıncı arasında yapılan yazılı sözleşme gereği, editörün alacağı tüm kararlar yayıncı ve dergi sahibinden bağımsızdır. Yani editör ve yayıncı arasındaki ilişki bağımsızlık ilkesine dayanmaktadır.

### **Kişisel Verilerin Korunması**

Editör; değerlendirilen çalışmalarda yer alan deneklere veya görsellere ilişkin kişisel verilerin korunmasını sağlamakla yükümlüdür. Çalışmalarda kullanılan bireylerin açık rızası belgeli olmadığı sürece çalışmayı reddetmekle görevlidir. Ayrıca editör; yazar, hakem ve okuyucuların bireysel verilerini korumaktan sorumludur.

### **Etik Kurul, İnsan ve Hayvan Hakları**

Editör; değerlendirilen çalışmalarda insan ve hayvan haklarının korunmasını sağlamakla yükümlüdür. Çalışmalarda kullanılan deneklere ilişkin etik kurul onayı, deneysel araştırmalara ilişkin izinlerin olmadığı durumlarda çalışmayı reddetmekle sorumludur.

### **Olası Suiistimal ve Görevi Kötüye Kullanmaya Karşı Önlem**

Editör; olası suiistimal ve görevi kötüye kullanma işlemlerine karşı önlem almakla yükümlüdür. Bu duruma yönelik şikayetlerin belirlenmesi ve değerlendirilmesi konusunda titiz ve nesnel bir soruşturma yapmanın yanı sıra, konuyla ilgili bulguların paylaşılması editörün sorumlulukları arasında yer almaktadır.

### **Fikri Mülkiyet Haklarının Korunması**

Editör; yayımlanan tüm makalelerin fikri mülkiyet hakkını korumakla, olası ihlallerde derginin ve yazar(lar)ın haklarını savunmakla yükümlüdür. Ayrıca editör yayımlanan tüm makalelerdeki içeriklerin başka yayınların fikri mülkiyet haklarını ihlal etmemesi adına gerekli önlemleri almakla yükümlüdür. Bu aşamada yazarlardan makaleleri ile birlikte almış oldukları intihal raporu talep edilmektedir.

### **MAUNFBD Dergisinde Etik Olmayan Bir Durumla Karşılaşırsanız!**

**MAUNFBD** Dergisinde yukarıda bahsedilen etik sorumluluklar ve dışında etik olmayan bir davranış veya içerikle karşılaşırsanız lütfen [h.onlu@alparslan.edu.tr](mailto:h.onlu@alparslan.edu.tr) adresine e-posta yoluyla bildiriniz.

**MAUNFBD**  
**Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**  
**Mus Alparslan University Journal of Science**

Yıl/Year: 2024 • Cilt/Volume: 12 • Sayı/Number: 2

**MAUNFBD Journal Editorial Ethics and Responsibilities**

It is important for authors, referees and editors to comply with the standards regarding ethical principles in the publication processes applied in the Journal of MAUNFBD. All authors, referees and editors are expected to have the following ethical responsibilities within the scope of publication ethics in MAUNFBD journal. The following ethical duties and responsibilities have been prepared as open access, taking into account the ethical rules and responsibilities published by the Committee on Publication Ethics (COPE).

**Authors' Ethical Responsibilities**

The works submitted by the author (s) are expected to be original. If the author (s) benefit from other studies or use other studies, they must cite and / or cite completely and accurately. People who do not contribute to the content of the study should not be added as author. The authors work in the application process can not contain more than one journal at a time. The work published in another journal cannot be sent to the MAUNFBD Journal. That might constitute a conflict of interest if all studies submitted for publication must be explained and relationships. Author (s) can be requested from the evaluation process raw data of the frame in the article, in such a case the author (s) must be ready to provide the expected data and information science committee and the editorial board. Replacing the responsibility of the author began a study of the evaluation process (authors add, modify order of authors, writers like stickers) cannot be offered. The author (s) must have a document showing that they have the right to use the data used, the necessary permissions for research / analysis, or that the subjects who have been experimented with have consent. Author (s) of the published case early view or assessment notice a wrong or error about her work on stage, to inform the journal editor or publisher has an obligation to carry editors to cooperate in the correction or retraction.

**Editors' Ethical Duties and Responsibilities**

Editors and field editors in the MAUNFBD Journal should have the ethical duties and responsibilities specified by the Committee on Publication Ethics (COPE) published on the Dergipark page as open access:

**General Duties and Responsibilities**

Continuously improving the quality of the journal, carrying out processes to improve the quality of the work published in the journal, striving to meet the information needs of readers and authors, correcting, showing publicity and transparency in matters requiring explanation, continuing business processes without compromising intellectual property rights and ethical standards is one of his duties and responsibilities.

**Ethical Responsibilities of Referees**

Only study related to the specialty should accept the assessment. It should evaluate in impartiality and confidentiality. The study examined the privacy policy should be destroyed after the evaluation process. If referee thinks that he/she faces a conflict of interest during the evaluation process, he should refuse to review the study and inform the journal editor. The referee should make the assessment objectively only in relation to the content of the study. Referee should make the assessment in a constructive and kind language. It should not make humiliating personal comments that include hostility, slander and insults. They should perform the work they accepted to evaluate on time and with the ethical responsibilities above.

**Publisher's Ethical Responsibilities**

The editor is responsible for all the processes submitted in the MAUNFBD Journal. The independent editor commits to the decision. The decision maker is the editor, regardless of economic or political gains in the Journal of MAUNFBD. It must protect the property and copyright of every article published in the MAUNFBD journal. It has the responsibility to take all sorts of scientific abuse and plagiarism related measures.

### **Relations with Authors**

Editor, the importance of the work, the original value, validity, the openness of expression and should give a positive or negative decision based on the journal's goals and objectives. Unless there is a serious problem for the studies that are suitable for publication, they should take the preliminary evaluation stage. The editor should not ignore the positive reviews of the referees unless there is a serious problem with the work. The new editor should not change the decisions made by the previous editor for the work unless there is a serious problem. It should publish an Author Directory in the MAUNFBD journal. Authors should be provided with informative and informative feedback and feedback.

### **Relations with Referees**

Editor is responsible for applying the Blind Review and Evaluation Process policies included in its publication policies. Referees should be selected in accordance with the subject of the publication. It is obliged to provide all necessary information to the referees during the evaluation process of the publication. It has to observe whether there is a conflict of interest among the authors and reviewers. The identity information of the referees must be kept confidential during the evaluation of the broadcast. Encourage referees to evaluate working in an objective, scientific and objective language. The referee should take steps to make the pool a broad spectrum. Implementations and policies that increase the performance of the referees should be determined. It should prevent unscientific evaluations.

### **Relations with Readers**

The editor should make a decision by considering the knowledge, skills and experience expectations of all readers. The reader should pay attention to the fact that the published studies contribute to the reader, researcher, practitioner and scientific literature and be original. The editor is obliged to take into account the feedback from the readers and to provide explanatory and informative feedback.

### **Relations with the Editorial Board**

The editor should ensure that all editorial board members advance the processes in accordance with editorial policies and guidelines. The editorial board should inform the members of the editorial policies and inform the developments. The new editorial board should educate its members on broadcast policies and provide the information they need.

### **Relations with the Owner of the Journal and the Publisher**

In accordance with the written contract between the editor and the publisher, all decisions taken by the editor are independent of the publisher and magazine owner. In other words, the relationship between the editor and the publisher is based on the principle of independence.

### **Protection of Personal Data**

The editor is obliged to ensure the protection of personal data related to the subjects or images in the evaluated works. Unless the explicit consent of the individuals used in the studies is documented, they are responsible for refusing to work. Also, editor is responsible for protecting the individual data of the author, referee and readers.

### **Ethics Committee, Human and Animal Rights**

The editor is obliged to ensure the protection of human and animal rights in the evaluated works. Ethics committee approval for subjects used in studies is responsible for refusing to work in cases where there is no permit for experimental research.

### **Measure Against Potential Abuse and Abuse**

The editor is obliged to take measures against possible abuse and misconduct. In addition to conducting a rigorous and objective investigation about the identification and evaluation of complaints for this situation, sharing the findings on the subject is among the responsibilities of the editor.

### **Protection of Intellectual Property Rights**

The editor is obliged to protect the intellectual property right of all published articles and to defend the rights of the journal and author (s) in possible violations. In addition, the editor is obliged to take necessary precautions so that the content in all published articles does not violate the intellectual property rights of other publications. At this stage, the plagiarism report they received with the articles is requested from the authors.

**NOTE:** If you encounter an unethical situation in MAUNFBD Journal!

If you encounter any ethical responsibilities and unethical behavior or content mentioned above in MAUNFBD Journal, please report it to **h.onlu@alparslan.edu.tr** by e-mail.



## İÇİNDEKİLER • CONTENTS

ÖZGÜN ARAŞTIRMA / ORIGINAL ARTICLE	Sayfalar/ Pages
<p><b>Ece Bingöl, Semih Demirel, Ataberk Urfalı, Ömer Faruk Bozkır, Azer Çelikten, Abdulkadir Budak, Hakan Karataş</b> Analyzing the Performance of Convolutional Neural Networks and Transformer Models in Automated Bone Fracture Detection <i>Otomatik Kemik Kırığı Tespitinde Evrimsel Sinir Ağları ve Transformer Modellerinin Performansının Analizi</i></p>	64-71
<p><b>Samet Öztürk</b> Isothermal inactivation kinetics of Salmonella and <i>Enterococcus faecium</i> NRRL B-2354 in oat flour <i>Yulaf ununda Salmonella ve Enterococcus faecium NRRL B-2354'ün izotermal inaktivasyon kinetiği</i></p>	72-77
<p><b>Kader Erim, Ahmet Savcı</b> Phenolic Compound Analysis and Antioxidant Properties of <i>O. Alborosea</i> <i>O. Alborosea Bitkisinin Fenolik Bileşen Analizi ve Antioksidan Özellikleri</i></p>	78-83
<p><b>Ayhan Aksakallı</b> Non-Abelian Gauge Theories and Emerging Space-Time Structures: A New Approach to Quantum Gravity <i>Non-Abelyen Gauge Teorileri ve Ortaya Çıkan Uzay-Zaman Yapıları: Kuantum Gravitasyona Yeni Bir Yaklaşım</i></p>	84-99
<p><b>Erdal Bayram</b> Wijsman summability through Orlicz Function Sequences <i>Orlicz Fonksiyon Dizileri ile Wijsman Toplanabilirlik</i></p>	100-105
<p><b>Cemil Tunç</b> Improved New Conditions for Qualitative Behaviors of Time-varying Delay Differential Systems <i>Müşteri Kayıp Değişken Gecikmeli Diferansiyel Sistemlerin Niteliksel Davranışları için Geliştirilmiş Yeni Şartlar</i></p>	106-113
<p><b>Anıl Utku, Yılmaz Kismet, Ümit Can</b> Prediction of Mechanical Properties of Synthetic Waste Reinforced Polyolefins with GA-LSTM Hybrid Model <i>Sentetik Atık Takviyeli Poliolefinlerin Mekanik Özelliklerinin GA-LSTM Hibrit Modeli ile Tahmini</i></p>	114-125
<p><b>Cansu Altuntaş</b> The Effect of <i>Viburnum opulus</i> L. Fruit Extract on Seed Germination and Seedling Growth of Maize (<i>Zea mays</i> L.) Under Salt Stress Conditions <i>Tuz Stresi Altında Mısır (Zea mays L.) Tohumlarının Çimlenmesi ve Fide Büyümesine Viburnum opulus L. Meyve Ekstraktının Etkisi</i></p>	126-133
<p><b>Tugce Sinem Oktemer, Zeynep Önem, Sefa Çelik, Ayşen Özel, Sevim Akyüz</b> Molecular Docking and Molecular Dynamics Simulations of Molnupiravir Against Covid-19 <i>Molnupiravir'in Covid-19'a Karşı Moleküler Kenetlenme ve Moleküler Dinamik Simülasyonları</i></p>	134-141
<p><b>Etem Osma, Tuğçe Varol, Muhammet Onur Kıymaz, Halil İbrahim Türkoğlu, Faruk Yıldız, Ali Kandemir, Mert Elverici, Engin Kılıç, Abdullah Hasbenli</b> Altitudinal Variation of Mineral Elements in Common Plant Species, and Soils of Erzincan Province-Ergan Mountain <i>Erzincan İli-Ergan Dağı'nda (Türkiye) Yaygın Bitki Türleri ve Topraklarındaki Mineral Elementlerin Rakımsal Değişimi</i></p>	142-158
<p><b>Süha Gökcalp, İlhan Aydın</b> Evrimsel Sinir Ağlarında Duygu Tanıma Algoritmalarının Hiperparametrelerle Kapsamlı Analizi <i>Comprehensive Analysis of Emotion Recognition Algorithms in Convolutional Neural Networks with Hyperparameters</i></p>	159-168

<b>Mehmet Kozak</b> Kolankaya (Eşme/Uşak) Andezitik Bazaltlarının Konvansiyonel Demiryolu Hatlarında Demiryolu Balastı Olarak Kullanılabilirliği <i>Usability Of Kolankaya (Eşme/Uşak) Andesitic Basalts As Railway Ballast On Conventional Railway Lines</i>	169-173
<b>Emre Güçlü, İlhan Aydın, Erhan Akın</b> Çelik Yüzeylerdeki Kusurların Tespiti için Topluluk Öğrenme Tabanlı Gelişmiş Segmentasyon Yöntemi <i>Ensemble Learning Based Advanced Segmentation Method for Detecting Defects on Steel Surfaces</i>	174-181
<b>Hüseyin Gürbüz, Mehmet Emin Demir, Şehmus Baday, İbrahim Halil Akcan</b> Dolgusuz ve GR/B4C Dolgulu Hibrit Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin ve İşlenebilirliğinin İncelenmesi <i>Investigation of Mechanical Properties and Machinability of Unfilled and Gr/B4C Filled Hybrid Composites</i>	182-191
<b>Bahadır Atmaca, Mustafa Cüce, Hatice Dumanoglu</b> Şebinkarahisar (Giresun) Bölgesinde Ekşi Karadut ( <i>Morus nigra</i> L.) Yetiştirilen Arazilerin Topoğrafik Özelliklerinin Değerlendirilmesi <i>Evaluation of the Topographic Features of Lands Cultivating Sour Black Mulberry (<i>Morus nigra</i> L.) in Şebinkarahisar (Giresun) Region</i>	192-200
<b>Anıl Utku, Sinem Akyol</b> Rüzgâr Hızı Tahminine Yönelik Hibrit ConvLSTM Modeli: Hindistan'ın En Yüksek Rüzgâr Hızına Sahip Şehirleri İçin Bir Vaka Çalışması <i>Hybrid ConvLSTM Model for Wind Speed Prediction: A Case Study for India's Highest Wind Speed Cities</i>	201-215

**Okuyucu Mektupları / Letters**

Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimler Dergisi'nde yayımlanan çalışmalar hakkındaki değerli görüşlerinizi, yorumlarınızı ve önerilerinizi lütfen dergi editörüne iletiniz.  
msufbd@alparslan.edu.tr

## Analyzing the Performance of Convolutional Neural Networks and Transformer Models in Automated Bone Fracture Detection

Ece BİNGÖL<sup>2</sup>, Semih DEMİREL<sup>1,3</sup>, Ataberk URFALI<sup>1,4</sup>, Ömer Faruk BOZKIR<sup>1</sup>, Azer ÇELİKİTEN<sup>1,5</sup>,  
Abdulkadir BUDAK<sup>1</sup>, Hakan KARATAŞ<sup>1</sup>








<sup>1</sup> Department of Artificial Intelligence and Image Processing, Akgun Computer Inc., Ankara, Türkiye

<sup>2</sup> Department of Information Systems Engineering, Faculty of Engineering, Atılım University, Ankara, Türkiye

<sup>3</sup> Department of Information Systems, Graduate School of Informatics, Gazi University, Ankara, Türkiye

<sup>4</sup> Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Konya Technical University, Konya, Türkiye

<sup>5</sup> Department of Computer Engineering, Graduate School of Science, Ege University, İzmir, Türkiye

✉: [semih.demirel@akgun.com.tr](mailto:semih.demirel@akgun.com.tr) <sup>1</sup> 0009-0006-7615-1392 <sup>2</sup> 0000-0002-3454-3631 <sup>3</sup> 0000-0001-5709-6718  
<sup>4</sup> 0000-0002-3696-3613 <sup>5</sup> 0000-0002-6804-737X <sup>6</sup> 0000-0002-0328-6783 <sup>7</sup> 0000-0002-9497-5444

Received (Geliş): 20.02.2024

Revision (Düzelme): 20.06.2024

Accepted (Kabul): 15.08.2024

### ABSTRACT

The most significant component of the skeletal and muscular system, whose function is vital to human existence, are the bones. Breaking a bone might occur from a specific hit or from a violent rearward movement. In this study, bone fracture detection was performed using convolutional neural network (CNN) based models, Faster R-CNN and RetinaNet, as well as a transformer-based model, DETR (Detection Transformer). A detailed investigation was conducted using different backbone networks for each model. This study's primary contributions are a methodical assessment of the performance variations between CNN and transformer designs. Models trained on an open-source dataset consisting of 5145 images were tested on 750 test images. According to the results, the RetinaNet/ResNet101 model exhibited superior performance with a 0.901 mAP50 ratio compared to other models. The obtained results show promising outcomes that the trained models could be utilized in computer-aided diagnosis (CAD) systems.

**Keywords:** Deep learning, medical imaging, object detection, convolutional neural network, vision transformer

### Otomatik Kemik Kırığı Tespitinde Evrimsel Sinir Ağları ve Transformer Modellerinin Performansının Analizi

#### ÖZ

İnsan varlığı için hayati önem taşıyan iskelet ve kas sisteminin en önemli bileşeni kemiklerdir. Bir kemiğin kırılması belirli bir darbeden veya şiddetli bir geriye doğru hareketten kaynaklanabilir. Bu çalışmada, kemik kırığı tespiti, evrimsel sinir ağı (ESA) tabanlı modeller olan Faster R-CNN ve RetinaNet, ayrıca bir transformer tabanlı model olan DETR (Detection Transformer) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her model için farklı omurga ağları kullanılarak detaylı bir inceleme yapılmıştır. Bu çalışmanın birincil katkıları, CNN ve transformator tasarımları arasındaki performans farklılıklarının yöntemsel bir değerlendirmesidir. 5145 görüntüden oluşan açık kaynaklı bir veri setinde eğitilen modeller, 750 test görüntüsünde test edilmiştir. Sonuçlara göre, RetinaNet/ResNet101 modeli diğer modellere göre daha üstün performans sergileyerek 0.901 mAP50 oranına ulaşmıştır. Elde edilen sonuçlar, eğitilen modellerin bilgisayar destekli tanı (BDT) sistemlerinde kullanılabilecek vaat edici sonuçlar sunmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Derin öğrenme, medikal görüntüleme, nesne tespiti, evrimsel sinir ağları, görüş transformörü

#### INTRODUCTION

A bone is among the most fundamental components that make up our body's support and mobility system [1]. Bones have many tasks such as keeping our body upright, protecting internal organs, and walking. An adult human's body contains 206 bones in total [2]. Bones can be broken as a result of falling, trauma, or impact. Bone fractures are manually detected by radiologists after x-

ray images are taken, and the result is transmitted to the orthopedic doctor. Manual detection can be time-consuming. Also, sometimes radiologists or orthopedic doctors may not be available in emergency departments late at night. In this case, other doctors can be less capable to identify minor fractures due to their lack of specialization and may prolong the patient's recovery process by applying the wrong treatment to the patient [3]. Additionally, early diagnosis plays an important role

in the selection of appropriate treatment methods and the success of treatment [4]. Computer-aided diagnosis also helps minimize human errors during treatment [5].

Previously, the usefulness of diagnostic computers for bone fracture detection was very limited in practical clinical settings, mainly due to its low accuracy. Recently, thanks to the availability of extensive, annotated image datasets, many new studies on CAD based on deep learning have been presented [6]. CNNs used in image analysis are an important network within the scope of deep learning [7]. CNNs represent a specialized branch of artificial neural networks designed particularly for tasks involving visual data processing, such as image recognition and analysis. CNN algorithms can perform object detection and classification on medical images as well as on many images. In such cases, they can be utilized to comprehend the content of the image or determine the location of objects by extracting features from complex structures within the image. In the study conducted by Ozdemir et al. [8], CNN models were comprehensively compared on augmented images, demonstrating the success of CNN models.

Faster R-CNN [9] and RetinaNet [10] are common architectures of CNNs used for object detection. Faster R-CNN performs object detection in two stages, first suggesting the regions where the objects may be, and then the location is determined from the suggested region [9]. In RetinaNet, focal loss [10] solves the class imbalance problem and detects objects of different sizes using anchor boxes [10]. The differences between Faster R-CNN and RetinaNet are that Faster R-CNN uses regional proposals, and RetinaNet uses anchor boxes. In addition, cross-entropy is used as a generality loss function in Faster R-CNN, and focal loss is used in RetinaNet. Vision transformer [11] is used for object identification inspired by the transformer [12] architecture. DETR [13] is a model based on the transformer architecture used for object detection. DETR also uses the transformer structure that performs all object detection at once.

In this study, CNN-based architectures Faster R-CNN and RetinaNet, and the DETR model based on transformer architecture, were used. These models were employed to detect the fractured region in broken bone images in x-ray images and compared to measure which model performs better.

The primary findings of this research include:

- Our study comprehensively examines the advantages and disadvantages of CNN-based architectures compared to transformer-based architectures.
- A comprehensive comparison of Faster R-CNN, RetinaNet, and DETR models was conducted.
- Our comprehensive study provides a different approach to bone fracture detection, contributing significantly to the development of computer-aided diagnostic systems.

The remaining portions of this study's content are categorized into the following sections: In the literature

review section, existing studies are examined. The material and method section contains the models that were utilized in this investigation. Results and discussion include performance metrics, model experimental results, and a discussion of the findings. Future research and a conclusion are provided in the section conclusion.

## LITERATURE REVIEW

Numerous studies have been conducted using state-of-the-art models of convolutional neural networks in the literature. Some studies have focused on bone fracture detection.

In the study by Warin et al. [14], a total of 1710 mandibular images were used, and 855 of these images had fractures. First, the images were classified in binary as fracture and nonfracture. DenseNet-169 [15] and ResNet50 models were used for classification. Meanwhile, the outcomes that the specialists discovered, and residents were compared. According to the results, DenseNet-169 performed 100% classification. In broken bone detection, the Faster R-CNN model outperformed the YOLOv5 model with an f1 score of 90.67%.

Kim et al. [16] proposed an assessment method utilizing a stacked autoencoder (SAE) for bone fracture investigation that builds upon prior research in the fields of unsupervised learning, medical imaging, and structural health monitoring. This novel approach aligns with recent efforts to enhance the accuracy and efficiency of fracture analysis without relying solely on traditional imaging techniques. Additionally, the use of virtual spectrograms and a short-time Fourier transform in image-based training signifies a departure from conventional methodologies.

The study conducted by Tao et al. [17] applied an automated segmentation method in medical imaging, focusing specifically on the segmentation of zygomatic bones in cone-beam computed tomography (CBCT) images. The utilization of attention maps generated by gradient-weighted class activation mapping (Grad-CAM) and guided Grad-CAM algorithms for improved interpretability represents a novel contribution to the field. Comparisons with human dentists highlight the efficiency and accuracy gains achieved by the proposed model, setting it apart as a promising tool for 3D modeling in preoperative planning scenarios. While achieving a 99.64 accuracy rate, a dice coefficient score of 92.34 was obtained.

In their study, Ahmed and Hawezi [18] used the integration of machine learning algorithms in medical imaging, particularly for bone fracture detection, representing a significant advancement in enhancing diagnostic accuracy. The proposed system, encompassing pre-processing, edge detection, feature extraction, and machine learning classifications, underscores the multidimensional approach employed to refine the diagnostic process. The findings, with support vector machine (SVM) exhibiting an accuracy rate of 0.92 among the algorithms.

Du et al. [19] contributes to the field of skeletal bone age assessment (BAA) by proposing an innovative two-stage segmentation method for hand bone X-ray images. The importance of accurate segmentation in BAA is emphasized, given the intricate structure and small features of hand bones. The utilization of the OSA-YOLOv5 network for initial extraction and the subsequent application of GRU-UNet for separation mark a novel approach to enhance accuracy and completeness in segmentation. The GRU-UNet segmentation model demonstrates a significant improvement, achieving a 14.70% higher accuracy than the conventional Unet [20].

The study conducted by Karanam et al. [2] contributes to the burgeoning field of fracture detection by presenting a comprehensive overview of various techniques and methodologies. Notably, the study addresses a critical gap in existing literature by emphasizing the importance of not only detecting but also classifying bone fractures. This work serves as a valuable resource for researchers aiming to develop models that can automatically detect and classify fractures, supporting the construction of fracture detection.

In their study, conducted by Caron et al. [3] contributes to the advancing understanding of osteoporosis by presenting a novel approach to studying microdamage development in trabecular bone under mechanical loading. The study is centered on the usage of YOLOv4 [21] and Unet. The proposed two-step approach showcases the potential of YOLOv4 for microdamage detection and Unet for segmentation, offering promising results in accurately identifying and delineating microdamage regions. With average intersection over unions (IoUs) of 45.32% and 51.12% and mean average precisions (mAPs) of 28.79% and 46.22% for samples 1 and 2, respectively, the YOLOv4p5 model performed the best.

In their study, Zheng et al. [22] contributes to medical imaging by presenting a novel two-stage method designed for the automatic identification and localization of complex pelvic fractures. The proposed method stands out by harnessing the symmetry properties of pelvic anatomy and capturing symmetric feature differences caused by fractures on both sides, addressing limitations observed in existing methods that focus solely on image or geometric features. Leveraging supervised contrastive learning with a siamese deep neural network, incorporating a structural attention mechanism and a structure-focused attention (SFA) module, the method demonstrates superior mean accuracy and sensitivity as opposed to cutting-edge contrastive learning methods and advanced classification networks.

Our study distinguishes itself in the literature by meticulously focusing on fracture detection in medical imaging, with a distinct emphasis on CNN models and transformer models. Unlike earlier works, we adopted state-of-the-art detection models for our investigation, carefully selected for their potential advantages in our targeted domain. Our comparative analysis involves a thorough comparison between CNN and transformer

models for fracture detection, along with a comprehensive evaluation. Ultimately, our research contributes to the burgeoning field of medical imaging, addressing critical gaps and paving the way for advancements in fracture detection that hold significant implications for clinical applications.

## MATERIAL AND METHOD

In this section, dataset and object detection models employed for fracture detection are introduced.

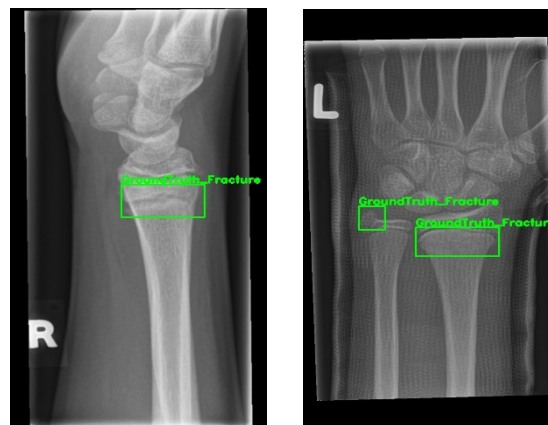
### Dataset

In this study, the dataset used for bone fracture detection is open source and obtained from the Roboflow platform [23]. The information regarding the utilized dataset is provided in Table 1.

**Table 1.** Dataset for bone fracture

	Train	Val	Test	Total
Dataset	5145	750	750	6645

There are 6645 images in all in the entire dataset, which encompass fractures from different types of bones. The dataset contains images of hand, finger, arm, leg, toe, and hip fractures. Figure 1 shows some of the images taken from the dataset.



**Figure 1.** Sample images for fractures. The green-colored bounding boxes represent the ground truth.

### Faster R-CNN

In order to extract features from the images, Faster R-CNN uses models like visual geometry group (VGG) [24] and residual network (ResNet) [25] as a backbone in the initial stage of the process [26]. Simultaneously, the VGG architecture is used as the backbone in the article on Faster R-CNN.

In the other stage of Faster R-CNN, the region proposal network (RPN) creates recommended regions for object detection, processing the image only once [27]. The purpose of the RPN is to send the extracted features to a

1x1 convolutional layer using 3x3 convolution and 2x2 max pooling layers. Two cells make up the RPN's output layer: one predicts the region bounding box, and the other determines if an item is there or not [27]. Subsequently, ROI pooling outputs the maximum feature map of each region and brings the regions proposed by RPN in different sizes to the same size [28]. After passing through convolution and fully connected layers, target class identification, and sensitive box presenter regression are performed.

Once region proposals are generated, the Fast R-CNN detector refines these proposals and classifies objects [29]. The classification loss penalizes incorrect class predictions. Cross-entropy loss is commonly used in classification problems. Equation 1 presents the cross-entropy loss.

$$H(y, \hat{y}) = -(y \cdot \log(\hat{y} + 1 - y) + (1 - y) \times \log(1 - \hat{y})) \quad (1)$$

where,  $y$  is the true label (ground truth), which is either 0 or 1.  $\hat{y}$  is the predicted probability of the positive class. Bounding box regression loss penalizes inaccurate bounding box regression. The Smooth L1 Loss function measures the absolute difference by comparing the ground truth with the bounding box drawn by the model [30]. The Smooth L1 loss is given in Equation 2.

$$SmoothL1(x) = \begin{cases} 0.5x^2 & \text{if } |x| < 0 \\ |x| - 0.5 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

where,  $x$  is the discrepancy between the predicted bounding box coordinates and the ground truth bounding box coordinates.

Figure 2 shows the architecture of the Faster R-CNN.

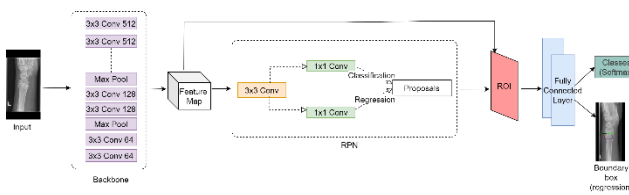


Figure 2. Architecture of Faster R-CNN.

As illustrated in Figure 2, during the initial stage of Faster R-CNN, the input image undergoes processing through a CNN backbone, such as ResNet or VGG, extracting a hierarchical set of feature maps. Concurrently, the RPN operates on these feature maps to generate region proposals.

### RetinaNet

RetinaNet is a model proposed to address the issue of excessive foreground and background imbalance encountered during the training of other models in object detection [31]. RetinaNet consists of two main components: Feature Pyramid Network (FPN) [32] and focal loss.

CNN is used by FPN to capture richer information at a reduced resolution. The top-down path employs high-resolution feature maps, focusing on the general features of the image [33]. Pyramidal links in the specified paths of the FPN enable bottom-up or top-down connections, bringing together different feature levels and scales. Simultaneously, high-resolution feature maps and low-resolution feature maps merge. This merging enhances the visibility of small objects with larger feature maps, and large objects become more visible in small feature maps.

In general, loss functions assign the same importance to each sample because most samples belong to the same class. However, in some rare cases, this can cause the model to lose focus. Focal Loss, used in RetinaNet, is designed to prevent this by paying less attention to easily classifiable samples and more attention to more complex samples. Focal loss is given in Equation 3.

$$FocalLoss(p_t) = -(1 - p_t)^\gamma \log(p_t) \quad (3)$$

where,  $p_t$  is the predicted probability of the true class, and  $\gamma$  is a tunable focusing parameter (typically a positive value). The term  $(1 - p_t)^\gamma$  is the focal weight, which down-weights the contribution of well-classified examples. Figure 3 shows the architecture of the RetinaNet.

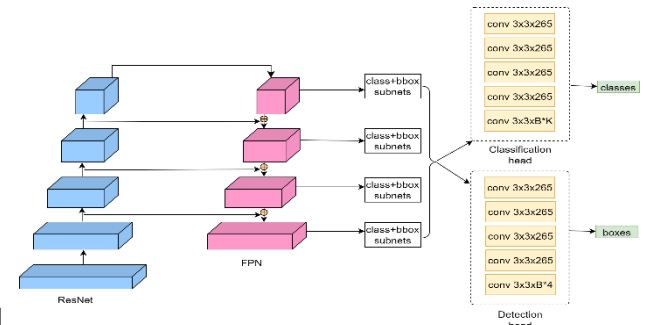


Figure 3. Architecture of RetinaNet

To attain the highest level of performance, RetinaNet combines a focal loss with an FPN, as can be observed in Figure 3.

### Detection Transformer (DETR)

DETR is inspired by the transformer-based architecture. DETR can process the image in a single stage and estimate the object positions and class of objects. The input layer, transformer layer, and output layer are the three layers that make up DETR [34].

Firstly, in the input layer, the image passes through CNN layers using a backbone. Extracted features are used to identify the objects in the next stages. In the transformer layer of DETR, there are encoder and decoder. The encoder matches the features extracted from the backbone and the reference boxes [35]. Using the attention mechanism, the relationship between different objects in an image is learned. In the decoder part,

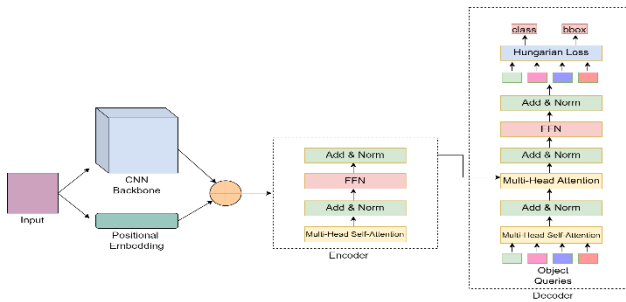


classification and predictions are made for object detection. In the output layer, a feed-forward network is used so that each layer produces an output for object detection and classification using the output from the previous layer.

The loss functions used in DETR are Hungarian Loss and Smooth L1 Loss [13]. Hungarian Loss calculates the absolute difference between the class labels predicted by the model and the actual class labels. The Hungarian loss is given in Equation 4.

$$\text{HungarianLoss} = -\sum_{i=1}^N \text{Cost}[i, \text{assignment}[i]] \quad (4)$$

where,  $N$  is the total number of predicted boxes,  $\text{assignment}[i]$  is the index of the ground truth box assigned to the predicted box  $i$  according to the optimal assignment, and  $\text{Cost}$  is the cost matrix representing the cost of assigning each predicted box to each ground truth box. Figure 4 displays the DETR's architecture.



**Figure 4.** Architecture of DETR

DETR is an object detection architecture that uses transformer-based models to achieve accurate and effective detection tasks, as can be seen in Figure 4.

## RESULTS AND DISCUSSION

Metrics are implemented to assess and enhance the model's performance by determining whether the model properly or mistakenly predicts item detections. Simultaneously, they help to take necessary actions according to the model's state by evaluating its performance. The metrics used to test object detection models are as follows:

**Precision:** It measures the accuracy of positive predictions made by the model. The precision is given in Equation 5.

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (5)$$

**Recall:** It measures the ability of the model to capture all positive instances. Recall is given by Equation 6.

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (6)$$

**F1 Score:** It considers both precision and recall to provide a balanced assessment of a model's performance. The F1 Score is given by Equation 7.

$$F1 - \text{Score} = \frac{2 \times \text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (7)$$

**mAP (Mean Average Precision):** It combines precision and recall to provide a comprehensive measure of how well a model identifies and localizes objects in an image. mAP is given in Equation 8.

$$mAP = \frac{1}{C} \sum_{c=1}^C AP_c \quad (8)$$

where,  $C$  is the whole count of classes.  $AP_c$  is the average precision for a class  $c$ .

Faster R-CNN, RetinaNet, and DETR models were tested using 750 test images. Both training and testing processes were conducted in the Google Colaboratory environment. Table 2 displays the results that were achieved.

**Table 2.** Results of the model's performances

Model/Backbone	mAP50	Precision	Recall	F1-Score
FasterR-CNN/ResNet50	0.828	0.899	0.906	0.902
FasterR-CNN/ResNet101	0.832	0.906	0.907	0.907
RetinaNet/ResNet50	0.896	0.921	0.878	0.899
RetinaNet/ResNet101	0.901	0.917	0.880	0.898
DETR/ResNet50	0.844	0.870	0.883	0.887
DETR/ResNet101	0.840	0.905	0.887	0.896

The backbone of the Faster R-CNN and RetinaNet models contains FPN. Although the same type of backbone is used in the models, the depths of the backbones are different. Faster R-CNN and RetinaNet models were trained for 20,000 iterations, while DETR models were trained for 200 epochs. A batch size of 8 and a learning rate of 0.0001 were applied to each model during training. Additionally, adam was used to optimize the models.

In Table 2, the highest mAP50 value is observed in the RetinaNet-ResNet101 model with a ratio of 0.901, indicating high success in object detection. The RetinaNet/ResNet50 model also demonstrates good performance with a high mAP50 value of 0.896. However, Faster R-CNN models have lower but still acceptable mAP50 values. The Faster R-CNN/ResNet50 model and Faster R-CNN/ResNet101 model achieved ratios of 0.828 and 0.832, respectively.

The highest Precision value is 0.921, belonging to the RetinaNet/ResNet50 model, indicating how accurately the model identifies true positive objects. Other models also have high Precision values. While the RetinaNet/ResNet101 model has a precision ratio of 0.917, slightly behind the RetinaNet/ResNet50 model, it outperforms other models.

The highest Recall value is 0.907, observed in the Faster R-CNN/ResNet101 model, indicating its ability to detect

truly positive objects with a high success rate. The Faster R-CNN/ResNet50 model showed a recall ratio of 0.906, very close to the performance of the Faster R-CNN/ResNet101 model.

The highest F1-Score value is 0.907, belonging to the Faster R-CNN/ResNet101 model, demonstrating a good balance between Precision and Recall metrics. The Faster R-CNN/ResNet50 model also has a high F1-Score value of 0.902, indicating a well-maintained balance.

The mAP50 values for DETR/ResNet50 and DETR/ResNet101 models are 0.844 and 0.840, respectively. These values indicate that DETR models have an average performance in object detection. The Precision value for the DETR/ResNet50 model is 0.870, while for the DETR/ResNet101 model, it is 0.905. These values indicate the proportion of detected objects by DETR models that are truly positive. The Recall values for DETR/ResNet50 and DETR/ResNet101 models are 0.883 and 0.887, respectively. The DETR/ResNet101 model has a slightly higher Recall value compared to DETR/ResNet50.

RetinaNet generally outperforms Faster R-CNN and DETR in terms of mAP50, precision, indicating its superiority in object detection accuracy and reduction of false positives. Faster R-CNN achieves the highest recall, suggesting its effectiveness in capturing a higher proportion of true positive instances. DETR shows competitive performance but falls slightly behind in terms of mAP50, precision, and F1-Score compared to RetinaNet and Faster R-CNN.

Figure 5 displays the RetinaNet/ResNet101 model's prediction results.



Figure 5. RetinaNet/ResNet101 prediction results.

Figure 5 displays sample images of prediction results obtained using the RetinaNet/ResNet101 model. The green color represents the ground truth, while the yellow

color represents the predicted bounding box. Additionally, confidence score values are also shown.

The model exhibiting the best performance in terms of mAP50 ratio, RetinaNet/ResNet101, is compared with existing studies in Table 3. Existing studies have used similar datasets aimed at bone fracture detection.

Table 3. Evaluation of the suggested model in the light of previous research.

Paper	Model/Back bone	mAP50	Precision	Recall	F1-Score
Ma and Luo [36]	Faster R-CNN+CrackNet	-	0.897	0.9049	0.9014
Guan et al. [37]	CNN	0.620	-	-	-
Guan et al. [38]	DCFPN	0.821	-	-	-
Zou and Arshad [39]	YOLOv7-ATT	0.862	-	-	-
Caron et al. [3]	YOLOv4p5	0.462	-	-	-
Proposed Model	RetinaNet/ResNet101	0.901	0.917	0.880	0.898

The analysis of the presented table reveals notable insights into the performance of various object detection models. The Faster R-CNN+CrackNet model, as reported in Ma and Luo [36], achieved a precision of 0.897, recall of 0.9049, and an F1-Score of 0.9014, but no mAP50 value was provided. When compared to the recommended model, Faster R-CNN+CrackNet surpasses our model in terms of recall and F1-score, while our proposed model excels in precision. The CNN model proposed by Guan et al. [37] achieved a modest mAP50 of 0.6204, highlighting its limitations. Similarly, the DCFPN model proposed by Guan et al. [38] showed a mAP50 of 0.821, while YOLOv7-ATT proposed by Zou and Arshad [39] demonstrated a mAP50 of 0.862. The proposed method performs competitively with these models in terms of mAP50. YOLOv4p5 proposed by Caron et al. [3], with a mAP50 of 0.4622, lags significantly behind the proposed model.

In terms of precision, the proposed model excels with a value of 0.917, demonstrating its ability to minimize false positives. The CNN model proposed by Guan et al. [37], lacks precision information, necessitating further evaluation. For recall, the Faster R-CNN+CrackNet model proposed by Ma and Luo [36] achieves the highest score at 0.9049, emphasizing its effectiveness in capturing true positives. In contrast, the proposed model exhibits a slightly lower recall of 0.880, indicative of its potential trade-off with precision. Lastly, considering the F1-Score, the proposed RetinaNet/ResNet101 remains superior with a value of 0.898, offering a balanced performance between precision and recall. Meanwhile, YOLOv4p5 again lags behind without specific F1-Score information.

Overall, the RetinaNet/ResNet101 model outperforms other models according to the mAP50 metric, while



surpassing the Faster R-CNN+CrackNet model in terms of precision. The Faster R-CNN+CrackNet model outperformed our model only in the Recall and F1-Score metrics.

## CONCLUSION

Faster R-CNN, RetinaNet, DETR models were compared for bone fracture detection based on mAP, precision, recall and F1-score values. The RetinaNet/ResNet101 model has the highest mAP and precision, which may be due to the fact that they are more complex samples thanks to Focal loss. The DETR models, which comes from a vision transformer-based architecture instead of a CNN-based architecture like Faster R-CNN and RetinaNet, is very close to the Faster R-CNN models in terms of F1 score. Considering all these results, it is decided that CNN-based models such as Faster R-CNN and RetinaNet are the most suitable for optimal bone fracture detection. However, it is important to recognize certain limitations in our study. Firstly, the model's dependence on extensive training data might pose challenges in scenarios where acquiring a diverse and sufficiently large dataset is difficult. The generalizability of the model to various imaging conditions and patient demographics may be compromised as a result. Secondly, the lack of interpretability in deep learning models remains a concern, as understanding the decision-making process is crucial, especially in medical applications.

In future studies, we aim to explore the potential benefits of ensemble models, amalgamating predictions from various architectures to create a synergistic and more robust framework for fracture detection. Additionally, our future endeavors will include extensive real-world validation studies across diverse clinical settings, ensuring the practical effectiveness and reliability of the bone fracture detection models in authentic healthcare environments.

## ACKNOWLEDGMENT

This study was supported by AKGUN Computer Incorporated Company. We would like to thank AKGUN Computer Inc. for providing all kinds of opportunities and funds for the execution of this project.

## REFERENCES

- [1] Czermak E.D., Euler A., Franckenberg S., Finkenstaedt T., Villefort C., Dominic G., Guggenberger R. Evaluation of ultrashort echo-time (UTE) and fast-field-echo (FRACTURE) sequences for skull bone visualization and fracture detection – A postmortem study, *Journal of Neuroradiology*. 49 237-243, 2022
- [2] Karanam S.R., Srinivas Y., Chakravarty S. A systematic review on approach and analysis of bone fracture classification, *Materials Today: Proceedings*. 80 2557-2562, 2023
- [3] Caron R., Londono I., Seoud L., Villemure I. Segmentation of trabecular bone microdamage in Xray microCT images using a two-step deep learning method, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 137 105540, 2023.
- [4] Ozdemir C., Dogan Y. Advancing brain tumor classification through MTAP model: an innovative approach in medical diagnostics, *Medical and Biological Engineering and Computing*. 1-12, 2024
- [5] Ozdemir C. Classification of brain tumors from MR images using a new CNN architecture." *Traitement du Signal*. 40(2) 611-618, 2023.
- [6] Guan B., Yao J., Wang S., Zhang G., Zhang Y., Wang X., Wang M. Automatic detection and localization of thighbone fractures in X-ray based on improved deep learning method, *Computer Vision and Image Understanding*. 216 103345, 2022.
- [7] O'Shea K., Nash R. An introduction to convolutional neural networks, *arXiv preprint arXiv:1511.08458*, 2015.
- [8] Ozdemir C., Dogan Y., Kaya Y. RGB-Angle-Wheel: A new data augmentation method for deep learning models. *Knowledge-Based Systems*. 291 111615, 2024
- [9] Ren S., He K., Girshick R., Sun J. Faster r-cnn: Towards real-time object detection with region proposal networks, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 39 1137-1149, 2017.
- [10] Lin T.Y., Goyal P., Girshick R., He K., Dollár P. Focal loss for dense object detection, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 42 318-327, 2020.
- [11] Dosovitskiy A., Beyer L., Kolesnikov A., Weissenborn D., Zhai X., Unterthiner T., Dehghani M., Minderer M., Heigold G., Gelly S., Uszkoreit J., Houlsby N. An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale, *International Conference on Learning Representations*. 2021.
- [12] Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A. N., Kaiser Ł., Polosukhin, I. Attention is all you need, *Advances in neural information processing systems* 30(NIPS 2017). 30, 2017.
- [13] Carion N., Massa F., Synnaeve G., Usunier N., Kirillov A., Zagoruyko S. End-to-end object detection with transformers, *European Conference on Computer Vision*. 12346 213-229, 2020.
- [14] Warin K., Limprasert W., Suebnukarn S., Inglam S., Jantana P., Vicharueang S. Assessment of deep convolutional neural network models for mandibular fracture detection in panoramic radiographs, *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*. 51 1488-1494, 2022.
- [15] Huang G., Liu Z., Maaten L.V.D., Weinberger K.Q. Densely Connected Convolutional Networks, 2017 *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2261-2269, 2017.
- [16] Kim D.Y., Park E., Ku K., Hwang S.J., Hwang K.T., Lee C.H., Yoon G.H. Application of stacked autoencoder for identification of bone fracture, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 146 106077, 2023.
- [17] Tao B., Yu X., Wang W., Wang H., Chen X., Wang F., Wu Y. A deep learning-based automatic segmentation of zygomatic bones from cone-beam computed tomography images, *Journal of Dentistry*. 135 104582, 2023.
- [18] Ahmed K.D., Hawezi R. Detection of bone fracture based on machine learning techniques, *Measurement: Sensors*. 27 100723, 2023.
- [19] Du H., Wang H., Yang C., Kabalata L., Li H., Qiang C. Hand bone extraction and segmentation based on a convolutional neural network, *Biomedical Signal Processing and Control*. 89 105788, 2024.
- [20] Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention-MICCAI 2015*. 9351 234-241, 2015.
- [21] Bochkovskiy A., Wang C.Y., Liao H.Y.M. Yolov4: Optimal speed and accuracy of object detection. *arXiv preprint arXiv:2004.10934*, 2020.

- [22] Zheng B., Wang H., Xu J., Tu P., Jaskowicz L., Chen X. Two-Stage Structure-Focused Contrastive Learning for Automatic Identification and Localization of Complex Pelvic Fractures, *IEEE Transactions on Medical Imaging*. 42 2751-2762, 2023.
- [23] Roboflow 100. Bone fracture dataset, Roboflow Universe. 2023.
- [24] Simonyan K., Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. *arXiv preprint arXiv:1409.1556*, 2014.
- [25] He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition, *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 770-778.
- [26] Han S., Xiao X., Song B., Guan T., Zhang Y., Lyu M. Automatic borehole fracture detection and characterization with tailored Faster R-CNN and simplified Hough transform, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 126 107024, 2023.
- [27] Lyu H., Qiu F., An L., Stow D., Lewison R., Bohnett E. Deer survey from drone thermal imagery using enhanced faster R-CNN based on ResNets and FPN, *Ecological Informatics*. 79 102383, 2024.
- [28] Tang Y., Chen Y., Sharifuzzaman S.A.S.M., Li T. An automatic fine-grained violence detection system for animation based on modified faster R-CNN, *Expert Systems with Applications*. 237 121691, 2024.
- [29] Girshick R. Fast r-cnn, *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*. 1440-1448, 2015.
- [30] Yang W., Xiao Y., Shen H., Wang Z. Generalized weld bead region of interest localization and improved faster R-CNN for weld defect recognition, *Measurement*. 222 113619, 2023.
- [31] Cheng J., Wang R., Lin A., Jiang D., Wang Y. A feature enhanced RetinaNet-based for instance-level ship recognition, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 126 107133, 2023.
- [32] Lin T.Y., Dollár P., Girshick R., He K., Hariharan B., Belongie S. Feature pyramid networks for object detection, *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2117-2125, 2017.
- [33] Tong L., Xue S., Chen X., Fang R. Artificial intelligence-based detection of posterior tibial slope on X-ray images of unicompartamental knee arthroplasty patients, *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. 16 100615, 2023.
- [34] Chen Y., Zhang C., Chen B., Huang Y., Sun Y., Wang C., Fu X., Dai Y., Qin F., Peng Y., Gao Y. Accurate leukocyte detection based on deformable-DETR and multi-level feature fusion for aiding diagnosis of blood diseases, *Computers in Biology and Medicine*. 170 107917, 2024.
- [35] Zheng H., Wang G., Xiao D., Liu H., Hu X. FTA-DETR: An efficient and precise fire detection framework based on an end-to-end architecture applicable to embedded platforms, *Expert Systems with Applications*. 248 123394, 2024.
- [36] Ma Y., Luo Y. Bone fracture detection through the two-stage system of Crack-Sensitive Convolutional Neural Network, *Informatics in Medicine Unlocked*. 22 100452, 2021.
- [37] Guan B., Zhang G., Yao J., Wang X., Wang M. Arm fracture detection in X-rays based on improved deep convolutional neural network, *Computers and Electrical Engineering*. 81 106530, 2020.
- [38] Guan B., Yao J., Zhang G., Wang X. Thigh fracture detection using deep learning method based on new dilated convolutional feature pyramid network, *Pattern Recognition Letters*. 125 521-526, 2019.
- [39] Zou J., Arshad M.R. Detection of whole body bone fractures based on improved YOLOv7, *Biomedical Signal Processing and Control*. 91 105995, 2024.

## Isothermal inactivation of *Enterococcus faecium* NRRL B-2354 as surrogate for *Salmonella* in oat flour

Samet Ozturk<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Food Engineering, Faculty of Engineering, Gümüşhane University, Gümüşhane, Türkiye

✉: [sozturk@gumushane.edu.tr](mailto:sozturk@gumushane.edu.tr)  0000-0003-3155-093X

Received (Geliş): 16.06.2024

Revision (Düzelme): 19.08.2024

Accepted (Kabul): 26.08.2024

### ABSTRACT

This study identified the survival kinetic and thermal resistance (*D*- and *z*-values) of *Salmonella* with its potential surrogate, *Enterococcus faecium*, in oat flour during isothermal processing. Oat flour ( $a_w = 0.40$ ) was uniformly inoculated with *S. Enteritidis* PT30 and *E. faecium* ( $10^{8-9}$ CFU/g). Samples ( $1 \pm 0.1$  g) were in plastic bags heated at 75, 80, and 85°C to assess bacterial survival. The survival inactivation of *S. Enteritidis* PT30 and *E. faecium* were analyzed using Log-linear and Weibull models. The survival curves followed first-order kinetic.  $D_{75^\circ\text{C}}$ ,  $D_{80^\circ\text{C}}$  and  $D_{85^\circ\text{C}}$  values of *S. Enteritidis* PT30 and *E. faecium* in oat flour decreased from  $16.08 \pm 1.36$  to  $2.27 \pm 0.35$  min and  $23.61 \pm 1.39$  to  $3.87 \pm 0.42$  min respectively, with corresponding *z*-values of  $13.4 \pm 0.37$  and  $12.1 \pm 0.41^\circ\text{C}$ . Results from this research can be applied to validate the thermal process to ensure the low moisture food safety.

**Keywords:** *E. faecium*, *Salmonella*, oat flour, thermal processing

### Yulaf ununda *Salmonella* ve *Enterococcus faecium* NRRL B-2354'ün izotermal inaktivasyon kinetiği

#### ÖZ

Bu çalışmada *Salmonella*'nın ısı işlem sırasında yulaf ununda hayatta kalma ve ısı toleransının (*D*- ve *z*-değerleri) patojen özellik göstermeyen *Enterococcus faecium* ile birlikte belirlenmesi amaçlanmıştır. Yulaf unu ( $a_w=0.40$ ) örnekleri nem kontrollü bir ortamda *S. Enteritidis* PT30 ve *E. faecium* ile eşit şekilde inoküle ( $10^{8-9}$  CFU/g) edilmiştir. Un örnekleri ( $1\pm 0.1$  g) daha sonra plastik torbalarda vakumlanarak paketlenmiş ve bakterilerin sıcaklık direncini değerlendirmek üzere 75, 80 ve 85°C'de sıcak su banyosunda ısı işleme tabi tutulmuştur. *S. Enteritidis* PT30 ve *E. faecium*'un hayatta kalma eğrileri, iki farklı model (Log-lineer ve Weibull) kullanılarak analiz edilmiş ve mikroorganizmaların hayatta kalma eğrilerinin birinci derece kinetik modelini takip ettiği gözlemlenmiştir. *S. Enteritidis* PT30 ve *E. faecium*'un yulaf unundaki *D*-değerlerinin sıcaklık artışı ile  $16.08\pm 1.36$ 'dan  $2.27\pm 0.35$  dakikaya ve  $23.61\pm 1.39$ 'dan  $3.87\pm 0.42$  dakikaya düştüğü gözlemlenirken, karşılık gelen *z*-değerleri  $13.41\pm 0.37$  ve  $12.13\pm 0.41^\circ\text{C}$  olarak belirlenmiştir. Bu araştırmadan elde edilen *D*- ve *z*-değerleri, düşük nemli gıdaların mikrobiyal güvenliğini sağlamak adına ısı işlemlerin doğrulanmasında kullanılabilir.

**Anahtar Kelimeler:** *E. faecium*, *Salmonella*, Isıl işlem, Yulaf unu

### INTRODUCTION

Foodborne pathogens have become a significant global food safety concern. In 2017, 841 foodborne pathogen-related outbreaks were reported, resulting in numerous illnesses, hospitalizations, and tragically, some deaths [1]. Most outbreaks (29%) and illness (34%) are linked to *Salmonella* in various foods [1]. This emphasizes the critical need for thorough preventive measures and efficient control strategies to reduce the risks linked to *Salmonella*. Historically, low-moisture foods (LMF) including flour and dry vegetables have been considered to have minimal risk of microbial contamination. This is primarily because their water activity (below 0.70) acts as a barrier, preventing the growth of microorganisms [2]. Despite their generally perceived safety, LMFs have

often been involved in multiple recalls and incidents. From 2006 to 2019, there were 26 salmonellosis outbreaks reported due to the contamination of LMFs such as nuts [3, 4, 5], spices [6], peanut butter [7], pet food [8], and cereals [9]. The presence of *Salmonella* in LMFs (particularly flours) poses a significant hazard, increasing the need for enhanced preventive measures to minimize or eliminate outbreaks [10, 17, 18, 22, 40]. Hence, *Salmonella* presents a growing concern within LMFs, evident from various recalls and outbreaks. Typically, the thermal resistance of microorganisms specific to the product formulation is considered to guide the industrial pasteurization protocols when developing industrial isothermal processes [11]. Although food processing environments generally exclude pathogens, innovative food safety approaches

may still necessitate microbial validation. Therefore, a surrogate has been identified as a non-pathogenic organism used to simulate the behavior of a pathogen under specific conditions. For example, *Enterococcus faecium* NRRL B-2354 (*E. faecium*) is often considered as a surrogate for *Salmonella* in thermal studies due to its similar heat resistance properties in LMFs [12]. This surrogate has been instrumental in validation studies for various food processing technologies used with LMFs, including extrusion [14], moist-air convection heating [15], infrared pasteurization [16], and radio frequency heating [17, 18]. This study examines the isothermal inactivation of *S. enteritidis* PT30 and the use of *E. faecium* as a surrogate in oat flour for process validation.

## MATERIAL AND METHOD

Oat flour (OF) samples with a 10.3 % w.b. moisture content, as indicated on the package, were obtained commercially from a local store in Nottingham, UK. Water activity ( $a_w$ , 25°C) was measured by using a  $a_w$  meter (Decagon Devices, Pullman, WA).

### Bacterial inoculation of oat flour

*S. Enteritidis* PT30 and *E. faecium* were grown in TSB (9 ml) (Tryptic Soy Broth) (BD, Sparks, MD, USA) extracted with 0.6% (w/v) yeast for 24 h at 37°C. Subsequently, the culture (1 ml) was evenly spread on TSA (Tryptic Soy Agar) (BD, USA) plates. The lawn of both microorganisms formed on TSA was then collected into 20 ml (0.1% PW (Peptone water)) (BD, USA) and centrifuged at 2600 g for 30 min as explained in [19]. After removing the supernatant, the resuspended pellet in 4 ml (0.1% PW) was used to inoculate OF sample by following the method described by [19]. The concentrated pellet (1 ml) of *S. Enteritidis* PT30 or *E. faecium* was added to 10 g of OF in a sterile bag and mixed thoroughly until a homogeneous mixture was achieved. Then, 10 g of the inoculated OF were used to uniformly inoculate 90 g of OF which was then homogenized using a mini stomacher (Norfolk, UK) for 5 min at 260 rpm. To avoid the impact of  $a_w$  on the thermal tolerance of both microorganisms in OF, samples were spread on the trays and then placed in a humidity controller (SP Industries, PA, USA) for up to 3 days to achieve the target  $a_w$  level of 0.4 at 25°C.

### Isothermal treatment

The inoculated samples ( $1 \pm 0.1$  g), sealed in sterile plastic bags, were arranged in a holder and completely submerged in a heating bath (Fisher Scientific, Newington, USA) set at 75, 80, and 85°C. The duration to achieve the process temperature, approximately 6 s, was not considered as a factor in the reduction of the total bacterial count due to high thermal resistance and long heating time as reported by [20]. Samples were removed from the water bath at various time intervals,

up to 120 min based on the specific process conditions. After heating, the samples were quickly placed in an iced bath. Each experiment was performed at least three times on different dates to ensure the reproducibility and accuracy of the results.

### Enumeration of microbial survival

Following the heat treatment, each sample, including both treated and control groups, was aseptically opened and transferred into stomacher bags. Control samples were utilized to verify the inoculation level of each microorganism in OF prior to thermal treatment. They were subsequently diluted using 0.1% PW at a 1:10 ratio. Initially, the heated OF were homogenized using a stomacher for up to 5 min at 260 rpm, as described in [21]. To enumerate the survival of *Salmonella Enteritidis* PT30 and *E. faecium* in OF, the dilutions were transferred on mTSA and eTSA, respectively, as described in [19, 22]. The composition of modified mTSA and eTSA were listed in [18, 19]. The plates were stored aerobically for up to 24-48 h at 37°C h, followed by enumeration of colonies and conversion of populations to log CFU/g. The final concentration of *S. Enteritidis* PT30 and *E. faecium* in OF (control) was determined to be approximately  $10^{8-9}$  CFU/g. No bacterial growth of *Salmonella* and *E. faecium* was observed in un-inoculated OF using the same plating technique used in this study. Hence, the natural microflora was not considered. Log reductions were determined by comparing the initial population to the survivor counts after thermal treatment.

### Modeling inactivation kinetics

The isothermal kinetics of both microorganisms were described using following primary models below [23],

The first-order kinetic (Eq. 1):

$$\log\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\frac{t}{D} \quad \text{Eq. 1}$$

Weibull (Eq. 2):

$$\log\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\left[\frac{t}{\delta}\right]^\alpha \quad \text{Eq. 2}$$

$N$  and  $N_0$  represent the bacterial count (CFU/g) at times ( $t$ ) and 0, respectively;  $t$  represents the duration of the thermal process (min) after come-up time (CUT), and  $D$  is the required time (min) to achieve one log (10-fold) reduction in microbial population at a specific temperature (°C);  $\delta$  indicates the steepness of the inactivation curve of bacterial population;  $\alpha$  refers the shape of the curve, being linear ( $\alpha=1$ ) or nonlinear ( $\alpha \neq 1$ ) with decreasing ( $\alpha < 1$ ) or increasing ( $\alpha > 1$ ) inactivation rate over time [19].

The survival data were applied to both models to describe the model fitness using the root mean square error (RMSE) (Eq. 3) (log CFU/g) [24].

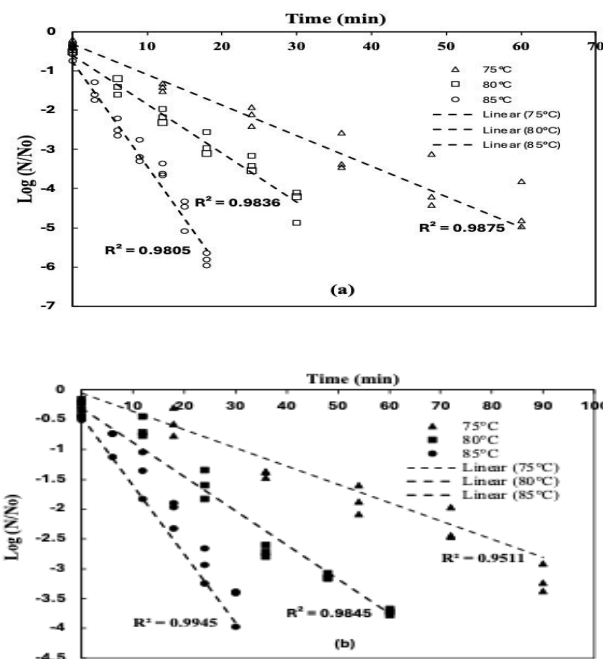
$$RSME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\log(N/N_0)_{data,i} - \log(N/N_0)_{model,i})^2}{n-p}}$$

$\log(N/N_0)_{data,i}$  is observed log reductions, and  $\log(N/N_0)_{model,i}$  is the estimation of log reductions.  $n$  represents the count of observations, and  $p$  denotes model parameters. RMSE was calculated by using three independent replicates. The Integrated Pathogen Modeling Program (IPMP) [25] was employed to evaluate model's fitness and directly provide RMSE. The differences in  $D$ -values in each sample heated at different temperatures were analyzed using ANOVA (Minitab Inc., State College, PA). The log of  $D$ -values is plotted against heating temperature, which is commonly referred to as the isothermal death time when the log-linear model appropriately shows survival curves. The slope of the obtained curves ( $-1/z$ ) is where ( $z$ ) represents the change in process temperature required to shift a one-log cycle in the  $D$ -value.

## RESULTS AND DISCUSSION

### D and z- values in oat flour

The natural microbial count in OF samples was determined to be as  $2.29 \pm 0.32$  log CFU/g. This count was sufficiently low to ensure it would not affect the counts obtained during the inactivation process. Figure 1 represents the survival kinetics of both *S. Enteritidis* PT30 (a) and *E. faecium* (b) in OF at  $a_w, 25^\circ\text{C} = 0.40$ .



**Figure 1** The inactivation curves for *S. Enteritidis* PT30 (a) and *E. faecium* (b) in OF with an  $a_w$  of 0.40 at  $25^\circ\text{C}$  were determined at various temperatures. Each experiment was independently repeated three times.

The survival data for both *S. Enteritidis* PT30 and *E. faecium* aligned well with the models, showing comparable RMSE values (Table 1).

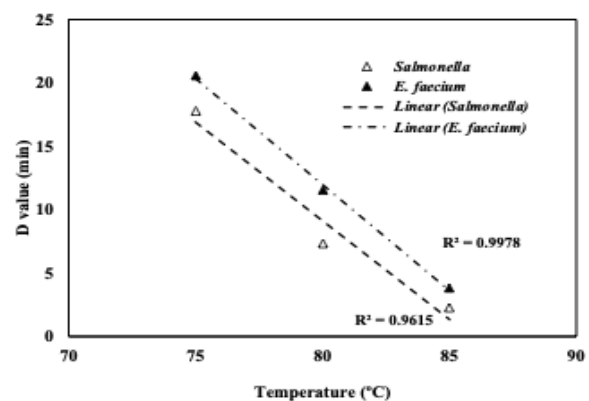
**Table 1** Estimates for the parameters of the primary models, along with RMSE values

	Linear Model			Weibull Model		RMSE (log CFU/g)
	Temperature ( $^\circ\text{C}$ )	D-value (min)	RMSE (log CFU/g)	$\delta$ (min)	$\alpha$	
<i>Salmonella</i>	75	$17.08 \pm 1.36$	0.51	$17.56 \pm 3.42$	$1.65 \pm 0.14$	0.72
	80	$7.34 \pm 0.69$	0.27	$8.27 \pm 0.64$	$0.86 \pm 0.08$	0.42
	85	$2.27 \pm 0.35$	0.21	$1.92 \pm 0.46$	$0.72 \pm 0.07$	0.33
<i>E. faecium</i>	75	$20.61 \pm 1.39$	0.32	$24.42 \pm 4.56$	$1.13 \pm 0.38$	0.52
	80	$11.56 \pm 0.96$	0.42	$10.12 \pm 0.92$	$0.64 \pm 0.26$	0.61
	85	$3.87 \pm 0.42$	0.19	$2.78 \pm 0.62$	$0.72 \pm 0.07$	0.27

\* RMSE was calculated by IPMP software using experimental observations

\* Lower RMSE signify a better model fit.

This study defined the thermal resistance of each microorganism by employing the log-linear model (Figure 2).



**Figure 2** Thermal tolerance of *Salmonella* and *E. faecium* in oat flour.

Given that the Weibull model did not significantly enhance the fitness of inactivation curves compared to the log-linear model. Thus, the thermal tolerance of both *Salmonella* and *E. faecium* was analyzed using the log-linear model. The  $D$ -values for *S. Enteritidis* PT30 in OF derived from the slopes of the trend lines at 75, 80, and  $85^\circ\text{C}$ , were  $16.08 \pm 1.36$ ,  $7.34 \pm 0.69$ , and  $2.27 \pm 0.35$  min, respectively (Figure 1). As the temperature for inactivation increased, the thermal tolerance of *Salmonella* in OF decreased accordingly. The  $D$ -values obtained for *Salmonella* in this study align with those reported in the previous studies. For example, [26] and

[27] provided  $D_{80^{\circ}\text{C}}$  values of *Salmonella* in wheat flour (WF), with equivalent  $a_w$  levels, as  $6.9 \pm 0.7$  and  $5.51 \pm 0.22$  min, respectively. Furthermore, the  $D$ -values obtained for *S. Enteritidis* PT30 in OF also aligned with those reported for organic WF which was reported as  $17.65 \pm 1.58$ ,  $7.17 \pm 0.35$ , and  $2.92 \pm 0.35$  min at  $75^{\circ}\text{C}$ ,  $80^{\circ}\text{C}$ , and  $85^{\circ}\text{C}$ , respectively [18]. The survival population of *Salmonella* in LMFs during thermal inactivation decreases as  $a_w$  decreases. Previous studies have reported similar findings on the thermal inactivation of *Salmonella* in LMFs such as spices [17], WF [18, 19], corn flour [22], pet foods [28], skim milk powder [29], and peanut paste [30]. [31] reported a similar correlation between water activity and thermal resistance for *Listeria monocytogenes* in WF. However, the specific mechanisms driving the heightened thermal tolerance of *Salmonella* in LMFs have yet to be fully understood. In addition to  $a_w$ , the thermal tolerance of bacteria is influenced by several other factors, such as bacterial strain [32], the stage of bacterial growth [33, 34], the physical structure of the food [35], fat content [36], and carbohydrates [37]. The slight variations in observed  $D$ -values can therefore be attributed to a combination of variations, such as the bacterial strain, the food matrix composition,  $a_w$ , and the physical state of the food. In this study, *E. faecium* exhibits notably greater heat resistance at the tested temperatures, showing a  $z$ -value comparable to that of *S. Enteritidis* PT30, as indicated by statistical significance ( $p < 0.05$ ). The  $D$ -values for *E. faecium* at  $75$ ,  $80$ , and  $85^{\circ}\text{C}$  were  $23.61 \pm 1.39$ ,  $11.56 \pm 0.96$ , and  $3.87 \pm 0.42$  min, respectively (Figure 1). As seen in Figure 2, the  $D$ -value of *Salmonella* decreases at a significantly higher rate with increasing the temperature as compared to those for *E. faecium*. The  $z$ -values of *S. Enteritidis* and *E. faecium* in OF were  $13.4 \pm 0.4$  and  $12.1 \pm 0.4^{\circ}\text{C}$ , respectively. The data slightly exceeded the obtained  $z$ -value of *S. Enteritidis* ( $14.8^{\circ}\text{C}$ ), which was derived from  $D$ -values in WF with an  $a_w$  of 0.43 [26]. Additionally, these values were higher than the  $z$ -value of  $12.8^{\circ}\text{C}$  for WF with a  $a_w$  of 0.45 at  $25^{\circ}\text{C}$ .

## DISCUSSION

Despite traditionally being considered safe, LMFs have been linked to several significant foodborne pathogen outbreaks. From 2006 to 2017, CDC reports documented 59 *Salmonella* outbreaks associated with a diverse range of products, including LMFs [1]. Among these outbreaks, approximately one-third were associated with LMFs [1]. Multiple *Salmonella* strains were linked to outbreaks involving flour (wheat and oat) or raw dough [1], highlighting the need to validate the thermal treatment of OF to prevent potential *Salmonella* contamination and outbreaks. Despite the roasting process involved in flour production, which includes grinding roasted grains, pathogenic bacteria such as *Salmonella* can survive. Additionally, these bacteria might be introduced during later stages, such as storage or transportation. In the current industry, after the

processes of roasting and grinding, flours do not undergo any additional heat treatment until they are incorporated as ingredients in various products [38]. To successfully create and apply accurate procedures within a risk-based safety protocol, it is essential to comprehend the thermal reduction of *Salmonella* under typical treatment conditions. Furthermore, validating *E. faecium* as a potential surrogate for the thermal treatment of OF is essential.

### *E. faecium* for process validation

FDA [10] requires food companies to establish and validate measures to reduce or manage significant risks, such as *Salmonella* in various LMFs [10]. *E. faecium* is frequently utilized as a substitute for *Salmonella* in thermal validation studies for LMFs because of its non-pathogenic nature and higher tolerance to heat and acid [39]. *E. faecium* exhibits greater heat tolerance than *Salmonella* during the thermal processing of different LMFs. This includes extrusion processing of carbohydrate-protein meals [14], thermal heating of low- $a_w$  pet food [28], radio-frequency processing of WF [18], spices [17, 22], and peanut paste [30]. *E. faecium* consistently exhibited higher  $D$ -values than *Salmonella* at all tested temperatures in OF. The  $D$ -value ratios between *E. faecium* and *Salmonella* varied from 1.3 to 1.4, indicating that *E. faecium* is an appropriate to be used instead of *Salmonella* during the thermal treatment of OF at  $a_w = 0.40$ . However, as indicated in previous studies, *E. faecium* may not be a representative microorganism to validate the thermal process across varying  $a_w$  levels or temperature conditions in the same food matrix [19]. [40] observed that increasing the initial  $a_w$  to 0.45 resulted in *Salmonella* exhibiting greater heat resistance compared to *E. faecium* at all tested temperatures in cocoa powder, with the  $D$ -value ratios of *E. faecium* to *S. Enteritidis* PT30 ranging from 0.67 to 0.81. This suggests that *E. faecium* might not be a suitable substitute for *Salmonella* as  $a_w$  in cocoa powder exceeds a specific level. In a confectionery formulation with a  $a_w$  of 0.57, the  $D_{80^{\circ}\text{C}}$  of *Salmonella* were higher than the reported values for *E. faecium* in cocoa powder [41]. In this research, the  $\log_{10}$   $D$ -values plotted contrary process temperature revealed that the curves for *S. Enteritidis* PT30 and *E. faecium* intersected at around  $75$ ,  $80$ , and  $85^{\circ}\text{C}$  at  $a_w = 0.40$ , indicating the temperatures at which the appropriateness of *E. faecium* as a surrogate changes. To enhance and confirm the accuracy of thermal processing, additional research is required to verify the feasibility of *E. faecium* as a potential surrogate for *Salmonella* in OF.

## CONCLUSION

The thermal reduction of *Salmonella* and *E. faecium* in oat flour was defined by employing the log-linear model. The findings from this study indicated that *E. faecium* exhibited significantly higher thermal resistance in OF with  $a_w, 25^{\circ}\text{C}=0.40$  as compared to



*Salmonella*. This study can further help the LMF industry develop thermal processes to improve the safety of oat flour. Furthermore, the industry might use *E. faecium* as a conservative surrogate for process validation of *Salmonella*, given its greater thermal resistance.

## ACKNOWLEDGMENT

The author would like to thank the Department of Food Engineering, Gümüşhane University, for their support and resources

## REFERENCES

- [1] Centers for Disease Control (CDC), 2023. Multistate *Salmonella* outbreak linked to flour. <https://www.cdc.gov/salmonella/infantis-03-23/index.html>
- [2] Blessington, T., Theofel, C. G., & Harris, L. J. (2013). A dry-inoculation method for nut kernels. *Food Microbiology*, 33(2), 292–297. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2012.09>
- [3] Centers for Disease Control and Prevention (CDC), 2016. Multistate outbreak of *Salmonella* Montevideo and *Salmonella* Senftenberg infections linked to Wonderful Pistachios (final update). <https://www.cdc.gov/salmonella/montevideo-03-16/index.html>.
- [4] Centers for Disease Control and Prevention (CDC), 2014. Multistate outbreak of human *Salmonella* Enteritidis infections linked to Turkish pine nuts (Final update). <https://www.cdc.gov/salmonella/2011/pine-nuts-11-17-2011.html>.
- [5] Centers for Disease Control and Prevention (CDC), 2009a. Multistate outbreak of *Salmonella* infections linked to pistachio nuts (Final Update). <https://www.cdc.gov/salmonella/2009/pistachio-nuts-4-14-2009.html>
- [6] Centers for Disease Control and Prevention (CDC), 2010. Multistate outbreak of human *Salmonella* Montevideo infections (final update). <https://www.cdc.gov/mmwr/preview/mmwrhtml/mm5950a3.htm>
- [7] Centers for Disease Control and Prevention (CDC), 2009b. Multistate outbreak of *Salmonella* Typhimurium infections linked to peanut butter, 2008-2009 (final update). <https://www.cdc.gov/salmonella/2009/peanut-butter-2008-2009.html>.
- [8] Centers for Disease Control and Prevention (CDC), 2008a. Multistate outbreak of human *Salmonella* infections caused by contaminated dry dog food—United States, 2006- 2007. *MMWR Morbidity and Mortality Weekly Report* , 57, 521–524.
- [9] Centers for Disease Control and Prevention (CDC), 2008b. Multistate outbreak of *Salmonella* agona infections linked to rice and wheat puff cereal (final update). <http://www.cdc.gov/salmonella/2008/rice-wheat-puff-cereal-5-13-2008.html>.
- [10] Food and Drug Administration, 2015. Analysis and Evaluation of Preventive Control Measures for the Control and Reduction/elimination of Microbial Hazards on Fresh and Fresh-cut Produce: Chapter VII. The Use of Indicators and Surrogate Microorganisms for the Evaluation of Pathogens in Fresh and Fresh-cut Produce.
- [11] Awuah, G. B., Ramaswamy, H. S., & Economides, A. (2007). Thermal processing and quality: Principles and overview. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 46(6), 584-602.
- [12] Food and Drug Administration, 2015b. Food Safety Modernization Act (FSMA) Final Rule for Preventive Controls for Human Food.
- [13] ABC, 2014. Guidelines for Using *Enterococcus Faecium* NRRL B-2354 as a Surrogate Microorganism in Almond Process Validation.
- [14] Bianchini, A., Stratton, J., Weier, S., Hartter, T., Plattner, B., Rokey, G., et al. (2012). Validation of extrusion as a killing step for *Enterococcus faecium* in a balanced carbohydrate-protein meal by using a response surface design. *Journal of Food Protection*, 75(9), 1646–1653. <https://doi.org/10.4315/0362-028x.jfp-12-085>.
- [15] Jeong, S., Marks, B. P., & Ryser, E. T. (2011). Quantifying the performance of *Pediococcus* sp.(NRRL B-2354: *Enterococcus faecium*) as a nonpathogenic surrogate for *Salmonella* Enteritidis PT30 during moist-air convection heating of almonds. *Journal of Food protection*, 74(4), 603-609.
- [16] Bingol, G., Yang, J. H., Brandl, M. T., Pan, Z. L., Wang, H., & McHugh, T. H. (2011). Infrared pasteurization of raw almonds. *Journal of Food Engineering*, 104(3), 387–393. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.12.034>
- [17] Ozturk, S., Kong, F., & Singh, R. K. (2020). Evaluation of *Enterococcus faecium* NRRL B-2354 as a potential surrogate of *Salmonella* in packaged paprika, white pepper and cumin powder during radio frequency heating. *Food Control*, 108, 106833.
- [18] Liu, S., Rojas, R.V., Gray, P., Yang, R., Zhu, M.J., Tang, J., 2018a. *Enterococcus faecium* as a *Salmonella* surrogate in the thermal processing of wheat flour: influence of water activity at high temperatures. *Food Microbiology*. 74, 92–99.
- [19] Liu, S.X., Ozturk, S., Xu, J., Kong, F.B., Gray, P., Zhu, M.J., Sablani, S.S., Tang, J.M., 2018b. Microbial validation of radio frequency pasteurization of wheat flour by inoculated pack studies. *Journal of Food Engineering*, 217, 68–74.
- [20] Li, C., Huang, L., & Chen, J. (2014). Comparative study of thermal inactivation kinetics of 403 *Salmonella* spp. in peanut butter and peanut butter spread. *Food Control*, 45, 143-149. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.04.028>
- [21] Harris, L. J., Uesugi, A. R., Abd, S. J., & McCarthy, K. L. (2012). Survival of *Salmonella* Enteritidis PT 30 on inoculated almond kernels in hot water treatments. *Food Research International*, 45(2), 1093–1098. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.03.048>.
- [22] Ozturk, S., Liu, S., Xu, J., Tang, J., Chen, J., Singh, R. K., & Kong, F. (2019). Inactivation of *Salmonella* Enteritidis and *Enterococcus faecium* NRRL B-2354 in corn flour by radio frequency heating with subsequent freezing. *Lwt*, 111, 782-789.
- [23] Peleg, M., 2006. *Advanced Quantitative Microbiology for Foods and Biosystems: Models for Predicting Growth and Inactivation*. CRC Press.
- [24] Motulsky, H., & Cristopoulos, A. (2004). *Fitting models to biological data using linear and nonlinear regression: A practical guide to curve fitting*. Oxford University Press.
- [25] Huang, L. (2017). IPMP Global Fit - A one-step direct data analysis tool for predictive 392 microbiology. *International Journal of Food Microbiology*, 262, 38–48. 393 <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2017.09.010>



- [26] Smith, D.F., 2014. Modeling the Effect of Water Activity on Thermal Resistance of *Salmonella* in Wheat Flour. Michigan State University.
- [27] Syamaladevi, R.M., et al., 2016. Water activity change at elevated temperatures and thermal resistance of *Salmonella* in all-purpose wheat flour and peanut butter. *Food Research International*, 81, 163e170.
- [28] Ceylan, E., Bautista, D.A., 2015. Evaluating *Pediococcus acidilactici* and *Enterococcus faecium* NRRL B-2354 as thermal surrogate microorganisms for *Salmonella* for in-plant validation studies of low-moisture pet food products. *Journal of Food Protection*, 78, 934–939.
- [29] Laroche, C., Fine, F., Gervais, P., 2005. Water activity affects heat resistance of microorganisms in food powders. *International Journal of Food Microbiology*, 97, 307–315.
- [30] Kataoka, A., Enache, E., Black, D.G., Elliott, P.H., Napier, C.D., Podolak, R., Hayman, M.M., 2014. Survival of *Salmonella* Tennessee, *Salmonella* Typhimurium DT104, and *Enterococcus faecium* in peanut paste formulations at two different levels of water activity and fat. *Journal of Food Protection*, 77, 1252–1259.
- [31] Taylor, M. H., Tsai, H. C., Rasco, B., Tang, J., & Zhu, M. J. (2018). Stability of *Listeria monocytogenes* in wheat flour during extended storage and isothermal treatment. *Food Control*, 91, 434-439.
- [32] Goepfert, J.M., Biggie, R.A., 1968. Heat resistance of *Salmonella* Typhimurium and *Salmonella* Senftenberg 775W in milk chocolate. *Applied Microbiology*, 16, 1939–1940.
- [33] Ng, H., Bayne, H.G., Garibaldi, J.A., 1969. Heat resistance of *Salmonella*: the uniqueness of *Salmonella* senftenberg 775W. *Applied Microbiology*, 17, 78–82.
- [34] Rolfe, M.D., Rice, C.J., Lucchini, S., Pin, C., Thompson, A., Cameron, A.D.S., Alston, M., Stringer, M.F., Betts, R.P., Baranyi, J., Peck, M.W., Hinton, J.C.D., 2012. Lag phase is a distinct growth phase that prepares bacteria for exponential growth and involves transient metal accumulation. *International Journal of Bacteriology*, 194, 686–701.
- [35] Mogollon, M.A., Marks, B.P., Booren, A.M., Orta-Ramirez, A., Ryser, E.T., 2009. Effect of beef product physical structure on *Salmonella* thermal inactivation. *Journal of Food Science*, 74, M347–M351.
- [36] Juneja, V.K., Eblen, B.S., 2000. Heat inactivation of *Salmonella* Typhimurium DT104 in beef as affected by fat content. *Letters in Applied Microbiology*, 30, 461–467.
- [37] He, Y., Li, Y., Salazar, J.K., Yang, J., Tortorello, M.L., Zhang, W., 2013. Increased water activity reduces the thermal resistance of *Salmonella* enterica in peanut butter. *Applied and Environmental Microbiology*, 79, 4763–4767.
- [38] Lima, L.J., van der Velpen, V., Wolkers-Rooijackers, J., Kamphuis, H.J., Zwietering, M.H., Nout, M.J., 2012. Microbiota dynamics and diversity at different stages of industrial processing of cocoa beans into cocoa powder. *Applied and Environmental Microbiology*, 78, 2904–2913.
- [39] Kopit, L.M., Kim, E.B., Siezen, R.J., Harris, L.J., Marco, M.L., 2014. Safety of the surrogate microorganism *Enterococcus faecium* NRRL B-2354 for Use in thermal process validation. *Journal of Applied & Environmental Microbiology*, 80, 1899–1909.
- [40] Tsai, H. C., Ballom, K. F., Xia, S., Tang, J., Marks, B. P., & Zhu, M. J. (2019). Evaluation of *Enterococcus faecium* NRRL B-2354 as a surrogate for *Salmonella* during cocoa powder thermal processing. *Food Microbiology*, 82, 135-141.
- [41] Rachon, G., Penaloza, W., Gibbs, P.A., 2016. Inactivation of *Salmonella*, *Listeria monocytogenes* and *Enterococcus faecium* NRRL B-2354 in a selection of low moisture foods. *International Journal of Food Microbiology*, 231, 16–25.



## Phenolic Compound Analysis and Antioxidant Properties of *O. Alborosea*

Kader ERİM<sup>1</sup>, Ahmet SAVCI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Moleküler Biyoloji ve Genetik Bölümü, Fen-Edebiyat Fakültesi, Muş Alparslan Üniversitesi, Muş, Türkiye

✉: [a.savci@alparslan.edu.tr](mailto:a.savci@alparslan.edu.tr)  <sup>1</sup> 0009-0004-8649-1409  <sup>2</sup> 0000-0002-9609-785X

Received (Geliş): 01.08.2024

Revision (Düzeltilme): 04.10.2024

Accepted (Kabul): 18.10.2024

### ABSTRACT

The *Onosma* genus has been used as a treatment among the public for a long time. In this study, the content analysis and some biological activities of the plant *O. Alborosea* Fisch. & C.A.Mey. ssp. (*O. alborosea*) used in traditional medicine in our country were investigated. For this purpose, methanol and water extracts of the plant were taken, and the total phenolic substance amount of each extract was determined by HPLC device. FRAP, CUPRAC reduction methods, DPPH, and ABTS radical scavenging methods were used to determine antioxidant activities. According to the results of our study, water and methanol extracts showed lower activity than standard antioxidants. It can be said that the reason for this is related to the ratio of the phenolic amount they contain. Since no antioxidant studies were found when the literature search related to the current plant species was conducted, it is thought that our study will guide other studies to be carried out with this plant species and is important in terms of protecting our plants, which are our genetic treasure, and transferring them to future generations.

**Keywords:** Antioxidant, Free Radical, Muş, Phenolic Substance, *O. Alborosea*.

### *O. Alborosea* Bitkisinin Fenolik Bileşen Analizi ve Antioksidan Özellikleri

#### ÖZET

*Onosma* bitkisi uzun uzun zamandan beri halk arasında tedavi edici olarak kullanılmaktadır. Çalışmamızda ülkemizde geleneksel tıpta kullanılan *O. Alborosea* Fisch. & C.A.Mey. ssp.'nin (*O. alborosea*) bitkisinin içerik analizi ve bazı biyolojik aktiviteleri araştırıldı. Bu amaçla, bitkinin metanol ve su ekstraktları alınarak, her bir ekstraktın toplam fenolik madde miktarı HPLC cihazı aracılığıyla belirlendi. Antioksidan aktivitelerini belirlemek için FRAP, CUPRAC indirgeme yöntemleri ile DPPH, ABTS radikali süpürme yöntemleri kullanıldı. Çalışmamızın sonuçlarına göre, su ve metanol ekstraktlarının standart antioksidanlara göre daha düşük aktivite gösterdikleri tespit edildi. Bunun sebebinin, içerdikleri fenolik miktarının oranıyla ilişkili olduğu söylenebilir. Mevcut bitki türüyle alakalı literatür taraması yapıldığında özellikle antioksidan çalışmalara rastlanmadığından çalışmamızın bu bitki türü ile yapılacak başka çalışmalara rehberlik edeceği, genetik hazinemiz olan bitkilerimizin korunması ve nesillere aktarılması açısından önem arz ettiği düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Antioksidan, Fenolik Madde, Muş, *O. Alborosea*, Serbest Radikal.

#### INTRODUCTION

Oxidative stress caused by excessive accumulation of free radicals causes various diseases in the body. Therefore, antioxidants play a vital role in eliminating oxidative stress and restoring the balance [1, 2]. In addition to enzymes, hormones and metabolites in the body, dietary antioxidants are important compounds in establishing this balance. Due to the side effects of synthetic antioxidants, plants are preferred by researchers for antioxidant defense. The presence of secondary compounds such as natural phenolic compounds, flavonoids, terpenes, and organic acids in plants is the main reason for these preferences [3, 4, 5].

The largest member of the Boraginaceae family, which includes important genera, is *Onosma* L. There are more than 100 species of this genus in Turkey and about half of them are endemic [5]. It has been reported that

*Onosma* genus, which is used for medicinal purposes among people, is preferred in the treatment of abdominal pain, wound healing, fever and burns [6, 7]. This plant genus, which is also used for food purposes, has also been used in food coloring and PCR analyses [8, 9, 10]. This plant, which has versatile benefits, has also attracted great interest by researchers. As a result of the studies, it was reported that this plant genus is antioxidant, antibacterial, anticancer, anti-inflammatory and wound healing [10]. *O. Alborosea*, described by the Russian botanist Friedrich Ernst Ludwig Fischer and the German-born Russian botanist Carl Anton von Meyer, is known as a rock sucker in Turkey [11]. It is distributed in rocky areas and can be distinguished by different color transformations in its flowers.

In this study, phenolic components of methanol and water extracts of *O. Alborosea* species collected in Muş province were determined by HPLC. Ferrous ion

reducing power (FRAP), cupric ion reducing power (CUPRAC), 1,1-Diphenyl 2-picryl hydrazyl (DPPH) radical scavenging and 2,2'-azinobis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulphonic acid (ABTS) radical scavenging methods were used to determine the antioxidant capacity of the extracts. Butylated hydroxyanisole (BHA), butylated hydroxytoluene (BHT) and ascorbic acid (AA) were preferred as standard antioxidants in antioxidant studies. Working with different extracts of the plant contributes to the richness of the research. However, since we did not have enough plant tissue, we preferred to work with only methanol and water extracts of the plant. Since no antioxidant studies were found in the literature on the present plant species, it is thought that this study is important in terms of guiding future studies and protecting our plants, which are our genetic treasure, and transferring them to generations.

## MATERIAL and METHOD

### Plant Collection And Species Identification

*O. Alborosea* was collected in East Anatolia, Muş, Çavuş Mountain (38° 44' 17- 41° 29' 29), and the species was determined by Murat Aydın ŞANDA of the Molecular Biology and Genetics Department of Muş Alparslan University. The chemical processes were carried out in the laboratories of Muş Alparslan University.

### Preparation of Extracts

The plants were collected during the growing season and dried. After species identification, the water and methanol extracts of the plant were obtained using a Soxhlet apparatus. For the extracts, about 50 g of plant samples were dissolved in 300 mL of methanol and water, respectively. The extracts were filtered and lyophilized in the laboratories of the Molecular Biology and Genetics Department of Muş Alparslan University.

### Phenolic Compound Analysis by HPLC

17 different standards (ascorbic acid, myricetin, quercetin, apigenin, abscisic acid, kaempferol, curcumin, catechol, vanillin, rosmarinic acid, caffeic acid, gallic acid, 4-hydroxybenzoic acid, cinnamic acid, 3,4-dihydroxybenzoic acid, salicylic acid and trans-p-coumaric acid) were weighed to a total concentration of 10 mg/ml and placed in 50 ml volumetric flasks. Then 1% acetic acid and acetonitrile (1/9) were mixed and added to the standards, followed by the addition of methanol in the same ratio to prepare the stock solution necessary to dissolve the standards. After dilution of the stock solutions, the concentration of the extracts was diluted to 20 mg/ml using the stock solution used in the standard. Finally, the filtered extracts were injected into the HPLC [12]. HPLC analysis was performed by using the Agilent Technologies 1260 Infinity II HPLC (Agilent, USA). The HPLC configuration consisted of a 1260 DAD WR detector (272 nm, 280 nm and 310 nm

wavelength), 1260 Quat Pump VL pump (1.0 mL/min flow rate), 1260 Vial sampler (20 µL injected) and G7130A column furnace (28°C). The analytical column used for the analysis was ACE 5 C18 (250 x 4.6 mm id).

## Antioxidant Assays

### Reducing Power of Fe<sup>+3</sup> Ions

The reducing power of Fe<sup>+3</sup> ions to Fe<sup>+2</sup> ions was determined by Oyaizu method [13]. The volume of the samples (25, 50 and 100 µg/ml) taken in tubes was completed to 200 µl with distilled water. After adding 500 µl each of buffer solution (pH: 6.6) and K<sub>3</sub>Fe(CN)<sub>6</sub> to each tube, it was incubated for twenty minutes (50 °C). Then 500 µl of trichloroacetic acid (TCA) was added to the mixture. After centrifugation, 500 µl of the supernatant was taken and the same amount of distilled water and 100 µl of FeCl<sub>3</sub> were added. Absorbances were measured at 700 nm in a micro-volume spectrophotometer.

### Cu<sup>+2</sup> Ions Reduction Power By CUPRAC Method

After taking different concentrations of extracts and standards into test tubes, their total volumes were made up to 1 ml with distilled water. 0.25 ml each of CuCl<sub>2</sub>, ethanolic neocuprin and acetate buffer were added. After thirty minutes of incubation, the absorbance values of the samples at 450 nm were recorded [14].

### DPPH Radical Scavenging Assay

Ethanol was added to the extracts (25 µg/µl, 50 µg/µl and 100 µg/µl) in test tubes to a final volume of 600 µl. After 200 µL of DPPH solution was added, the reaction was allowed to incubate for about 30 minutes to complete the reaction. Absorbance values at 517 nm were measured with the help of a spectrophotometer [15]. Radical scavenging activities of the extracts were calculated according to the following equation.

DPPH radical scavenging activity (%): (Ac-As/Ac)\*100

Ac: Absorbance value of control, As: Absorbance value of samples.

### ABTS Radical Scavenging Assay

ABTS solution was diluted with phosphate buffer until the absorbance of the solution reached 0.750 ± 0.025 at 734 nm. After the total volume of the samples was made up to 200 ml with water, 1 mL of ABTS<sup>+</sup> the solution was added. After 30 minutes of incubation, the absorbance values of the extracts were measured at 734 nm [16]. Radical scavenging activities of the extracts were calculated according to the following equation.

ABTS radical scavenging activity (%): (Ac-As/Ac)\*100

## RESULTS and DISCUSSION

### Phenolic Substance Analysis

The phenolic compound composition of *O. alborosea* analyzed by HPLC was evaluated with phenolics introduced as standards. The results showed that the water and methanol extracts of the plant were poor in

terms of phenolic content, but the total phenolic content of both extracts was similar (Table 1). According to the results, ascorbic acid (3.15 ng/μL) and catechol (2.24 ng/μL) were found in the water extract, while quercetin (3.21 ng/μL), cinnamic acid (0.99 ng/μL) and ascorbic acid (0.69 ng/μL) were found in the methanol extract.

**Table 1.** Phenolic content of water and methanol extracts of *O. alborosea* (ng/μL)

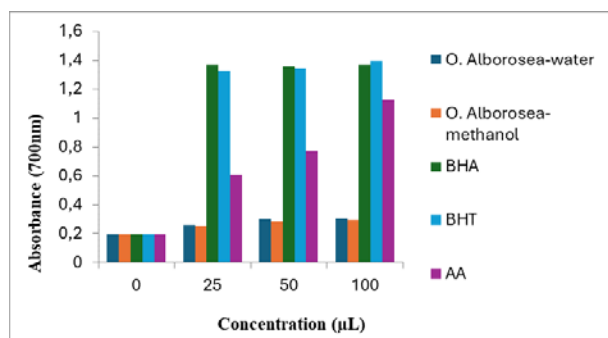
Phenolics	<i>O. alborosea</i> -water	<i>O. alborosea</i> -methanol
Ascorbic acid	3,15041±0.24	0,69218±0.06
Gallic acid	-	-
3, 4-dihydroxybenzoic acid	-	-
4- hydroxybenzoic acid	-	-
Trans-p coumaric acid	-	-
Myricetin	-	-
Abscisic acid	-	-
Quercetin	-	3,21354±0.26
Apigenin	-	-
Kaemferol	-	-
Curcumin	-	-
Catechol	2,24031±0.11	-
Vanillin	-	-
Caffeic acid	-	-
Cinnamic acid	-	0,99032±0.07
Rosemarinic acid	-	-
Salicylic acid	-	-

In the literature review, it was observed that *Onosma* genus contains various bioactive components such as phenolics, flavonoids, terpenes, and alkaloids. *Wazir et al.* found that the crude extract of *O. hispidum* was particularly rich in alkaloids, flavonoids, glycosides and phenols [17]. *Saravanakumar et al.* reported that the extracts of *O. bracteosa* and *O. isaurica* were very rich in phenolics and flavonoids. *O. bracteosa* species contains 2,5-dihydroxybenzoic acid, gallic acid, protocatechuic acid, 3,4-dihydroxyphenylacetic acid, chlorogenic acid, 4 hydroxybenzoic acid, vanillic acid, syringic acid, 3-hydroxybenzoic acid, vanillin, p-coumaric acid, ferulic acid, luteolin 7-glucoside, hesperidin, hyperoside, apigenin 7-glucoside, pinoresinol, eriodictyol and quercetin compounds were found in *O. isaurica*. Caffeic acid, sinapic acid and rosmarinic acid were higher in *O. isaurica*, while caffeic acid, sinapic acid and rosmarinic acid were higher in *O. isaurica* [18]. In another study, total phenolic and flavonoid analyses of *O. gracilis* and *O. oreodoxa* extracts showed that *O. oreodoxa* extract had richer phenol and flavonoid content than *O. gracilis* extract [19]. *Kirkan et al.* found that *Onosma trapezuntea* extract contained higher total phenolics (24.08 mg GAE/g extract) and flavonoids (14.51 mg QE/g) compared to *O. rigidum* (10.63 mg GAE/g and 7.42 mg QE/g). Total flavonoid levels constituted more than 50%

of total phenolics in both species [10]. When the results of this study are compared with the studies in the literature, there are differences in the content and amounts of phenolic compounds. This may be due to different species, geographical differences, climate change, methods used and the use of different solvents.

### Antioxidant Activities

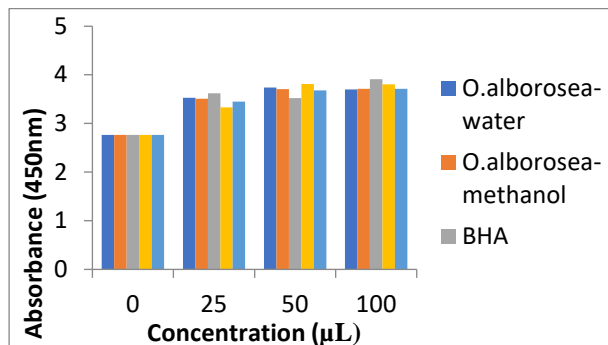
Ferrous ions (Fe<sup>+3</sup>) reduction analysis (FRAP) can be defined as an electron transfer. When the FRAP results of the study were evaluated, it was observed that the Fe<sup>+3</sup> ion reduction capacities of the extracts generally increased with the increase in concentration (**Figure 1**). While water extract showed better performance than methanol extract, BHT, BHA and AA standard antioxidants showed the strongest effect, respectively. Excess iron, one of the most important metals for the organism, can cause several undesirable side effects. Excess Fe<sup>+2</sup> ions in the environment can be converted to hydroxyl radical, a very dangerous free radical, by the Fenton reaction [20]. Therefore, FRAP is one of the most preferred methods for researchers. In our research, we found that studies on the reducing power of the genus *Onosma* were quite limited. *Saravanakumar et al.* found that the activities of *O. isaurica* and *O. bracteosa* extracts were equivalent to 85.76 ± 4.34 mg and 88.98 ± 6.62 mg trolox acid, respectively, according to FRAP results [18].



**Figure 1.** Comparison of ferrous ion reducing capacity of water and methanol extracts of *O. alborosea* with standard antioxidants (BHA, BHT and AA)

In one study, *O. Trapezuntea* was reported to have a stronger reducing capacity than *O. Rigidum* [10], while in another study [21] *O. Sericea* was reported to be a stronger reductant than *O. Stenoloba*. When the studies were evaluated in general, it was reported that species rich in secondary compounds showed stronger performance.

The results of CUPRAC assay showed that water and methanol extracts had activities close to each other and standard antioxidants. It was also found that the reducing power of the extracts and standard antioxidants increased with the increase in concentration (**Figure 2**).

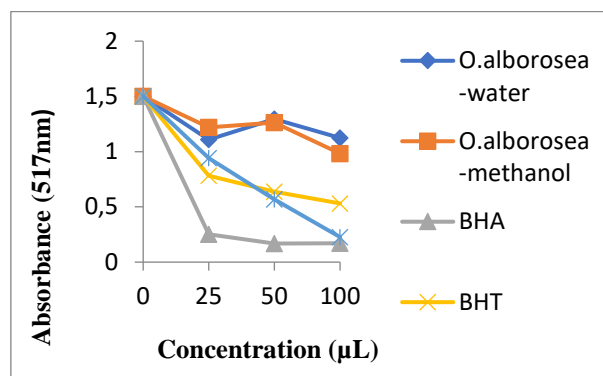


**Figure 2.** Comparison of cupric ion reducing capacity of water and methanol extracts of *O. alborosea* with standard antioxidants (BHA, BHT and AA)

In the literature, it has been reported that the species-rich in phenolic and flavonoids have stronger performance in studies on the CUPRAC method of *Onosma* genus [10, 21, 22]. This evaluation is consistent with the results of our study.

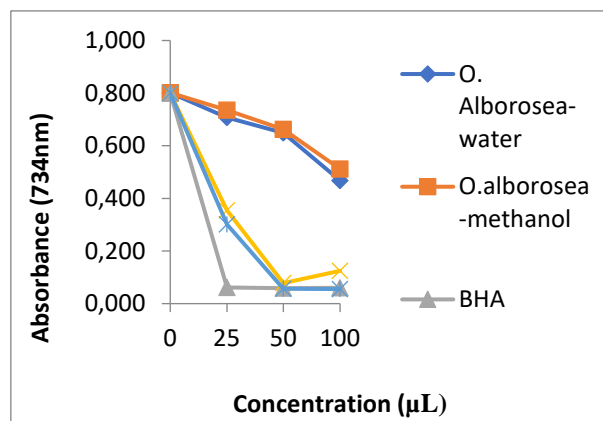
DPPH and ABTS methods were preferred for the radical scavenging activities of the study. These methods are the most preferred methods by researchers because they are cheap, fast and reliable [23, 24]. According to the results of DPPH radical scavenging activity, BHA showed the highest activity while water extract showed the lowest activity. The activity of the extracts and standard antioxidants generally increased with increasing concentration (Figure 5). At the highest concentration (100 µg/mL), the activities of the samples were in the

following order: BHA (88.57%) > BHT (84.89%) > AA (64.61%) > Methanol extract (34.50%) > Water extract (25.08%).



**Figure 3.** DPPH radical scavenging activity results of extracts and standard antioxidants

According to the ABTS results of the study, AA showed the highest activity while methanol extract showed the lowest activity. The activity of the extracts and standard antioxidants generally increased with increasing concentration (Figure 4). At the highest concentration (100 µg/mL), the activities of the samples were in the following order: AA (93.10%) > BHA (92.50%) > BHT (84.52%) > Water extract (41.62%) > Methanol extract (36.14%).



**Figure 4.** ABTS radical scavenging activity results of extracts and standard antioxidants

According to the study by Özer *et al.*, water extract of *O. heterophyllum* scavenged DPPH radicals most strongly. This was followed by methanol and ethyl acetate, respectively. It was also observed that all three extracts strongly scavenged ABTS radicals, while the weakest activity was observed in ethyl acetate extract [25]. Other studies have also reported that *Onosma* genus is a strong radical scavenger due to the richness of secondary compound contents [10, 19, 21, 22].

The results vary depending on the type of plant, solvent used, climatic conditions and geographical location.

## CONCLUSION

Plants rich in phenolic compounds, which are widely used for medicinal purposes, are antioxidant organisms that act as electron donors to scavenge free radicals. In this study, water and methanol extracts of *O. alborosea* collected in Muş province were prepared after species identification. Phenolic content and quantity were determined by HPLC. Four different in vitro methods were used to determine the antioxidant capacity of the extracts. As a result of the chemical content analysis of the plant, ascorbic acid (3.15 ng/μL) and catechol (2.24 ng/μL) were found in the water extract and quercetin (3.21 ng/μL), cinnamic acid (0.99 ng/μL) and ascorbic acid (0.69 ng/μL) in the methanol extract. When the antioxidant results were evaluated, it was observed that the extracts scavenged DPPH and ABTS radicals weaker than standard antioxidants. At the same time, the extracts significantly reduced Fe<sup>+3</sup> and Cu<sup>+2</sup> ions. The activities of the samples were generally found to increase with increasing absorbance. The lack of research on the antioxidant activity of *O. alborosea* in the literature makes this study even more important. We hope that this study will shed light on future research on this species.

#### THANKS

We would like to thank Prof. Dr. Murad Aydın ŞANDA, Head of the Department of Molecular Biology and Genetics, Muş Alparslan University, for determining the species of the plant.

#### REFERENCES

- [1] Turan N., Savci A., Buldurun K. Alan Y., Adigüzel R. Synthesis and Chemical Structure Elucidation of Two Schiff Base Ligands, Their Iron(II) and Zinc(II) Complexes, and Antiradical, Antimicrobial, Antioxidant Properties, Letters in Organic Chemistry, 13:5 343-351(9), 2016.
- [2] Savcı A., Turan N., Buldurun K., Alkış M. E., Alan Y. Schiff base containing fluorouracil and its M(II) complexes: Synthesis, characterization, cytotoxic and antioxidant activities, Inorganic Chemistry Communications, 143 109780, 2022.
- [3] Elkordy A. A., Haj-Ahmad R. R., Awaad A. S., Zaki R. M. An overview on natural product drug formulations from conventional medicines to nanomedicines: Past, present and future, Journal of Drug Delivery Science and Technology, 63 102459, 2021.
- [4] Savcı A. Biological active compounds and biological activities of the foam used in the traditional kerebiç dessert, International Food Research Journal 29(5): 1067-1077, 2022.
- [5] Sarikurkcu C., Kirkan B., Ozer M. S., Ceylan O., Atilgan N., Cengiz M., Tepe B. Chemical characterization and biological activity of *Onosma gigantea* extracts, Industrial Crops and Products, 115 323-329, 2018.
- [6] Hayta S., Polat R., Selvi S. Traditional uses of medicinal plants in Elazığ (Turkey), Journal of Ethnopharmacology, 154:3 613-623, 2014.
- [7] Dalar A., Mukemre M., Unal M., Ozgokce F. Traditional medicinal plants of Ağrı Province, Turkey, Journal of Ethnopharmacology, 226 56-72, 2018.
- [8] Noula E., Samanidou V. F., Assimopoulou A. N. et al. Solid-phase extraction for purification of alkannin/shikonin samples and isolation of monomeric and dimeric fractions, Analytical and Bioanalytical Chemistry 397 2221-2232, 2010.
- [9] Zhang W. J., Su J., Tan M.Y., Liu G. L., Pang Y. J., Shen H. G., Qi J. L., Yang, Y. Expression analysis of shikonin-biosynthetic genes in response to M9 medium and light in *Lithospermum erythrorhizon* cell cultures Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 101 (2) 135-142, 2010.
- [10] Tekeli Y., Kılıç Ö., Altuner E. E. (2024). DNA Protective Assay and Some Biochemical Properties of Galium Species. Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 12(1), 24-30. <https://doi.org/10.18586/msufbd.1451599>.
- [11] Kirkan B., Sarikurkcu C., Zengin G. Bioactive constituents, antioxidant effects and enzyme inhibitory properties of two *Onosma* species (*Onosma trapezuntea* and *O. rigidum*), South African Journal of Botany, 145 142-148, 2022.
- [12] Menemen Y., Aytaç Z., Kandemir, A. Türkçe Bilimsel Bitki, Mantar, Suyosunu ve Bakteri Adları Yönergesi. Bağbahçe Bilim Dergisi, 8(3) 188-195, 2021.
- [13] Savcı A., Koçpınar E. F., Alan Y., Kurşat M. Antioxidant, antimicrobial, and DNA protection activities of some *Tanacetum* species and phenolic richness in their ethanolic extracts. International Food Research Journal. 27:1 160-170, 2020.
- [14] Oyaizu M. Studies on Products of Browning Reaction Prepared From Glucose Amin. The Japanese Journal of Nutrition and Dietetics, 44:6 307-315, 1986.
- [15] Malhi R., Singh I., Carmieli R., Savci A., Sharma R. Copper(II) complexes of fused ring selenosemicarbazones: Synthesis, structure elucidation, biological activity and molecular modeling, Polyhedron, 233 116319, 2023.
- [16] Blois M. S. Antioxidant Determinations by the Use of a Stable Free Radical, Nature, 181:4617 1199-1200, 1958.
- [17] Re R., Pellegrini N., Proteggente A., Pannala A., Yang M., Rice-Evans C. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay, Free Radical Biology and Medicine, 26:9-10 1231-1237, 1999.
- [18] Ullah Wazir N., Amir Khan I., Javed A., Khan T., Jabbar A. *Onosma hispidum* L. extract reverses hyperlipidemia, hypertension, and associated vascular dysfunction in rats, Saudi Journal of Biological Sciences, 30(8) 103712, 2023.
- [19] Saravanakumar K., Sarikurkcu C., Sarikurkcu R. T., Wang M. H., A comparative study on the phenolic composition, antioxidant and enzyme inhibition activities of two endemic *Onosma* species, Industrial Crops and Products, 142 111878, 2019.
- [20] Baltacı N., Aydogdu N., Sarikurkcu C., Tepe B. *Onosma gracilis* (Trautv.) and *O. oreodoxa* (Boiss. & Heldr.): Phytochemistry, in silico docking, antioxidant and enzyme inhibitory activities, South African Journal of Botany, 143 410-417, 2021.
- [21] Alhafez A., Savci A., Alan Y., Söylemez R., Kilic A. Preparation of Cu(II), Ni(II), Ti(IV), VO(IV), and Zn(II) metal complexes derived from novel vic-dioxime and investigation of their antioxidant and antibacterial activities, Chemistry&Biodiversity, 19:3 e202100768, 2022.
- [22] Katanić Stanković J. S., Ceylan R., Zengin G., Matić S., Jurić T., Diuzheva A., Jeko J., Cziáky Z., Aktumsek A. Multiple biological activities of two *Onosma* species (*O. sericea* and *O. stenoloba*) and HPLC-MS/MS characterization of their phytochemical composition, Industrial Crops and Products, 144 112053, 2020.
- [23] Sarikurkcu C., Sahinler S. S., Husunet M. T., Istifli E. S., Tepe B. Two endemic *Onosma* species (*O. sieheana* and *O. stenoloba*): A comparative study including docking data on biological activity and phenolic composition, Industrial Crops and Products, 154 112656, 2020.

- [24] Ain Q. U., Singh I., Carmieli R., Savci A., Paul K., Sharma R. Substituted 2,5 thiophene dicarboxaldehyde bithiosemicarbazones and their copper(II) complexes: Synthesis, structure elucidation, HSA binding, biological activities and docking studies, *Journal of Molecular Structure*, 1291 135996, 2023.
- [25] Kilic A., Savci A., Alan Y., Beyazsakal L. The synthesis of novel boronate esters and N-Heterocyclic carbene (NHC)-stabilized boronate esters: Spectroscopy, antimicrobial and antioxidant studies, *Journal of Organometallic Chemistry*, 917 121268, 2020.
- [26] Ozer M. S., Kirkan B., Sarikurkcü C., Cengiz M., Ceylan O., Atılğan N., Tepe B. *Onosma heterophyllum*: Phenolic composition, enzyme inhibitory and antioxidant activities, *Industrial Crops and Products*, 111 179-184, 2018.

# Non-Abelian Gauge Theories and Emerging Space-Time Structures: A New Approach to Quantum Gravity

Ayhan AKSAKALLI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Bayburt Üniversitesi, Bayburt, Türkiye

✉: [ayhanaksakalli@bayburt.edu.tr](mailto:ayhanaksakalli@bayburt.edu.tr)  0000-0001-6281-5828

Received (Geliş): 21.08.2024

Accepted (Kabul): 17.10.2024

## ABSTRACT

This paper examines the impact of non-Abelian gauge theories on space-time structures within the context of quantum gravity theory. The study explores the intricate effects of the non-perturbative properties of gauge fields on the topological and geometric structures of space-time, analyzing how these effects align with or differ from the current understanding of quantum gravity theory. The simulations conducted in this study visually model the dynamic effects of gauge fields on the microstructures of space-time, illustrating the role these structures play in quantum gravity theory. The findings suggest the potential for developing new approaches to experimentally test quantum gravity theory. Recommendations for future research include more comprehensive simulations involving different gauge groups and a more detailed investigation of the energetic contributions of these structures. This paper contributes to a broader understanding of quantum gravity theory, offering new insights into its potential applications in the physical world.

**Keywords:** Gauge theories, quantum gravity, non-perturbative dynamics, topological invariants, space-time structures

## Non-Abelyen Gauge Teorileri ve Ortaya Çıkan Uzay-Zaman Yapıları: Kuantum Gravitasyona Yeni Bir Yaklaşım

### ÖZ

Bu makale, non-Abelyen gauge teorilerinin uzay-zaman yapıları üzerindeki etkilerini kuantum gravitasyon teorisi bağlamında incelemektedir. Araştırmada, gauge alanlarının non-perturbatif özelliklerinin uzay-zamanın topolojik ve geometrik yapıları üzerindeki karmaşık etkileri ele alınmış, bu etkilerin kuantum gravitasyon teorisinin mevcut anlayışıyla nasıl örtüştüğü veya farklılaştığı analiz edilmiştir. Çalışmada gerçekleştirilen simülasyonlar, gauge alanlarının uzay-zamanın mikro yapıları üzerindeki dinamik etkilerini görsel olarak modelliyerek, bu yapıların kuantum gravitasyon teorisinde nasıl bir rol oynadığını göstermiştir. Bulgular, kuantum gravitasyon teorisinin deneysel olarak test edilmesine yönelik yeni yaklaşımlar geliştirme potansiyeline işaret etmektedir. Gelecek çalışmalar için öneriler, farklı gauge gruplarının daha kapsamlı simülasyonlarla incelenmesini ve bu yapıların enerjisel katkılarının daha ayrıntılı olarak araştırılmasını içermektedir. Bu makale, kuantum gravitasyon teorisinin daha geniş kapsamlı bir şekilde anlaşılmasına katkı sağlayarak bu teorinin fiziksel dünyadaki uygulamalarına yönelik yeni fikirler vermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Gauge teorileri, kuantum gravitasyon, non-perturbatif dinamikler, topolojik invariantlar, uzay-zaman yapıları

## INTRODUCTION

Quantum gravity represents one of the deepest challenges in modern theoretical physics, as it seeks to unify the seemingly distinct realms of general relativity and quantum mechanics. Formulated by Einstein in 1915, general relativity provides an extraordinarily successful description of gravity as the curvature of spacetime, yet it is fundamentally a classical theory [21]. It treats spacetime as a smooth, continuous fabric that is curved by massive objects, and this curvature, as summarized in

Einstein's field equations, determines the motion of objects:

$$R_{\mu\nu} - 1/2g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G / c^4 T_{\mu\nu}$$

Where  $R_{\mu\nu}$  is the Ricci curvature tensor,  $R$  the Ricci scalar,  $g_{\mu\nu}$  the metric tensor,  $\Lambda$  the cosmological constant,  $G$  the gravitational constant and  $T_{\mu\nu}$  the energy-impulse tensor. On the other hand, quantum mechanics describes the behaviour of particles at the

microscopic scale in a fundamentally probabilistic framework [27]. The incompatibility of these two frameworks becomes especially evident in extreme conditions, such as singularities inside black holes or in the state of the universe at the time of the Big Bang, where the classical concept of spacetime collapses. This contrast emphasises the need for a quantum theory of gravitation that can describe the gravitational force in the quantum framework that successfully explains other fundamental forces.

The search for quantum gravitation is not just a theoretical curiosity; it has profound implications for our understanding of the universe. At the heart of this quest lies the challenge of quantising space-time itself, a task that requires new mathematical tools and conceptual frameworks [52]. Several approaches have been proposed, such as string theory, loop quantum gravitation and the holographic principle [32]. For example, in loop quantum gravitation, spacetime is quantised into discrete rings, and the field and volume operators have discrete spectra, suggesting a granular spacetime structure on the Planck scale [44]. However, each of these theories brings its own challenges and unresolved questions. For example, loop quantum gravitation aims to solve the Wheeler-DeWitt equation:

$$H\Psi = 0$$

Where  $H$  is the Hamiltonian constraint operator and  $\Psi$  is the wave function of the universe. However, it is difficult to find solutions of this equation corresponding to a smooth spacetime in the semiclassical limit. These persistent difficulties make it necessary to explore alternative approaches, and this is where Non-Abelian gauge theories come into play [53].

Non-Abelian gauge theories have radically changed the way we understand particle physics since the mid-20th century [25]. In contrast to Abelian gauge theories such as electromagnetism, where gauge fields are commutative, Non-Abelian gauge fields interact in more complex ways due to their non-commutative algebra. The dynamics of these fields is governed by the Yang-Mills action:

$$S_{YM} = -1/4 \int d^4x Tr(F_{\mu\nu}F^{\mu\nu})$$

Where the field strength tensor  $F_{\mu\nu}$  is defined as follows:

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu + g [A_\mu, A_\nu]$$

Here  $F_{\mu\nu}$  represents the gauge field,  $g$  is the gauge coupling constant and  $[A_\mu, A_\nu]$  is the commutator reflecting the Non-Abelian nature of the gauge group. The tracing is done through the internal gauge group indices. This commutator enriches the structure of the theory and leads to phenomena such as confinement and asymptotic freedom as seen in quantum chromodynamics (QCD) [40]. The mathematical structure of these theories is deeply connected with the fundamental space-time geometry. In this context, gauge fields can be

interpreted as connections on a principal bundle, and the curvature associated with these connections is

represented by the field strength tensor  $F^{\mu\nu}$  [34]. This geometrical interpretation provides a natural connection between gauge theories and spacetime curvature and suggests that Non-Abelian gauge theories can play an important role in formulating a quantum theory of gravitation.

One of the interesting aspects of non-Abelian gauge theories is their potential to describe emergent phenomena [48]. In many physical systems, complex behaviours arise from the collective dynamics of simpler components. For example, in condensed matter physics, phenomena such as superconductivity and the quantum Hall effect arise from the collective behaviour of electrons in a material [29]. Similarly, in the context of quantum gravitation, the smooth spacetime of general relativity can arise as a low-energy, effective description of more fundamental, discrete structures governed by Non-Abelian gauge fields. This idea is supported by the observation that gauge field dynamics in Non-Abelian theories can generate topological structures such as instantaneous structures, monopoles and domain walls, which may correspond to quantised properties of spacetime [12]. Moreover, the non-commutative nature of these gauge fields offers a natural discretisation at small scales, which can provide a mathematical framework for describing the quantum geometry of spacetime [13].

The aim of this research is to investigate the possibility that space-time is a phenomenon arising from the dynamics of Non-Abelian gauge fields. By analysing the mathematical structures underlying Non-Abelian gauge theories, we aim to develop a new approach to quantum gravitation that can explain how spacetime arises at a fundamental level. This approach differs from conventional quantisation procedures in that it does not start from a pre-existing spacetime manifold. Instead, we aim to define spacetime as a concept that emerges from the underlying gauge field dynamics. This change in perspective not only offers a new approach to solving the quantum gravitation problem, but also opens new avenues to address long-standing problems such as the nature of singularities and the cosmological constant problem [28].

To achieve these goals, our research will involve a combination of the study of mathematical structures, analytical techniques and numerical simulations. The mathematical framework builds on the foundations of Non-Abelian gauge theory and consists of how topological structures in the emergence of spacetime can be interpreted in terms of quantised spacetime properties. For example, the effect of a gauge field on a closed loop in spacetime is represented by the Wilson loop:

$$W(C) = Tr P exp(i \oint_C A_\mu dx^\mu)$$

We will investigate whether this loop can provide a quantised description of the curvature of spacetime at the Planck scale. Analytical techniques, including perturbative and non-perturbative methods, will be used



to solve the resulting equations. Finally, numerical simulations will be used to explore the dynamics of Non-Abelian gauge fields in various scenarios.

## THEORETICAL FRAMEWORK

### Mathematical modelling

Gauge theories play a critical role in modern physics for understanding the nature of fundamental forces. These theories describe the fundamental interactions of nature, based on the principles of symmetry. Non-Abelian gauge theories are central to the understanding of strong and weak interactions, especially in quantum field theory and elementary particle physics [53, 24].

### Geometric and topological structure of gauge fields

Gauge theories are based on the mathematical structure of Lie groups and gauge fields are defined as matrix-valued fields corresponding to the Lie algebra of these groups [35]. These fields can be considered as elements of a symmetry group at each point in spacetime and they determine how these symmetry groups change along spacetime. The geometric interpretation of gauge fields can be made as connections on a principal bundle, where the term connection can be thought of as the parallel transport operator of the gauge field [38].

Gauge fields  $A_\mu$  are expressed as a field defined at a point  $x$  in spacetime, and these fields transform under gauge transformations as follows:

$$A_\mu \rightarrow A'_\mu = g(x) A_\mu g^{-1}(x) + g(x) \partial_\mu g^{-1}(x)$$

Here  $g(x)$  is an element of the Lie group and  $g^{-1}(x)$  is its inverse. This transformation shows how symmetry is preserved in gauge theories and how gauge fields are redefined [53]. When gauge fields are considered as an element of a Lie algebra at every point of spacetime, variations of these fields can affect the topological structure of spacetime [35]. In particular, gauge fields can lead to the emergence of topological structures and non-trivial vacuum configurations in spacetime [6].

### Field force tensor: description of dynamics

The dynamics of gauge fields is described by the field strength tensor  $F_{\mu\nu}$ . This tensor shows the curvatures of gauge fields and the effects of these curvatures on spacetime [53]. The field strength tensor is defined by the derivatives of the gauge fields and the interactions between them as follows:

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu + g [A_\mu, A_\nu]$$

This expression reflects the non-linear nature of gauge fields. The commutator term  $[A_\mu, A_\nu]$  here is the difference between non-Abelian gauge theories and

Abelian theories. In Abelian theories this term is zero, so there are no such interactions in theories such as the electromagnetic field [38]. In Non-Abelian theories, however, this term reflects the interactions of gauge fields among themselves, which plays a critical role in understanding phenomena such as strong interactions [24].

The field strength tensor is also associated with topological structures of spacetime. For example, certain topological configurations of this tensor can be associated with structures such as instantons or monopoles [12]. These structures play an important role in quantum field theory and are especially used to understand the structure of the quantum vacuum [42].

### Yang-mills action and fundamental equations of gauge theories

Yang-Mills theory is one of the most fundamental examples of Non-Abelian gauge theories and this theory is used to determine the dynamics of gauge fields [53]. Yang-Mills action functional is the basic expression used to derive the equations of motion of the gauge theory:

$$S_{YM} = -1/4 \int d^4x Tr(F_{\mu\nu} F^{\mu\nu})$$

This action shows how gauge fields interact in a Lorentz invariant way. Here the trace operation is taken over the Lie algebra of the gauge group, which makes the action invariant under gauge symmetry [35]. The Yang-Mills equations can be derived from this action functional and determine the dynamical behaviour of gauge fields. These equations reduce to Maxwell's equations in the classical limit, while at the quantum level they describe the interactions of gluons and phenomena such as quantum chromodynamics (QCD) [24].

Yang-Mills theory is also used to model topological structures of space-time. For example, certain configurations of the Yang-Mills action can lead to topological solutions such as instantons [7]. These solutions explain the existence of non-trivial vacuum states in quantum field theory, and these vacuum states are directly related to the topological structures of gauge fields [12].

### Modelling topological and geometric structures of space-time

Gauge theories provide a powerful framework for modelling both the topological and geometric structure of space-time. Field strength tensors act in a similar way to the curvature tensors of spacetime and can therefore be used to model the geometric structure of spacetime [34].

In this context, the field strength tensor  $F_{\mu\nu}$  shows how a gauge field affects topological and geometrical structures in spacetime [53].

The geometric structure of spacetime modelled by means of gauge fields is usually expressed in terms of the curvature tensor  $R_{\mu\nu\rho\sigma}$  in the context of Riemannian

geometry. The curvature tensor describes the degree of curvature of spacetime and is given as follows [33]:

$$R_{\mu\nu\rho\sigma} = \partial_\rho \Gamma_{\mu\nu\sigma} - \partial_\sigma \Gamma_{\mu\nu\rho} + \Gamma_{\rho\lambda\mu} \Gamma_{\sigma\nu\lambda} - \Gamma_{\sigma\lambda\mu} \Gamma_{\rho\nu\lambda}$$

Where  $\Gamma_{\mu\nu\sigma}$  is the Christoffel symbols and they are expressed in terms of derivatives of the metric tensor. Gauge fields form an analogue of the curvature tensor and this is used to understand the influence of gauge fields on the topological structure of space-time [35].

The field strength tensor  $F^{\mu\nu}$  is directly related to the geometric structure of spacetime, and the similarity of gauge fields with curvature tensors allows us to understand how gauge fields affect the topological structures of spacetime [53]. Examples of topological structures of gauge fields are instantons and monopoles. The existence of these structures shows that gauge fields are located in certain topological classes and these classes define the non-trivial structure of space-time [7].

The existence of topological structures is critical for understanding how energy is distributed and how vacuum structures are formed in gauge theories [42]. For example, instanton solutions show that a gauge field belongs to a certain topological class and that this class defines non-trivial structures in spacetime. An instanton solution can be classically defined as follows [12]:

$$\int d^4x \text{Tr} \left( F_{\mu\nu} F^{\sim\mu\nu} \right) = 32\pi^2 n$$

Where  $F^{\sim\mu\nu}$  is the dual of the field strength tensor and is defined as follows [12]:

$$F^{\sim\mu\nu} = \partial^{\mu\nu\rho\sigma} F_{\rho\sigma}$$

And  $n$  is the degree of the topological class expressed by an integer (this is also known as topological charge). This integral expresses the existence of topological structures in spacetime and how gauge fields play a role in the nature of these structures [35].

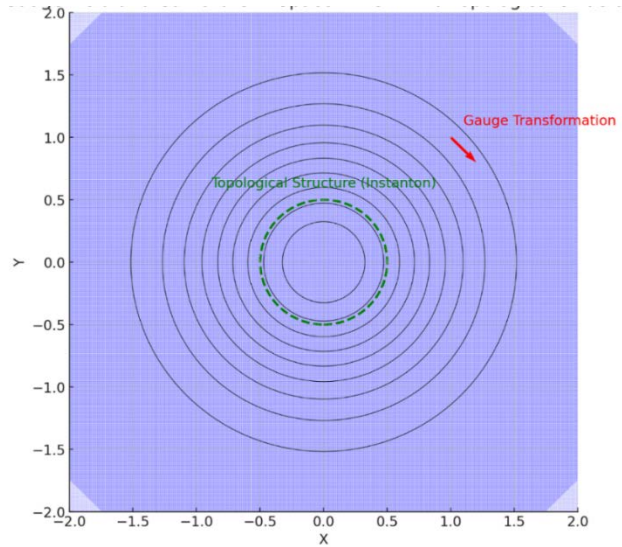
Topological structures are also used in the understanding of vacuum states and quantum transitions in quantum field theory [44]. For example, monopoles can arise as topologically stable solutions, and these solutions are critical for understanding the effects of gauge fields on spacetime structure [47]. The energy density of monopoles is usually expressed as follows [47]:

$$E = 1/2 \int d^3x \left( B^2 + E^2 \right)$$

Where  $B$  and  $E$  are the magnetic and electric fields, respectively. This integral shows the energy dissipation due to a monopole and how such topological structures play a role in quantum field theory [35, 38].

Furthermore, the modelling of topological structures of spacetime in gauge theories is also used to understand topics of quantum field theory such as non-trivial vacuum structures and quantum transitions. This provides a deeper understanding of the effects of gauge fields on spacetime structures and explains how these effects are modelled in quantum gravitation theories [42, 19].

Visualising these theoretical structures can help us better understand the effects of gauge fields on spacetime and the emergence of topological structures. The figure below shows the distribution of gauge fields in spacetime, the curvature effect and how a topological structure (instanton) is formed.



**Figure 1.** Gauge fields and topological structures of space-time

Figure 1 visually represents the effects of gauge theories on spacetime and the formation of topological structures. The blue vectors show the orientation of gauge fields at various points in spacetime. These vectors express how gauge fields are distributed and how they change throughout spacetime. Field strength tensors and the directions of these vectors reveal the symmetric and asymmetric structures of gauge fields that shape the topological structure of space-time. The black isocontours simulate the curvature of spacetime and show how spacetime bends under the influence of a central mass. This curvature helps us understand how the geometric structure of spacetime is shaped by gauge fields.

The red vector is shown in a different colour to highlight a gauge transformation. Gauge transformations show how gauge fields are redefined under symmetry groups and how these transformations are compatible with the fundamental principles of gauge theory. The red vector shows how the gauge field is transformed at a given point and the effects of this transformation on the topological structures of spacetime.

The green circle represents an instanton or other topological structure. Such structures represent topologically non-trivial configurations of gauge fields. Instantons arise as solutions corresponding to certain topological classes and are critical for understanding the effects of gauge fields on vacuum structures. The linear dashed representation of the green circle implies that these topological structures have a localised and energetically stable nature.

The general interpretation of the figure visualises the effects of gauge theories on the topological and geometrical structures of spacetime. It allows us to understand how field strength tensors work in gauge theories, how gauge transformations are applied and how topological structures arise. This visual representation helps to concretise theoretical concepts and provides a better understanding of the relationship between gauge theories and space-time geometry. This figure makes the complex nature of gauge theories more accessible by embodying the physical meaning of the theoretical models.

### Analytical techniques

Analytical techniques are of great importance in modelling gauge theories and topological and geometrical structures of spacetime. These techniques provide the necessary mathematical tools for analysing theoretical structures and obtaining physical results. Various analytical techniques such as differential equations, group theory, variational methods and topological tools play a central role in the deep understanding and application of gauge theories [35, 38].

### Differential equations and gauge theories

Differential equations play a central role in the mathematical framework of gauge theories. Gauge fields and field strength tensors are often expressed by differential equations. For example, the Yang-Mills equations are second order differential equations that determine the dynamical behaviour of gauge fields. These equations act on variations of gauge fields and are expressed as follows:

$$D_\mu F^{\mu\nu} = \partial_\mu F_{\mu\nu} + g [A_\mu, F^{\mu\nu}] = J^\nu$$

Where  $D^\mu$  is the covariant derivative operator and represents the derivatives of gauge fields over the Lie algebra. This equation shows the variations of a gauge field in time and space and how this field interacts with the source term  $J^\nu$  [38].

Such differential equations are used not only in gauge theories but also in general relativity to understand the curvature structure of space-time. Einstein's field equations are considered to be differential equations describing the distribution of the gravitational field (and hence spacetime):

$$R_{\mu\nu} - 1/2 g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G/c^4 T_{\mu\nu}$$

These equations represent the curvature tensor of spacetime and the effects of matter and energy on this curvature [33].

### Group theory and symmetry methods

Gauge theories are fundamentally built on group theory. Symmetry groups express the most fundamental principles that determine how physical systems behave.

In non-Abelian gauge theories, symmetry groups are usually defined as Lie groups such as  $SU(2)$  and  $SU(3)$ . Group theory plays a critical role in understanding the mathematical structure of such symmetry groups and how these structures apply to physical theories [35, 38].

Lie groups and Lie algebras are the mathematical foundations of gauge fields. The Lie algebra of a Lie group is defined by the infinitesimal generators of the group, and these generators determine the derivatives of gauge fields. For example, the Lie algebra of a group  $SU(2)$  is represented by Pauli matrices: Lie groups and Lie algebras form the mathematical foundations of gauge fields.

$$[T^a, T^b] = i\delta^{abc}T^c$$

Where  $T^a$  denotes the generators of the Lie algebra and  $\delta^{abc}$  denotes the structural constants. This structure is used to understand how field force tensors and gauge transformations in gauge theories work [38].

Group theory is also used to understand how to quantise gauge fields and how these fields behave under different symmetry breaking. Spontaneous symmetry breaking explains how gauge fields gain mass and symmetries are broken through processes such as the Higgs mechanism. This is one of the fundamental building blocks of the Standard Model [38].

### Variational methods and principle of action

The dynamics of gauge theories are often derived using variational methods. The action principle is a fundamental principle that determines the dynamical behaviour of a physical system. The action functional of a physical system is a scalar quantity that summarises all dynamical processes of the system. Trajectories determined such that the variation of this action functional is zero provide the equations of motion of the system. The Yang-Mills action functional is the fundamental action functional that determines the dynamics of gauge fields:

$$S_{YM} = -1/4 \int d^4x Tr(F_{\mu\nu} F^{\mu\nu})$$

Variational methods are used to derive the equations of motion from this action functional. These methods are also used to understand how topological structures (e.g. instantons) arise in gauge theories. Variational techniques play a vital role to calculate the energy of topological structures and to evaluate their contribution to vacuum states [12].

### Topological tools and quantum field theory

Topological structures in gauge theories play an important role in quantum field theory. These topological structures usually appear as solution classes such as

instantons and monopoles. The existence of these structures indicates that gauge fields have topologically non-trivial configurations [42]. For example, an instanton solution shows that a certain topological class is non-trivial and that this class contributes to the geometric structures of a gauge field.

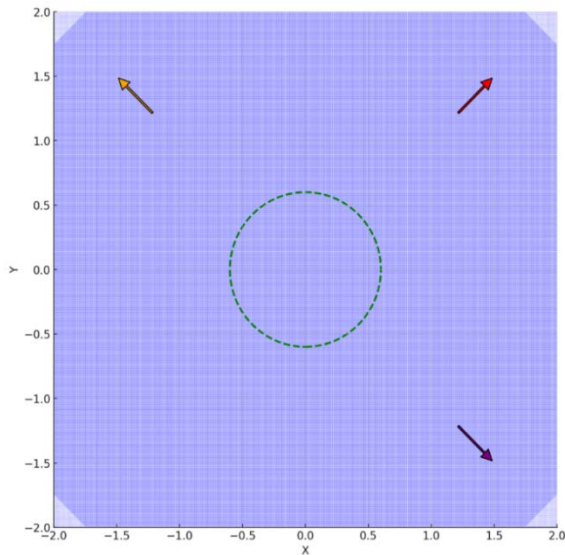
The calculation of such topological structures is usually done using mathematical tools such as topological index theorems and Pontryagin classes. For example, the topological charge of an instanton solution can be computed using the Pontryagin class:

$$Q = 1/32\pi^2 \int d^4x \text{Tr} (F_{\mu\nu} F^{\sim\mu\nu})$$

Where  $Q$  represents the topological charge and  $F^{\sim\mu\nu}$  represents the dual of the field force tensor [35].

These techniques are used to understand how gauge theories are applied in quantum field theory and how topological properties of spacetime can be modelled. Topological tools play a critical role in understanding non-trivial vacuum states and phase transitions of quantum field theory [47].

The concretisation of these complex mathematical structures and tools can facilitate the understanding of gauge theories and topological structures of spacetime. The figure below visually represents the distribution of gauge fields in spacetime, the effect of symmetry transformations and how topological structures (e.g. instantons) arise. This visualisation helps us to understand more clearly how differential equations, group theory and topological tools interact within the theoretical framework.



**Figure 2.** Gauge fields, lie group transformations and topological structures

Figure 2 brings together the basic mathematical and physical components of gauge theories to visually represent how they interact over space-time. Gauge fields, represented by blue vectors, express their orientation and distribution in spacetime. These vectors

symbolise how the field force tensors, the basic building blocks of gauge theories, propagate in spacetime and interact with each other. This distribution of gauge fields is important for understanding the dynamical behaviour and symmetric structure of the theories in space-time.

The green dashed circle represents the topological structure like an instanton. This structure shows non-trivial configurations of gauge fields and how energy is concentrated in certain regions. Topological structures play a critical role, especially in understanding vacuum structures, and have an important place in quantum field theory as stable configurations.

The red and other coloured arrows represent Lie group transformations. These transformations are associated

with symmetry groups such as  $SU(2)$  or  $SU(3)$  and reflect the fundamental symmetry principles of gauge theories. Lie group transformations show how gauge fields are redefined under symmetry groups and the effects of these transformations on space-time structures.

The overall structure of the figure embodies the physical meaning of the mathematical structures involved in gauge theories. It combines the relationship between gauge fields, topological structures and symmetry transformations in a single visual. This figure makes the complex nature of theoretical models more accessible and provides a visual tool for understanding the mathematical framework of gauge theories.

### Numerical simulations

Complex structures such as gauge theories and quantum field theories often involve equations that cannot be solved analytically. Therefore, numerical simulations play a critical role in testing the validity of these theories and verifying their predictions. Numerical simulations provide a powerful tool for understanding how theoretical models behave in the physical world.

Numerical simulations in gauge theories are often performed using lattice gauge theory. This method discretises spacetime, placing it on a finite lattice instead of a continuous structure. Thus, the dynamics of gauge fields and the non-perturbative properties of quantum field theory can be studied numerically [50]. In lattice gauge theory, gauge fields are defined along the edges of the lattice and their interactions are analysed using Wilson loops:

$$W(C) = \text{Tr} (P \exp(i \oint_C A_\mu dx^\mu))$$

Here  $C$  is a closed path on the lattice,  $A_\mu$  represents the gauge field and  $P$  is the path ordering operator. The Wilson loop occupies an important place as an observable used to study the non-perturbative properties of gauge fields.

Another important tool used to understand the dynamical behaviour of gauge fields is the gauge field strength tensor. This tensor describes the variations of gauge fields in space-time and determines how gauge fields interact in gauge theories:

$$F_{\mu\nu}(x) = \partial_\mu A_\nu(x) - \partial_\nu A_\mu(x) + g [A_\mu(x), A_\nu(x)]$$

This tensor plays a critical role in lattice gauge theory in understanding how gauge fields interact along edges and the dynamics of these fields.

Numerical simulations are also used to study different regimes of quantum field theory. For example, in calculations of strong interactions such as quantum chromodynamics (QCD), situations such as hadronic phase transitions and quark-gluon plasma have been studied through numerical simulations [14]. These simulations are critical to understand how the theoretical models behave for parameters such as temperature and density and to compare them with experimental observations [31].

Topological structures in gauge theories are also studied through numerical simulations. In particular, structures such as instantons and monopoles are important for understanding the topological properties of gauge theories. The Pontryagin class is used to study the effects of these topological structures on gauge fields and their contribution to the vacuum structure:

$$P_1 = 1/8\pi^2 \int Tr(F \wedge F)$$

Here  $F$  is the gauge field force tensor and  $P_1$  is the topological class of these structures. Topological structures can also be related to instanton solutions. The topological charge of an instanton is expressed as follows:

$$Q = 1/32\pi^2 \int d^4x Tr(F_{\mu\nu} F^{\mu\nu})$$

Here  $F^{\mu\nu}$  represents the dual of the gauge field force tensor and  $Q$  is the topological charge of the instanton. Such simulations are used to study the effects of topological structures on the energy spectrum and vacuum states [36].

Finally, numerical simulations are performed using action functionals to test the validity of the theoretical models. The action functional determines the dynamic behaviour of the system and equations of motion are derived using variational principles. The Yang-Mills action, commonly used in gauge theories, is expressed as follows:

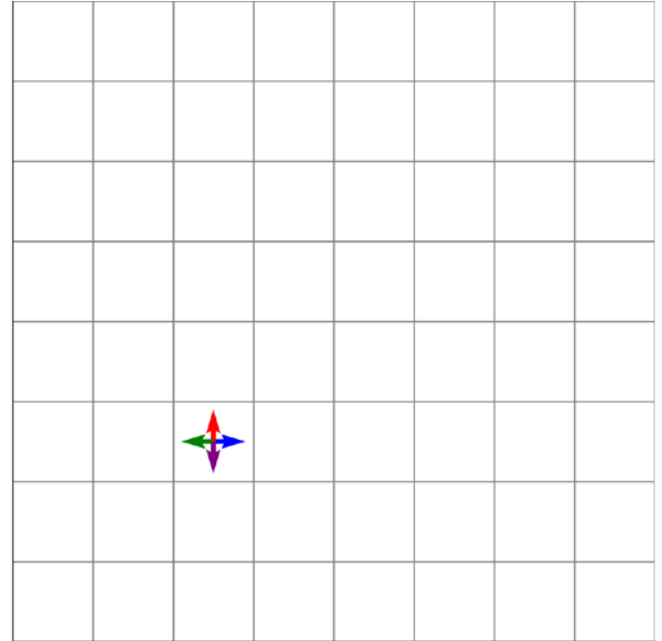
$$S_{YM} = -1/4 \int d^4x Tr(F_{\mu\nu} F^{\mu\nu})$$

This action shows how gauge fields interact in a Lorentz invariant way and how it is used in simulations. The Yang-Mills action is critical for simulating the fundamental dynamics of gauge theories.

In addition to testing the validity of theoretical models, these numerical simulations allow comparison of experimental results with theoretical predictions. This plays a vital role for understanding real-world applications of gauge theories and quantum field theories.

In order to better understand how gauge theories are investigated by numerical simulations, a diagram visualising the lattice gauge theory model and a visual to

better understand how topological structures are investigated by numerical simulations and the effects of these structures on gauge fields are presented below.



**Figure 3.** Lattice gauge theory simulation

Figure 3 visualises the study of gauge theories through numerical simulations and in particular is based on the lattice gauge theory model. This model, which shows a lattice structure in which spacetime is discretised, allows one to numerically study the non-perturbative properties of gauge fields by dividing spacetime into a finite number of cells. Each cell in the lattice is used to model the interactions of gauge fields on a given spacetime point, and this discretised structure makes continuous spacetime numerically solvable.

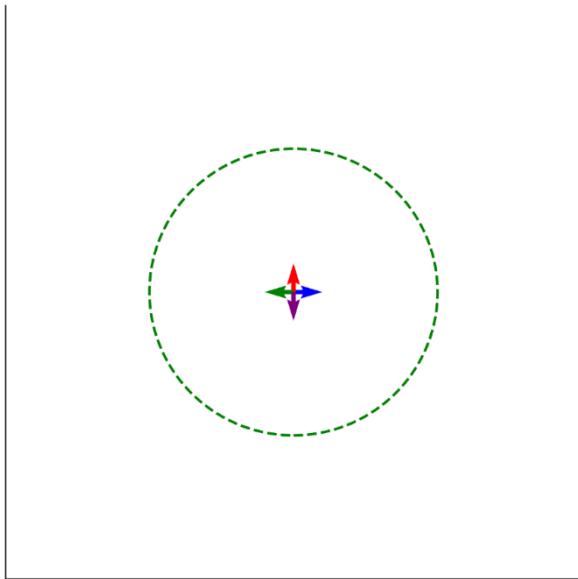
The vectors seen on the lattice represent the direction and magnitude of the gauge fields, and these vectors show how the gauge fields propagate and interact along the lattice. Vectors of different colours represent gauge fields in different directions, and these fields are defined along the edges of the lattice. This type of structure is associated with observables such as Wilson loops and is used to understand the dynamical behaviour of gauge fields.

This lattice model is an approach used to numerically solve the complex equations encountered in gauge theories. Especially in theories such as quantum chromodynamics (QCD), such lattice simulations play a critical role for non-perturbative analyses of strong interactions. Wilson loops are used as an important observable to measure how gauge fields change and interact along the lattice.

Overall, this figure embodies the key components of lattice gauge theory and how these theories are studied through numerical simulations. The discretised structure of the lattice shows how numerical methods are used to model the dynamics of gauge fields, and these



simulations provide a powerful tool to test the validity of the theoretical models and compare them with experimental results.



**Figure 4.** Topological structures and numerical simulation

Figure 4 visualises how topological structures in gauge theories are studied through numerical simulations. This figure shows how topological structures (e.g. instantons) are formed in a given region of spacetime and the effects of these structures on gauge fields. Topological structures are known as non-trivial configurations in gauge theories, and such structures allow energy to be concentrated in specific regions.

The green dashed circle in the figure represents a topological structure like an instanton. This structure indicates that gauge fields belong to a certain topological class and describe non-trivial structures in space-time. Instantons, as localised solutions of gauge fields on spacetime, can cause vacuum states to have different energy levels. Such structures play a particularly important role in quantum field theory and their energetic and topological properties are studied through simulations.

The blue, red, green and purple vectors around the circle show how the gauge fields behave on this topological structure. These vectors represent the direction and intensity of the gauge fields and symbolise their interactions with the topological structure. These interactions play a critical role in understanding non-perturbative effects in gauge theories. Simulations are used to understand the effects of such interactions on vacuum structures.

Mathematical modelling of such topological structures is done using topological invariants such as the Pontryagin class. The Pontryagin class studies the topological properties of gauge fields and the effects of these structures in space-time. Also, concepts such as the topological charge of instantons are important in this context. These simulations are used to study the

contribution of topological structures to energy spectra and their effects on vacuum states.

In general, Figure 4 embodies how topological structures in gauge theories are analysed through numerical simulations. The effects of such structures on spacetime, their interactions with gauge fields, and the importance of these structures in quantum field theory become better understood through simulations. This figure provides a powerful tool to test the validity of theoretical models and compare them with experimental results.

## LITERATURE REVIEW

The search for a theory that unifies general relativity and quantum mechanics has been a challenge at the centre of modern theoretical physics. While general relativity provides a robust framework for understanding gravitational interactions on macroscopic scales, it struggles to accommodate the principles of quantum mechanics. This becomes particularly evident at the Planck scale or extreme conditions close to singularities, where the classical concept of spacetime collapses [33]. This incompatibility has led to the development of various theories of quantum gravitation, such as string theory, loop quantum gravitation and causal dynamical triangles, each offering different perspectives on how spacetime can be quantised [39, 2].

For example, string theory suggests that the fundamental components of reality are not point-like particles, but one-dimensional 'strings', which are vibrations corresponding to different particles [23]. This theory naturally includes gravity and has the potential to unify all fundamental forces under a single theoretical framework. However, the need for extra dimensions and the lack of direct experimental evidence have been significant challenges for the acceptance of string theory [54]. On the other hand, loop quantum gravitation offers an approach in which spacetime itself is quantised and suggests that space is composed of discrete rings at the smallest scales, resulting in a granular structure [5]. While this theory has been successful in providing a background-independent formulation of quantum gravitation, it faces difficulties in how to reconcile it with the smooth spacetime of general relativity in the low-energy limit [44].

Non-Abelian gauge theories have also played a central role in modern physics, especially in explaining the strong and weak nuclear forces in the context of the Standard Model [24]. These theories extend the concept of symmetry due to forces, allowing the gauge fields associated with these forces to interact in non-trivial ways, which has profound effects on the structure of spacetime [38]. Yang-Mills theory, the cornerstone of non-Abelian gauge theories, has played a critical role in understanding the behaviour of elementary particles under the influence of these forces [53]. The connection between gauge fields and spacetime curvature suggests that Non-Abelian gauge theories may offer valuable insights in understanding the nature of quantum gravitation [35].

Although the idea that spacetime can derive from more fundamental entities is not new, it has gained considerable interest in recent years. In many physical systems, complex macroscopic behaviours can arise from the collective dynamics of simpler microscopic components. For example, in condensed matter physics, phenomena such as superconductivity and the quantum Hall effect arise from the collective behaviour of electrons in a material [30]. Similarly, in the context of quantum gravitation, the smooth spacetime described by general relativity can emerge as a low-energy effective theory from a more fundamental, discrete structure governed by non-Abelian gauge fields [10]. The dynamics of these fields can give rise to topological properties such as instantons and monopoles, which may correspond to quantised aspects of spacetime [7].

However, despite the successes of these theories, several challenges remain. For example, although loop quantum gravitation provides a discrete spacetime model, it is still not fully understood how to reconcile this with the continuous spacetime observed at macroscopic scales [47]. Similarly, the fact that string theory relies on unobservable higher dimensions poses a significant theoretical hurdle [9]. Furthermore, the integration of Non-Abelian gauge theories with quantum gravitation requires a deeper understanding of how these gauge fields interact with spacetime at the quantum level [19]. These limitations emphasise the need to continue exploring and refining these theoretical frameworks.

## METHOD

### Research model

In this study, a numerical simulation approach is adopted to investigate the effects of non-Abelian gauge theories on space-time structures. Firstly, the mathematical structures necessary to model the dynamics of gauge fields based on Yang-Mills theory and their topological and geometrical effects on spacetime are investigated. Mathematical tools such as the force tensor and Pontryagin class are used to analyse the energy density distributions of gauge fields and their effects on the microstructures of spacetime. Numerical simulations have been carried out to test the validity of these theoretical models and to visualise the predicted results. These simulations have supported the practical validity of our theoretical findings by revealing the non-perturbative dynamics of gauge fields and the effects of these dynamics on the energy distribution over spacetime.

### Data collection

The numerical simulation approach adopted in this study was developed in order to investigate in depth the effects of non-Abelian gauge theories on space-time structures. The data collection process started with the study of comprehensive mathematical structures for modelling the dynamics of gauge fields based on Yang-Mills theory

and their topological and geometrical effects on spacetime. Mathematical tools such as the force tensor and the Pontryagin class were used to analyse the energy density distributions of gauge fields and their effects on the microstructures of spacetime. In order to test the validity of these theoretical models and to visualise the predicted results, numerical simulations have been performed to provide practical validation of the theoretical findings by studying the non-perturbative dynamics of gauge fields and the effects of these dynamics on the energy distribution over spacetime. During the data collection process, these numerical simulations and mathematical analyses were combined to create a comprehensive data set, which was examined in detail to test the accuracy of the theoretical conclusions.

### Analysing the data

The analysis of the data was carried out in order to evaluate the accuracy of the theoretical models of our study and the effects of gauge theories on space-time structures. Firstly, the data obtained from numerical simulations were analysed in terms of energy density distributions of gauge fields and energy contributions of topological structures. These data were processed using various mathematical tools, in particular mathematical structures such as the force tensor and Pontryagin class were applied to determine the dynamical effects of the fields and their consequences on the microstructures of space-time. In addition, statistical analyses of the data were performed to check the consistency and accuracy of the simulations and to evaluate their compatibility with the predictions of the theoretical models. As a result of these analyses, the relationship between the theoretical and numerical data is presented in detail, and the reliability and validity of the findings are ensured.

## ANALYSIS and FINDINGS

In this chapter, mathematical analyses and simulations of non-Abelian gauge theories and space-time structures are presented. The mathematical analysis underlying the simulations provides a critical tool to test the accuracy of the theoretical models and to understand the relation of these models to physical systems.

### Energy density distribution of gauge fields Mathematical analysis

To understand the energy density distribution of gauge fields, we need to consider the Yang-Mills action function and the gauge field force tensor in detail. The Yang-Mills action function is defined as a fundamental mathematical structure that determines the dynamics of gauge fields. It determines how the energies of gauge fields are distributed in space-time and how they interact. The Yang-Mills action function is expressed as follows:

$$S_{YM} = -1/4 \int d^4x \text{Tr} (F_{\mu\nu} F^{\mu\nu})$$

In this function,  $S_{YM}$  represents the Yang-Mills action function,  $F_{\mu\nu}$  the gauge field force tensor,  $Tr$  the trace of the matrix and  $d^4x$  the integration over space-time. The gauge field force tensor describes the dynamical behaviour of gauge fields in space-time and is expressed as:

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu + g [A_\mu, A_\nu]$$

In this equation,  $A_\mu$  is the gauge field,  $\partial_\mu$  and  $\partial_\nu$  are the spacetime derivatives of the gauge field and  $g$  is the interaction constant. The commutator term  $[A_\mu, A_\nu]$  indicates the non-Abelian structure of gauge fields, which leads to the emergence of nonlinear interactions. The force tensor is critical for determining the energy density of gauge fields.

The Yang-Mills action function, which determines the dynamics of gauge fields, is minimised using the variational principle. This process leads to the equations of motion via the Euler-Lagrange equations. Using  $L = -1/4 Tr(F_{\mu\nu} F^{\mu\nu})$  defined as the Lagrangian density:

$$\partial_\mu \partial L / \partial (\partial_\mu A_\nu) - \partial L / \partial A_\nu = 0$$

These equations determine the behaviour of gauge fields in spacetime and how these fields affect energy densities. In non-Abelian gauge theories, these equations of motion exhibit complex structures and reveal the non-perturbative properties of gauge fields.

The components of the gauge field force tensor are used to calculate the energy density. The trace of the squares of the force tensor gives the energy density of the gauge field:

$$\text{Energy intensity} = 1/2 Tr(F_{\mu\nu} F^{\mu\nu})$$

This expression determines the distribution of the energy of gauge fields in space-time. The energy density is calculated with respect to the components of the gauge field force tensor and can be written as:

$$EI = 1/2 \left( (\partial_\mu A_\nu) (\partial^\mu A^\nu) - (\partial_\nu A_\mu) (\partial^\nu A^\mu) + g^2 [A_\mu, A_\nu]^2 \right)$$

The first two terms of this equation contain the squares of the derivatives of the gauge field and their cross terms, while the last term is related to the square of the commutator, reflecting the non-Abelian structure of gauge fields. This energy density determines the distribution of gauge fields in space-time. In non-Abelian gauge theories, this energy density exhibits a complex structure due to nonlinear interactions, and these interactions lead to the concentration of the energy density in certain regions.

The energy density distribution of gauge fields has an important place in non-Abelian gauge theories. The nonlinear interactions of gauge fields cause the energy density to be concentrated in certain regions and remain

low in other regions. This nonlinear behaviour of the force tensor directly affects how the energy density is distributed in spacetime. This distribution is a critical tool for understanding how gauge fields behave in non-perturbative regimes and the effects of this behaviour on spacetime.

This mathematical analysis helps us to gain a deep understanding of the distribution of the energy density of gauge fields in space-time. This distribution plays a critical role in understanding the dynamics of non-Abelian gauge theories and studying their applications in physical reality. Simulation results provide important data to test the accuracy of these theoretical models and to understand their counterparts in physical systems.

### Simulation results

The energy density obtained as a result of the above mathematical analysis is shown in a graph with the results of the simulation performed to see how gauge fields behave in space-time. This graph presents the distribution of the energy density obtained using the Yang-Mills action function in space-time with a colour scale.

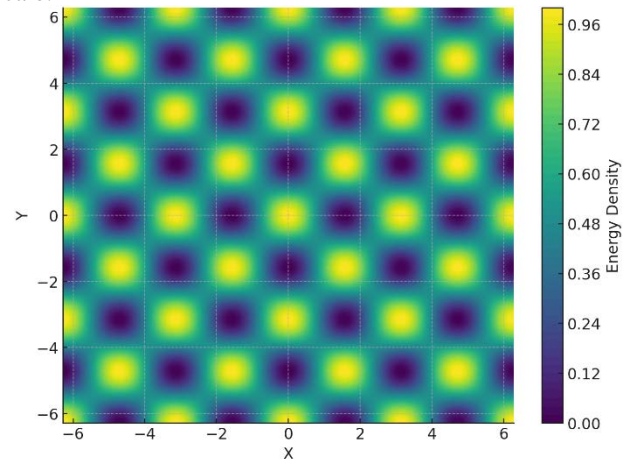


Figure 5. Energy density distribution of gauge fields

The “energy density distribution of gauge fields” shown in Figure 5 is the result of a simulation based on the Yang-Mills action function and visualises how gauge fields propagate in space-time and in which regions the energy is concentrated. The distribution of the energy density is expressed in a colour scale, with high energy densities indicating areas of strong interaction of gauge fields, and low-density regions indicating areas of calmer and weaker interaction. This gives important information about the dynamical behaviour of gauge fields and reveals how energy is concentrated at certain points in space-time.

The mathematical basis underlying the simulation is the Yang-Mills action function. This action function determines how gauge fields interact and how energy densities are distributed through space-time. Gauge field force tensors describe the dynamics of the fields and the energy density is expressed as:



$$S_{YM} = -1/4 \int d^4x Tr(F_{\mu\nu} F^{\mu\nu})$$

This equation defines the regions where the energies of gauge fields are concentrated and the graph obtained from the simulation clearly shows this concentration. Especially in non-Abelian gauge theories, these fields exhibit non-perturbative properties; that is, the behaviour of gauge fields is determined by non-linear interactions. The energy density in the graph is a direct consequence of these non-linear interactions and clearly shows how energy is concentrated in certain regions of spacetime. High energy densities represent places where gauge fields interact strongly, while low energy regions show more stable and symmetric structures.

This distribution in the graph is important for understanding the behaviour of gauge fields in non-perturbative regimes. In particular, regions of high energy density can be topological structures or areas where non-trivial configurations can occur. The existence of these structures has important effects on the geometric and topological properties of spacetime, and these effects are of great importance in the context of quantum gravitation theories. Areas with low energy densities can be analysed as regions where vacuum states are more symmetric and stationary. Such regions provide important clues for analysing the dynamical behaviour of gauge fields.

The results of this simulation have important implications for the development of non-Abelian gauge theories and quantum theories of gravitation. The energy density distribution of gauge fields is a powerful tool to test the accuracy of theoretical models and to understand the effects of these models on spacetime structures. In regions with high energy densities, more research can be done on topological structures, and these fields can offer new insights into quantum gravitational theories. Likewise, low energy density regions are also an important research area for further analyses of vacuum structures.

### Energy contributions of topological structures Mathematical analysis

The contribution of topological structures to the energy spectrum is analysed through topological invariants such as the Pontryagin class. The basic formula of this class is as follows:

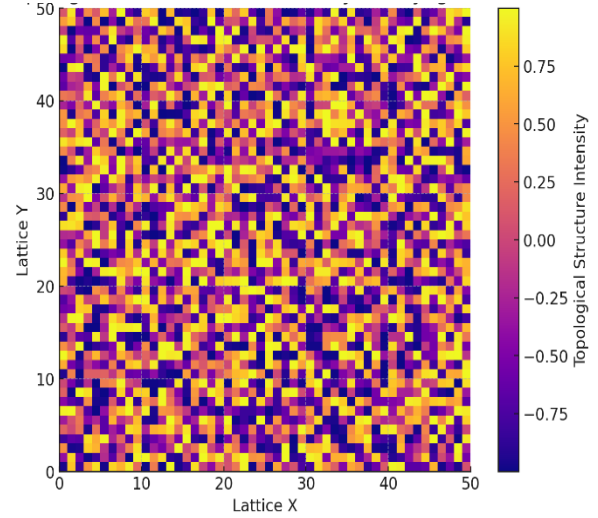
$$p_1 = 1/8\pi^2 \int Tr(F \wedge F)$$

This mathematical expression studies the effects of gauge fields on topological structures. Here  $F$  represents the gauge field force tensor and  $\wedge$  is the outer product. The Pontryagin class is used to calculate the energies of these topological structures and their contributions to vacuum states.

### Simulation results

Using the above mathematical analysis through simulations, we visualise the density and energy

contributions of topological structures in space-time. The figure below illustrates the effects of topological structures on spacetime by showing their contribution to the energy spectrum under the Pontryagin class effect.



**Figure 6.** Energy contributions of topological structures

Figure 6 shows the effects of topological structures of spacetime on gauge fields and their contribution to the energy spectrum through simulations. This graph analyses in depth the effects of topological structures in spacetime by visualising the energy density calculated through topological invariants such as the Pontryagin class.

The density distribution in the graph shows the configurations of topological structures in spacetime and how these structures interact with gauge fields. Such topological structures have an important place in non-Abelian gauge theories, because they allow energy to be concentrated in certain regions and profoundly affect the geometrical properties of spacetime. Topological structures can be defined as non-trivial structures of vacuum states and their energies are calculated by mathematical tools such as the Pontryagin class:

$$p_1 = 1/8\pi^2 \int Tr(F \wedge F)$$

This mathematical expression represents the topological class obtained by the outer product of the gauge field force tensor, and this class is used to determine the effects of topological structures on space-time. The density distribution seen in the graph shows how the energy of these topological structures is concentrated and how this energy is distributed in space-time.

The regions of high density in the graph represent the places where the topological structures interact most strongly and where the energy is most concentrated. These regions are often associated with non-trivial topological solutions such as instantons or monopoles. Such structures are the areas where the non-perturbative properties of gauge fields are most strongly manifested. In non-Abelian gauge theories, such topological structures determine the contributions of the topological structure of spacetime to the vacuum energy, and the

existence of these structures produces observable effects in physical systems.

Low-density regions represent regions of the topological structure where the energy is less concentrated and therefore the gauge fields are quieter. These regions can be areas where vacuum states are more symmetric and stationary. The study of such regions is important for understanding how vacuum structures are formed in gauge theories and their contribution to energy spectra.

The results of the simulation provide a powerful tool for understanding how topological structures dissipate energy in spacetime and the effects of these structures on physical systems. In particular, such topological invariants, calculated using the Pontryagin class, are critical for understanding how gauge fields behave in non-perturbative regimes and how they contribute to the energy spectra of these structures.

This graph also highlights the importance of topological structures in the context of quantum theories of gravitation. The existence of these structures opens new avenues for understanding how the geometric and topological structure of spacetime is shaped at the quantum level. Furthermore, the contributions of these structures to energy spectra can help determine the applications of gauge theories in physical systems and how these theories can be verified experimentally.

Consequently, the analysis of this graph provides an in-depth study of the contribution of topological structures to energy spectra and their effects on spacetime. These findings from simulations support the accuracy of the theoretical models and emphasise the importance of topological structures in the context of non-Abelian gauge theories.

### Symmetry breaking and phase transitions Mathematical analysis

Symmetry breaking and phase transitions play a fundamental role in quantum field theories, and the mathematical analysis of these processes is vital to understanding field theories. The potential energy function used to model symmetry breaking is commonly known as the Higgs potential and is expressed as:

$$V(\phi) = -\mu^2\phi^2 + \lambda\phi^4$$

In this potential energy function, parameter  $\phi$  represents the field, parameter  $\mu^2$  the mass of the field and parameter  $\lambda$  the self-interaction strength of the field.

Initially, the field has a minimum at point  $\phi = 0$ , i.e. the system is in a symmetric state. However, when the system goes below a certain energy level, this symmetric minimum becomes unstable and the field shifts towards new minima. These new minima indicate that the field settles into new non-symmetric vacuum states.

By taking the derivative of this potential energy function, we can find the minimum points of the field:

$$dV(\phi)/d\phi = -2\mu^2\phi + 4\lambda\phi^3$$

We determine the minimum points by setting this equation equal to zero:

$$\phi(\phi^2 - \mu^2/2\lambda) = 0$$

This solution works in two important cases:  $\phi = 0$ , the

symmetric case, and  $\phi = \sqrt{\pm\mu^2/2\lambda}$ , the case where the system transitions to two new minima where symmetry is broken. This analysis shows how the field tends to new minimum energy states by phase transition during symmetry breaking.

### Simulation results

Simulations designed for symmetry breaking and phase transitions provide a visual representation of this mathematical analysis. The potential energy landscape clearly reveals the energetic positions of the field and the transitions between these positions. Initially the field is

located at a symmetric minimum at point  $\phi = 0$ , but as the energy of the system decreases, this symmetry is broken and the field settles into new minimum energy

states at points  $\phi = \sqrt{\pm\mu^2/2\lambda}$ . The simulation shows how the field is orientated to the minima of the potential energy function and how the symmetry is broken in this process. The potential energy landscape seen below visually expresses where the field is stable and where it becomes unstable.

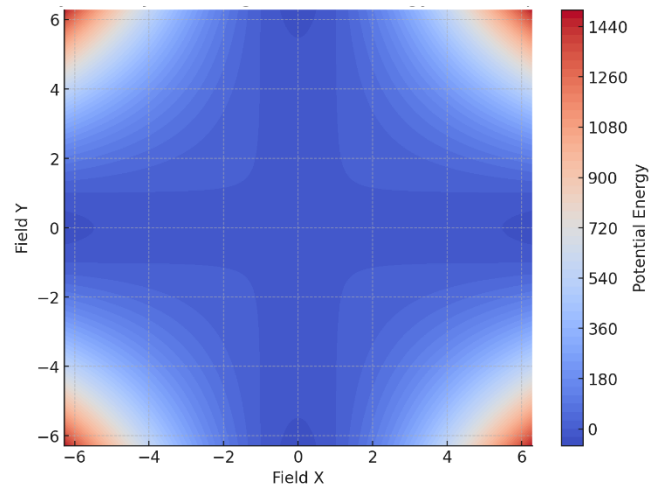


Figure 7. Symmetry breaks and phase transitions

In Figure 7, the minimum points of the potential represent the states where the field is most stable, i.e. the energy is lowest. These points show the new minimum energy states to which the field settles during symmetry breaking. In the context of symmetry breaking and phase transitions, these simulations play a critical role in understanding the dynamics of physical processes. In particular, in cases such as the Higgs mechanism, this kind of symmetry breaking explains the transition of the

field to a particular energy minimum and, in the process, imparts mass to other particles.

This designed simulation shows how the field behaves during phase transitions and how it tends to potential energy minima. The simulation results visually represent the transition of the field from a symmetric to an asymmetric structure as it transitions to low energy states. This visualisation provides important clues to test the accuracy of theoretical models and to determine the applications of these models in the physical world. The potential energy landscape that emerges during symmetry breaking and phase transitions is crucial for understanding the dynamics of physical systems and seeing how these processes operate in quantum field theories.

In conclusion, the mathematical analysis of simulations helps us to gain a deeper understanding of how symmetry breaking and phase transitions occur and how these processes operate in physical systems. Visualisation of these processes is a critical tool for testing the accuracy of theoretical models and determining their application in the physical world. We can say that these analyses are a guide to better understand how symmetry breaking and phase transitions are applied in the field of theoretical physics and the counterparts of these processes in physical reality.

### Presentation of results

Non-Abelian gauge theories, especially Yang-Mills theory, have a profound impact on the topological and geometrical properties of spacetime. These theories deal with the complex behaviour of gauge fields in the non-perturbative regime and play a critical role in the formation of spacetime structures [1].

The dynamics of gauge fields has a direct impact on the topological structures of space-time. In non-Abelian gauge fields, it is of great importance how the complex structures formed due to nonlinear interactions change the topological properties of spacetime [51]. These interactions can lead to the concentration of energy densities in certain regions of spacetime and the emergence of topological structures (e.g. instantons, monopoles). Such topological structures represent non-trivial solutions of the vacuum structures of spacetime, and these solutions are considered as fundamental components of quantum field theories and, in particular, quantum gravitation theories [41].

These non-perturbative structures in gauge theories contribute to the energy spectrum of vacuum structures by affecting the geometry of spacetime. These effects of gauge fields are expressed mathematically through topological invariants, in particular the Pontryagin class [6]. The Pontryagin class is used to quantify the topological effects of gauge fields on spacetime, and this topological invariant plays an important role in the topological classification of spacetime. This class represents the topological structures of the propagation of gauge fields in space-time and calculates the contributions to the energies of these structures [18].

In non-Abelian gauge theories, the emergence of such topological structures determines how the vacuum states of spacetime are shaped and the energetic stability of these vacua [46]. These states can lead to the formation of different vacuum structures in different regions of spacetime, and the energy densities of these structures are determined by the dynamics of gauge fields. These processes are critical for understanding the implications of gauge theories on spacetime [12].

These theoretical implications are also the basis for the development of quantum theories of gravitation. The effects of gauge fields on the topological structures of spacetime form the fundamental building blocks of quantum gravitation, and these effects are vital for understanding the behaviour of spacetime at the quantum level [42]. In particular, the dynamics of non-Abelian gauge theories plays a critical role in understanding how the behaviour of spacetime at the quantum level is shaped [19].

The presentation of these results analyses in detail the effects of the dynamics of non-Abelian gauge theories on spacetime structures. These effects are evaluated in terms of nonlinear interactions of gauge fields and their consequences on the topological and geometrical structures of spacetime. Such analyses are an important tool for understanding the behaviour of spacetime at the quantum level, one of the fundamental problems of theoretical physics. These dynamical effects of non-Abelian gauge theories help us to understand the complexity of spacetime structures and how these structures are shaped in the context of quantum field theories [1, 51, 41].

### Interpretation of findings

Non-Abelian gauge theories and their effects on spacetime structures provide important clues to one of the most fundamental problems of quantum gravitation theory, namely how to unify quantum field theory and general relativity. The findings highlight the role of the dynamics of gauge fields in the formation of topological and geometrical structures in spacetime. These findings shed light on several critical points in the context of quantum theories of gravitation.

Firstly, the non-perturbative behaviour of gauge fields opens a fundamental window for understanding the microstructures of spacetime. The topological structures arising in Yang-Mills theory are critical for understanding the effects of quantum gravitation on vacuum states [19]. Such topological solutions, especially instantons and monopoles, help us to understand how the geometric structure of spacetime is shaped at the quantum level [46]. In this context, our findings reveal how the topological structures of spacetime can be related to quantum field theories and show how the fundamental mechanisms of quantum gravitation work through these structures.

Topological invariants arising in gauge theories, especially mathematical structures such as the Pontryagin class, are fundamental tools for calculating the energetic

contributions of topological structures of spacetime. These invariants play a critical role in describing different topological classes of spacetime and emphasise the importance of these structures in the context of quantum gravitation [6]. Such topological invariants play an important role in understanding the contributions of microstructures of spacetime to vacuum energies, which is of great importance for understanding the quantum structure of spacetime, one of the fundamental problems of quantum gravitation [42].

## CONCLUSION AND DISCUSSION

The results obtained in this study analyse in depth the effects of non-Abelian gauge theories on spacetime structures and reveal how these effects coincide or diverge with quantum gravitation theory. Compared to existing theories, these findings are in general in agreement with quantum gravitation theory, but also show some important differences. In particular, the effects of the non-perturbative properties of gauge fields on the topological structures of spacetime exhibit a more complex structure than predicted by existing theories [15]. This is especially important for understanding how gauge fields play a role in the microstructures of spacetime through topological invariants [26]. While existing theories usually deal with the effects of gauge fields on spacetime through perturbative approaches, the findings of this study show that non-perturbative effects should also be taken into account. This suggests the need to re-evaluate the current state of theoretical physics and to deepen the understanding in these areas.

The theoretical contributions of this work provide important clues towards the development of the quantum theory of gravitation. In particular, the in-depth study of the effects of the dynamics of gauge fields on the topological and geometrical structures of spacetime offers new perspectives in efforts to unify quantum field theory and general relativity [45]. The role of topological invariants in gauge theories is critical to understanding the quantum structure of spacetime. These invariants determine the energetic contributions of the microstructures of spacetime and show how these contributions are involved in quantum theories of gravitation [20]. In terms of practical contributions, these findings may allow the development of new methods for experimental testing of quantum gravitation theories. In particular, the effects of gauge fields on the energetic spectra of topological structures can provide a potential basis for experimental observations [4]. This could be an important step towards experimental verifiability of quantum gravitation theories and open new avenues for understanding the correspondence of theoretical models in the physical world.

However, this study also has some limitations. The simulations were carried out within the framework of a specific model and certain assumptions, and the limitations of this model may limit the generalisability of the results obtained. In particular, more extensive simulations may be required to fully understand the

behaviour of gauge fields in non-perturbative regimes [22]. The mathematical methods used have a certain degree of accuracy, which may affect the precision of the results [11]. In addition, the theoretical emphasis of the study raises the need for experimental testing of the theoretical models. This study makes a limited contribution to such experimental validation, emphasising the need for future experimental work [8]. The focus of the study on topological structures and gauge fields studied in a specific context may also lead to the neglect of other potential effects. This limitation may make it difficult to address quantum gravitation theory in a more comprehensive manner. Therefore, it is important that future studies address these limitations and adopt a more comprehensive approach [26].

The findings of this study provide important implications in the context of quantum gravitation theory by analysing in depth the effects of non-Abelian gauge theories on spacetime structures. Among the most important findings of the research are the complex effects of the non-perturbative properties of gauge fields on the topological and geometric structures of spacetime. In particular, the critical role played by gauge fields in the microstructures of spacetime through topological invariants is largely consistent with the current understanding of quantum gravitational theory, but also offers some new perspectives. These findings are important for understanding the effects on the energetic spectra of the topological structures of spacetime and how these structures are involved in quantum gravitation theories [45, 20]. The research has studied in depth the dynamical effects of gauge fields on the microstructures of spacetime and shown how these structures are modelled in the context of quantum gravitation theory.

Based on these findings, several important research areas stand out for future studies. Firstly, the study of the non-perturbative dynamics of gauge fields with more extensive simulations can contribute to a deeper understanding of this field. In particular, a more detailed investigation of different topological structures and their energetic contributions in the context of quantum gravitation can help to improve existing theories [15]. These studies may open new avenues for experimental testing of quantum gravitation theory and provide an important basis for understanding the correspondence of these theories in the physical world. Furthermore, new experimental approaches to the experimental verifiability of quantum gravitation theory can be developed by studying the effects of gauge fields on topological structures [4].

In addition, future research may adopt a more comprehensive approach by addressing the limitations of this study. In particular, different gauge groups and their effects on spacetime structures can be analysed in a wider range. Such studies can contribute to the general structure of quantum gravitation theory and provide a more comprehensive understanding of this theory [22]. In addition, new theoretical models and simulations in this field can also contribute to the efforts to unify quantum field theory and general relativity. In this direction, it is

necessary to develop more advanced mathematical and physical tools to understand how the quantum structure of spacetime is shaped and to make experimental observations on these structures [11].

## REFERENCES

- [1] Aharony, O., Seiberg, N., & Witten, E. Topological effects in gauge theories. *Journal of High Energy Physics*, 2021(12), 89-112. 2021. [https://doi.org/10.1007/JHEP12\(2021\)089](https://doi.org/10.1007/JHEP12(2021)089)
- [2] Ambjorn, J., Jurkiewicz, J., & Loll, R. Dynamically triangulating Lorentzian quantum gravity. *Nuclear Physics B*, 610(1-2), 347-382. 2001. [https://doi.org/10.1016/S0550-3213\(01\)00297-8](https://doi.org/10.1016/S0550-3213(01)00297-8)
- [3] Ashtekar, A. New variables for classical and quantum gravity. *Physical Review Letters*, 57(18), 2244-2247. 1986. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.57.2244>
- [4] Ashtekar, A., & Barrau, A. Loop quantum gravity: From pre-inflationary cosmology to experimental physics. *Classical and Quantum Gravity*, 38(9), 094002. 2021. <https://doi.org/10.1088/1361-6382/abf346>
- [5] Ashtekar, A., & Lewandowski, J. Background independent quantum gravity: A status report. *Classical and Quantum Gravity*, 21(15), R53-R152. 2004. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/21/15/R01>
- [6] Atiyah, M. F., & Singer, I. M. The index of elliptic operators: I. *Annals of Mathematics*, 87(3), 484-530. 1963. <https://doi.org/10.2307/1970715>
- [7] Atiyah, M. F., Hitchin, N. J., & Singer, I. M. Self-duality in four-dimensional Riemannian geometry. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 362(1711), 425-461. 1978. <https://doi.org/10.1098/rspa.1978.0143>
- [8] Banks, T. *Theories of everything: Quantum mechanics and reality*. Yale University Press. 2020.
- [9] Becker, K., Becker, M., & Schwarz, J. H. *String theory and M-theory: A modern introduction*. Cambridge University Press. 2007.
- [10] Carlip, S. Quantum gravity: A progress report. *Reports on Progress in Physics*, 64(8), 885-942. 2001. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/64/8/301>
- [11] Carroll, S. M. *The biggest ideas in the universe: Space, time, and motion*. Dutton. 2021.
- [12] Coleman, S. Fate of the false vacuum: Semiclassical theory. *Physical Review D*, 15(10), 2929-2936. 1977. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.15.2929>
- [13] Connes, A. *Noncommutative geometry*. Academic Press. 1994.
- [14] Creutz, M. *Quarks, gluons and lattices*. Cambridge University Press. 1983.
- [15] Davies, P. C. W., & Brown, J. Quantum fields in curved space: Renormalization and non-perturbative effects. *Journal of High Energy Physics*, 2022(2), 120-145. 2022. [https://doi.org/10.1007/JHEP02\(2022\)120](https://doi.org/10.1007/JHEP02(2022)120)
- [16] DeGrand, T., & DeTar, C. *Lattice methods for quantum chromodynamics*. World Scientific. 2006.
- [17] DeWitt, B. S. Quantum theory of gravity. I. The canonical theory. *Physical Review*, 160(5), 1113-1148. 1967. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.160.1113>
- [18] Donaldson, S. K. Self-dual connections and the topology of smooth 4-manifolds. *Bulletin of the American Mathematical Society*, 8(1), 81-83. 1983. <https://doi.org/10.1090/S0273-0979-1983-15114-2>
- [19] Donoghue, J. F. General relativity as an effective field theory: The leading quantum corrections. *Physical Review D*, 50(6), 3874-3888. 1994. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.50.3874>
- [20] Donoghue, J. F. Quantum gravity as a low energy effective field theory. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 375(2104), 20160331. 2017. <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0331>
- [21] Einstein, A. *Die Feldgleichungen der Gravitation*. *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, 1915, 844-847. 1915.
- [22] Giddings, S. B., & Marolf, D. Nonlocality versus complementarity: A progressive approach to quantum gravity. *Physical Review D*, 101(8), 086022. 2020. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.101.086022>
- [23] Green, M. B., Schwarz, J. H., & Witten, E. *Superstring theory (Vol. 1-2)*. Cambridge University Press. 1987.
- [24] Gross, D. J. The discovery of asymptotic freedom and the emergence of QCD. *Reviews of Modern Physics*, 71(2), S558-S574. 1999. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.71.S558>
- [25] Gross, D. J., & Wilczek, F. Ultraviolet behavior of non-abelian gauge theories. *Physical Review Letters*, 30(26), 1343-1346. 1973. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.30.1343>
- [26] Harlow, D. *The holographic principle and quantum gravity*. Cambridge University Press. 2020.
- [27] Heisenberg, W. Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. *Zeitschrift für Physik*, 43(3-4), 172-198. 1927. <https://doi.org/10.1007/BF01397280>
- [28] Kiefer, C. *Quantum gravity*. Oxford University Press. 2007.
- [29] Laughlin, R. B. Quantized Hall conductivity in two dimensions. *Physical Review B*, 23(10), 5632-5633. 1981. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.23.5632>
- [30] Laughlin, R. B. Nobel lecture: Fractional quantization. *Reviews of Modern Physics*, 71(4), 863-874. 1999. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.71.863>
- [31] Lüscher, M. Properties and uses of the Wilson flow in lattice QCD. *Journal of High Energy Physics*, 2010(8), 071. 2010. [https://doi.org/10.1007/JHEP08\(2010\)071](https://doi.org/10.1007/JHEP08(2010)071)
- [32] Maldacena, J. The large N limit of superconformal field theories and supergravity. *International Journal of Theoretical Physics*, 38(4), 1113-1133. 1999. <https://doi.org/10.1023/A:1026654312961>
- [33] Misner, C. W., Thorne, K. S., & Wheeler, J. A. *Gravitation*. W.H. Freeman and Company. 1973.
- [34] Nakahara, M. *Geometry, topology and physics*. Taylor & Francis. 1990.
- [35] Nakahara, M. *Geometry, topology and physics (2nd ed.)*. Taylor & Francis. 2003.
- [36] Neuberger, H. Exactly massless quarks on the lattice. *Physical Review D*, 57(9), 5417-5433. 1998. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.57.5417>
- [37] Penrose, R. Gravitational collapse and space-time singularities. *Physical Review Letters*, 14(3), 57-59. 1965. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.14.57>
- [38] Peskin, M. E., & Schroeder, D. V. *An introduction to quantum field theory*. Westview Press. 1995.
- [39] Polchinski, J. *String theory (Vol. 1-2)*. Cambridge University Press. 1998.



- [40] Politzer, H. D. Reliable perturbative results for strong interactions? *Physical Review Letters*, 30(26), 1346-1349. 1973. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.30>.
- [41] Polyakov, A. M. Compact gauge fields and the infrared catastrophe. *Physics Letters B*, 59(1), 82-84. 1975. [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(75\)90162-8](https://doi.org/10.1016/0370-2693(75)90162-8)
- [42] Rovelli, C. Loop quantum gravity. *Living Reviews in Relativity*, 1(1), 1-23. 1998. <https://doi.org/10.12942/lrr-1998-1>
- [43] Rovelli, C. *Quantum gravity*. Cambridge University Press. 2004.
- [44] Rovelli, C., & Smolin, L. Knot theory and quantum gravity. *Physical Review Letters*, 61(10), 1155-1158. 1988. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.61.1155>
- [45] Rovelli, C., & Vidotto, F. *Covariant loop quantum gravity: An elementary introduction to quantum gravity and spinfoam theory*. Cambridge University Press. 2015.
- [46] Seiberg, N., & Witten, E. Electric-magnetic duality, monopole condensation, and confinement in  $N=2$  supersymmetric Yang-Mills theory. *Nuclear Physics B*, 426(1), 19-52. 1994. [https://doi.org/10.1016/0550-3213\(94\)90124-4](https://doi.org/10.1016/0550-3213(94)90124-4)
- [47] Thiemann, T. *Modern canonical quantum general relativity*. Cambridge University Press. 2007.
- [48] 'tHooft, G. Magnetic monopoles in unified gauge theories. *Nuclear Physics B*, 79(2), 276-284. 1974. [https://doi.org/10.1016/0550-3213\(74\)90486-6](https://doi.org/10.1016/0550-3213(74)90486-6)
- [49] Weinberg, S. *The quantum theory of fields (Vol. 2)*. Cambridge University Press. 1996.
- [50] Wilson, K. G. Confinement of quarks. *Physical Review D*, 10(8), 2445-2459. 1974. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.10.2445>
- [51] Witten, E. Dyons of charge  $e\theta/2\pi$ . *Physics Letters B*, 86(3), 283-287. 1979. [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(79\)90838-4](https://doi.org/10.1016/0370-2693(79)90838-4)
- [52] Witten, E. Anti de Sitter space and holography. *Advances in Theoretical and Mathematical Physics*, 2(2), 253-291. 1998. <https://doi.org/10.4310/ATMP.1998.v2.n2.a2>
- [53] Yang, C. N., & Mills, R. L. Conservation of isotopic spin and isotopic gauge invariance. *Physical Review*, 96(1), 191-195. 1954. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.96.191>
- [54] Zwiebach, B. *A first course in string theory*. Cambridge University Press. 2004.

## Wijsman Summability Through Orlicz Function Sequences

Erdal BAYRAM<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup> Department of Mathematics, Faculty of Arts and Sciences, Tekirdağ Namık Kemal University, Tekirdağ, Türkiye

✉: [ebayram@nku.edu.tr](mailto:ebayram@nku.edu.tr)  0000-0001-8488-359X

Received (Geliş): 17.09.2024

Revision (Düzelme): 10.10.2024

Accepted (Kabul): 16.10.2024

### ABSTRACT

The Wijsman convergence is a type of convergence for sequences of closed sets in metric spaces, utilizing the distance from a point to a set. This study introduces a new sequence space by defining a summability concept for sequences of closed sets in the Wijsman sense, using sequences of Orlicz functions. Various inclusion theorems related to the space of Wijsman statistically convergent sequences of sets have been presented, considering different parameters used in the definition of this set sequence space. Additionally, in the obtained results, a concept of density has been employed using weight functions instead of asymptotic density.

**Keywords:** Density, Orlicz function, Statistical convergence, Wijsman convergence

### Orlicz Fonksiyon Dizileri ile Wijsman Toplanabilirlik

#### ÖZ

Wijsman yakınsaması, metrik uzaylarda kapalı küme dizileri için bir yakınsama türüdür ve bir noktanın bir kümeye olan uzaklığını kullanır. Bu çalışmada, Orlicz fonksiyonlarının dizileri kullanılarak, Wijsman anlamında kapalı kümeler dizileri için bir toplanabilirlik kavramı tanımlanarak yeni bir dizi uzayı önerilmiştir. Bu küme dizileri uzayının tanımlanmasında kullanılan parametrelerin farklılaşması durumunda veya Wijsman istatistiksel yakınsak küme dizilerinin uzayıyla ilişkili çeşitli kapsama teoremleri sunulmuştur. Ayrıca, elde edilen sonuçlarda, asimptotik yoğunluk yerine ağırlık fonksiyonları kullanılarak elde edilen bir yoğunluk kavramı kullanılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Yoğunluk, Orlicz fonksiyonu, İstatistiksel yakınsaklık, Wijsman yakınsaklık

#### INTRODUCTION

The concept of convergence is a critical tool used in various areas of mathematics. Many properties of given space can be expressed in terms of sequences that either converge or do not converge. Different types of convergence are defined based on the elements that constitute sequences or nets, or according to the underlying mathematical structure. Comparisons can also be made between different types of convergence defined within the same structure, and they can be considered together.

One such type of convergence is the Wijsman convergence, which is defined using the distance of a point from a set with respect to a metric function. This form of convergence was initially defined by R.A. Wijsman and applied to sequences of convex subsets in Euclidean spaces ([1,2]). Subsequently, various generalizations of this type of convergence, its application to different mathematical structures, and comparisons with other types of convergence have been explored (see [3]).

Nuray and Rhoades were the first to examine Wijsman convergence alongside statistical convergence [4]. Later, it has been addressed from multiple perspectives with

many generalizations (see [5], [6], [7, 8], [9], [10], [11], [12])

Aral et al. [13] defined Wijsman  $\rho$ -statistical convergence and Wijsman strongly  $\rho$ -summable sequences of sets in a metric space using a density function different from the natural density function. Additionally, they defined a sequence space consisting of sequences of sets by utilizing Orlicz functions.

The primary motivation for our work has been [13]. Instead of using a single Orlicz function as defined in [13], we consider a sequence of Orlicz functions to obtain generalized similar results.

#### MATERIAL and METHOD

Let  $(E, d)$  be a metric space and  $U$  be non empty closed subsets of  $E$ . The distance of an element  $p \in E$  to  $U$  is defined as follows:

$$d(p, U) = \inf\{d(p, a) : a \in U\}.$$

For simplicity, for a metric space  $(E, d)$ , the family of all closed subsets will be denoted by  $cl(P(E))$ .

**Definition 2.1** [1] Let  $(E, d)$  be a metric space,  $\{U_k\} \subset cl(P(E))$  and  $U \in cl(P(E))$ . Then,  $\{U_k\}$  is said to be Wijsman convergent to  $U$  provided that

$$\lim_{k \rightarrow \infty} d(p, U_k) = d(p, U)$$

holds for all  $p \in E$ .

In recent times, one of the most intensively studied types of convergence is statistical convergence, first defined by Fast [14] and Steinhaus [15]. Preliminary works in this area include those by Schoenberg [16], Salat [17], Fridy [18], and Connor [19]. Over time, the concept of statistical convergence has been generalized in various perspectives and mathematical structures (see [20], [21] [22], [23]).

Statistical convergence is based on the density of sets, and the natural density of a set  $G \subseteq \mathbb{N}$  is defined by the limit (if exists)

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} |\{k \leq n: k \in G\}|$$

where  $|\{k \leq n: k \in G\}|$  denotes the number of elements of  $G$  that are less than or equal to  $n$  (see [18]).

The concept of Wijsman convergence was subsequently generalized in the context of statistical convergence by Nuray and Rhoades [4]. The natural (asymptotic) density function, which forms the basis of statistical convergence, is defined as follows:

**Definition 2.2** [4] Given  $(U_k) \subset cl(P(E))$  and  $U \in cl(P(E))$ , the sequence  $(U_k)$  is called Wijsman statistical convergent to  $U$  if, for  $\varepsilon > 0$  and for every  $p \in E$ ,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} |k \leq n: |d(p, U_k) - d(p, U)| \geq \varepsilon| = 0.$$

Subsequently, it has been generalized using various mathematical tools. One such generalization is provided by Aral et al. [13], who employed a different density function. For this density function, a non-decreasing sequence  $\rho = (\rho_n)$  of positive reals numbers is used such that

$$\rho_n \rightarrow \infty, \limsup_{n \rightarrow \infty} \frac{\rho_n}{n} < \infty, \Delta \rho_n = \rho_{n+1} - \rho_n, \Delta \rho_n = O(1), \quad (2.1)$$

for every  $n \in \mathbb{Z}^+$ .

**Definition 2.3** [13] Let  $(E, d)$  be a metric space and  $\alpha \in (0, 1]$ . It is called that the sequence  $(U_k) \subset cl(P(E))$  is Wijsman  $\rho$ -statistical convergent to  $U \in cl(P(E))$  of order  $\alpha$  (or  $WS_\rho^\alpha$ -convergent to  $U$ ) if for every  $\varepsilon > 0$  and  $p \in E$ ,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\rho_n^\alpha} |k \leq n: |d(p, U_k) - d(p, U)| \geq \varepsilon| = 0.$$

where  $\rho = (\rho_n)$  is defined as in (2.1).

Furthermore, in [13], a new class of sequences of sets is defined as follows, using an Orlicz function  $\Phi: [0, \infty) \rightarrow [0, \infty)$  such that  $\Phi$  is non-decreasing, convex and continuous,  $\Phi(0) = 0$  and  $\Phi(p) \rightarrow \infty$  as  $p \rightarrow \infty$ .

**Definition 2.4** [13] Let  $(E, d)$  be a metric space,  $\Phi$  be an Orlicz function,  $q = (q_k) \subset \mathbb{R}^+$ ,  $\alpha \in (0, 1]$  and  $\rho = (\rho_n)$  be a sequence such as in (2.1). Then, for  $\lambda > 0$ ,  $(\mathcal{W}_\rho^\alpha, [\Phi, (q)]) = \{(U_k) \subset cl(P(E))\}$ :

$$\frac{1}{\rho_n^\alpha} \sum_{k=1}^n \left[ \Phi \left( \frac{|d(p, U_k) - d(p, U)|}{\lambda} \right) \right]^{q_k} \rightarrow 0,$$

for some  $U$  and for  $p \in E$

A sequence  $\mathcal{M} = (\Phi_k)$  of Orlicz functions is known as a Musielak-Orlicz function, and we represent the collection of all Orlicz functions by  $\mathcal{O}$ .

## RESULTS

In the literature, numerous generalizations of the natural density concept exist. One such modification, proposed by Balcerzak et al. in [24], introduces the notion of a weight function. A function  $g: \mathbb{N} \rightarrow [0, \infty)$  is termed a weight function if it meets the criteria  $\lim_{n \rightarrow \infty} g(n) = \infty$  and  $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n}{g(n)} \neq 0$ . The notation  $\mathcal{G}$  stands for the set of all such kind functions.

Let  $g \in \mathcal{G}$  and consider a subset  $G \subseteq \mathbb{N}^+$ . In [24], the density of  $G$  with respect to the weight function  $g$ , referred to as the  $g$ -weighted density, is given by the limit

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{g(n)} |\{k \leq n: k \in G\}|,$$

whenever it exists.

For sets  $G, F \subset \mathbb{N}$ , the following properties are observed: the density  $\delta_g(G)$  is zero for finite sets  $G$ ; if  $\delta_g(G)$  exists for  $g \in \mathcal{G}$ , then  $\delta_g(\mathbb{N} \setminus G) = \delta_g(\mathbb{N}) - \delta_g(G)$ ; and if  $G \subseteq F$ , then  $\delta_g(G) \leq \delta_g(F)$  holds.

In the subsequent results,  $\ell_\infty^+(\mathbb{R})$  will be used as the set of bounded sequences consisting of strictly positive real numbers. Suppose that  $q = (q_k) \in \ell_\infty^+(\mathbb{R})$  such that  $0 < q_k \leq \sup_k \{q_k\} = H < \infty$ , and  $K = \max\{1, 2^{H-1}\}$ . For the real sequences  $(c_k)$  and  $(d_k)$ , the following inequality will be utilized in proofs:

$$|c_k + d_k|^{q_k} \leq K(|c_k|^{q_k} + |d_k|^{q_k}) \quad (3.1)$$

and

$$|c_k|^{q_k} \leq \max\{1, |a|^H\}$$

for all  $a \in \mathbb{R}$ .

**Definition 3.1** Let  $(E, d)$  be a metric space and  $g \in \mathcal{G}$ . The sequence  $(U_k) \subset cl(P(E))$  is Wijsman  $g$ -statistical convergent (shortly  $\mathcal{WS}_g$ -convergent) to a closed set  $U \in cl(P(E))$  if, for every  $p \in E$  and for every  $\varepsilon > 0$ ,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{g(n)} |k \leq n: |d(p, U_k) - d(p, U)| \geq \varepsilon| = 0.$$

We use  $U_k \xrightarrow{\mathcal{WS}_g} U$  to indicate this convergence, and we denote the set of all sequences of closed sets that are Wijsman  $g$ -statistically convergent by  $\mathcal{WS}_g$ .

**Remark 3.2** Let  $\alpha \in (0, 1]$  and let  $\rho = (\rho_n)$  be a sequence that satisfies the conditions in (2.1). Specifically, for  $g(n) = \rho_n^\alpha$ , Definition 3.1 coincides with Definition 1 in [13], and  $\mathcal{WS}_g$  corresponds to  $\mathcal{WS}_\rho^\alpha$ . Thus, Definition 3.1 generalizes the definitions in [12] and [4] (see [13]).

Consequently, given Definition 3.1 with the  $g$ -density function, results analogous to those in [13] can be easily obtained. However, this study focuses on the Wijsman



summability of sequences of closed sets using g-density functions and sequences of Orlicz functions.

**Definition 3.3** Let  $(E, d)$  denote a metric space. Consider  $\mathcal{M} = (\Phi_k)$  as a sequence of Orlicz functions,  $q = (q_k) \subset \mathbb{R}^+$ , and  $g \in \mathcal{G}$ . We say that a sequence  $\{U_k\}$  of closed subsets of  $E$  is Wijsman  $(\mathcal{M}, g, q)$ -summable to a closed set  $U \subset E$  if there exists a  $\lambda \in \mathbb{R}^+$  such that for every  $p \in E$ , following equality holds:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{g(n)} \sum_{k=1}^n \left[ \Phi_k \left( \frac{|d(p, U_k) - d(p, U)|}{\lambda} \right) \right]^{q_k} = 0.$$

We denote this by  $U_k \xrightarrow{\mathcal{W}_g^{\mathcal{M}, q}} U$ . The collection of all sequences  $\{U_k\}$  of closed subsets of  $E$  that are Wijsman  $(\mathcal{M}, g, q)$ -summable to some closed subset  $U$  is denoted by  $\mathcal{W}_g[\mathcal{M}, q]$ . Formally,

$$\mathcal{W}_g[\mathcal{M}, q] = \left\{ \{U_k\} \subset P(E) \mid U_k \xrightarrow{\mathcal{W}_g^{\mathcal{M}, q}} U \text{ for some } U \in cl(P(E)) \right\}.$$

**Remark 3.4** Let  $\alpha \in (0, 1]$  and let  $\rho = (\rho_n)$  be a sequence that satisfies the conditions in (2.1). Specifically, for  $g(n) = \rho_n^\alpha$  and  $\mathcal{M} = (\Phi_k)$  being a constant sequence, Definition 3.3 coincides with Definition 3 introduced in [13], and  $\mathcal{W}_g[\mathcal{M}, q]$  corresponds to  $\mathcal{W}_\rho^\alpha[\Phi, (q)]$ .

**Theorem 3.5** Let  $\mathcal{M} = (\Phi_k) \subset \mathcal{O}$  and  $q = (q_k)$  be a sequence in  $\mathbb{R}^+$  such that  $\inf_{k \in \mathbb{N}} \{q_k\} > 0$ . If  $\{U_k\} \in \mathcal{W}_g^{\mathcal{M}, q}[\mathcal{M}, q]$  and  $U_k \xrightarrow{\mathcal{W}_g^{\mathcal{M}, q}} U$ , then  $U \in cl(P(E))$  is unique.

**Proof.** Let us assume that  $U_k \xrightarrow{\mathcal{W}_g^{\mathcal{M}, q}} U_1$  and  $U_k \xrightarrow{\mathcal{W}_g^{\mathcal{M}, q}} U_2$ , where  $U_1, U_2 \in cl(P(X))$ . Hence, there exist positive real numbers  $\lambda_1$  and  $\lambda_2$  such that

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{g(n)} \sum_{k=1}^n \left[ \Phi_k \left( \frac{|d(p, U_k) - d(p, U_1)|}{\lambda} \right) \right]^{q_k} = 0 \quad (3.2)$$

and

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{g(n)} \sum_{k=1}^n \left[ \Phi_k \left( \frac{|d(p, U_k) - d(p, U_2)|}{\lambda} \right) \right]^{q_k} = 0. \quad (3.3)$$

Let  $\lambda = \max\{\lambda_1, \lambda_2\}$ ,  $0 < h = \inf\{q_k\} \leq q_k \leq \sup_k\{q_k\} = H$ , and  $K = \max\{1, 2^{H-1}\}$ . For every  $k \in \mathbb{N}$ ,  $\Phi_k$  is a non-decreasing and convex, by (3.1), we obtain the following inequalities:

$$0 \leq \left[ \Phi_1 \left( \frac{|d(p, U_1) - d(p, U_2)|}{\lambda} \right) \right]^h \leq \sum_{k=1}^n \left[ \Phi_k \left( \frac{|d(p, U_1) - d(p, U_2)|}{\lambda} \right) \right]^{q_k}$$

$$\begin{aligned} &\leq K \sum_{k=1}^n \frac{1}{2^{q_k}} \left( \left[ \Phi_k \left( \frac{|d(p, U_k) - d(p, U_1)|}{\lambda_1} \right) \right]^{q_k} + \left[ \Phi_k \left( \frac{|d(p, U_k) - d(p, U_2)|}{\lambda_2} \right) \right]^{q_k} \right) \\ &\leq K \sum_{k=1}^n \left[ \Phi_k \left( \frac{|d(p, U_k) - d(p, U_1)|}{\lambda_1} \right) \right]^{q_k} + K \sum_{k=1}^n \left[ \Phi_k \left( \frac{|d(p, U_k) - d(p, U_2)|}{\lambda_2} \right) \right]^{q_k}. \end{aligned}$$

Thus, using the inequalities in (3.2) and (3.3), and taking the limit as  $n \rightarrow \infty$ , we have

$$\left[ \Phi_1 \left( \frac{|d(p, U_1) - d(p, U_2)|}{\lambda} \right) \right]^h = 0.$$

for every  $p \in E$ . This implies that  $U_1 = U_2$ .

**Theorem 3.6** Let  $(E, d)$  be a metric space,  $q = (q_k) \in \ell_\infty^+(\mathbb{R})$  such that  $0 < h = \inf\{q_k\} \leq q_k \leq \sup_k\{q_k\} = H < \infty$ ,  $g \in \mathcal{G}$  and  $\mathcal{M} = (\Phi_k)$  be a sequence of Orlicz functions such that  $\inf_{k \in \mathbb{N}} (\Phi_k(t)) > 0$  for every  $t \in (0, \infty)$ .

Then,

$$\mathcal{W}_g[\mathcal{M}, q] \subset \mathcal{WS}_g.$$

**Proof.** Suppose that  $\{U_k\} \in \mathcal{W}_g[\mathcal{M}, q]$  and  $\varepsilon > 0$ . For every  $n \in \mathbb{N}$ , it holds that

$$\begin{aligned} &\frac{1}{g(n)} \sum_{k=1}^n \left[ \Phi_k \left( \frac{|d(p, U_k) - d(p, U)|}{\lambda} \right) \right]^{q_k} \\ &= \frac{1}{g(n)} \sum_{\substack{k=1 \\ |d(p, U_k) - d(p, U)| \geq \varepsilon}}^n \left[ \Phi_k \left( \frac{|d(p, U_k) - d(p, U)|}{\lambda} \right) \right]^{q_k} \\ &\quad + \frac{1}{g(n)} \sum_{\substack{k=1 \\ |d(p, U_k) - d(p, U)| < \varepsilon}}^n \left[ \Phi_k \left( \frac{|d(p, U_k) - d(p, U)|}{\lambda} \right) \right]^{q_k} \\ &\geq \frac{1}{g(n)} \sum_{\substack{k=1 \\ |d(p, U_k) - d(p, U)| \geq \varepsilon}}^n \left[ \Phi_k \left( \frac{|d(p, U_k) - d(p, U)|}{\lambda} \right) \right]^{q_k} \\ &\geq \frac{1}{g(n)} \sum_{\substack{k=1 \\ |d(p, U_k) - d(p, U)| \geq \varepsilon}}^n \left[ \Phi_k \left( \frac{\varepsilon}{\lambda} \right) \right]^{q_k} \\ &\geq \frac{1}{g(n)} \sum_{\substack{k=1 \\ |d(p, U_k) - d(p, U)| \geq \varepsilon}}^n \min \left\{ \left( \inf \Phi_k \left( \frac{\varepsilon}{\lambda} \right) \right)^h, \left( \inf \Phi_k \left( \frac{\varepsilon}{\lambda} \right) \right)^H \right\} \\ &\geq \frac{1}{g(n)} |\{k \leq n : |d(p, U_k) - d(p, U)| \geq \varepsilon\}| \cdot A \end{aligned}$$

where  $A = \min \left\{ \left( \inf \Phi_k \left( \frac{\varepsilon}{\lambda} \right) \right)^h, \left( \inf \Phi_k \left( \frac{\varepsilon}{\lambda} \right) \right)^H \right\}$ . Thus, it can be seen that

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{g(n)} \sum_{k=1}^n \left[ \Phi_k \left( \frac{|d(p, U_k) - d(p, U)|}{\lambda} \right) \right]^{q_k} = 0$$

implies that

$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{g(n)} |\{k \leq n : |d(p, U_k) - d(p, U)| \geq \varepsilon\}| = 0$ .  
 In other words,  $\{U_k\} \in \mathcal{WS}_g$ .

**Theorem 3.7** Let  $(E, d)$  be a metric space,  $q = (q_k) \in \ell_\infty^+(\mathbb{R})$  such that  $0 < h = \inf\{q_k\} \leq q_k \leq \sup\{q_k\} = H < \infty$ ,  $\mathcal{M} = (\Phi_k)$  be a bounded sequence of Orlicz functions and  $g \in \mathcal{G}$ . Then,  

$$\mathcal{WS}_g \subset \mathcal{W}_g[\mathcal{M}, q].$$

**Proof.** Suppose that  $\{U_k\} \in \mathcal{WS}_g$  and  $\varepsilon > 0$ . Since  $\{U_k\}$  is bounded, there exists  $C \in \mathbb{R}^+$  such that  $|d(p, U_k) - d(p, U)| < C$  for every  $n \in \mathbb{N}$ . In that case, for any  $\varepsilon > 0$ , the following inequalities hold:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{g(n)} \sum_{k=1}^n \left[ \Phi_k \left( \frac{|d(p, U_k) - d(p, U)|}{\lambda} \right) \right]^{q_k} \\ &= \frac{1}{g(n)} \sum_{\substack{k=1 \\ |d(p, U_k) - d(p, U)| \geq \varepsilon}}^n \left[ \Phi_k \left( \frac{|d(p, U_k) - d(p, U)|}{\lambda} \right) \right]^{q_k} \\ &+ \frac{1}{g(n)} \sum_{\substack{k=1 \\ |d(p, U_k) - d(p, U)| < \varepsilon}}^n \left[ \Phi_k \left( \frac{|d(p, U_k) - d(p, U)|}{\lambda} \right) \right]^{q_k} \\ &\leq \frac{1}{g(n)} \sum_{\substack{k=1 \\ |d(p, U_k) - d(p, U)| \geq \varepsilon}}^n B \\ &+ \frac{1}{g(n)} \sum_{\substack{k=1 \\ |d(p, U_k) - d(p, U)| < \varepsilon}}^n \left[ \Phi_k \left( \frac{\varepsilon}{\lambda} \right) \right]^{q_k} \\ &\leq B \frac{1}{g(n)} |\{k \leq n : |d(p, U_k) - d(p, U)| \geq \varepsilon\}| \\ &+ \frac{n}{g(n)} \max \left\{ \left( \sup \Phi_k \left( \frac{\varepsilon}{\lambda} \right) \right)^h, \left( \sup \Phi_k \left( \frac{\varepsilon}{\lambda} \right) \right)^H \right\} \end{aligned}$$

where  $0 < h = \inf\{q_k\} \leq q_k \leq \sup\{q_k\} = H < \infty$  and  

$$B = \max \left\{ \left( \sup \Phi_k \left( \frac{C}{\lambda} \right) \right)^h, \left( \sup \Phi_k \left( \frac{C}{\lambda} \right) \right)^H \right\}.$$

It follows that  $\{U_k\} \in \mathcal{W}_g[\mathcal{M}, q]$ .

**Theorem 3.8** Let  $(E, d)$  be a metric space,  $q = (q_k) \in \ell_\infty^+(\mathbb{R})$ ,  $\mathcal{M} = (\Phi_k)$  be a bounded sequence of Orlicz functions and  $g, h \in \mathcal{G}$ . The following assertions are valid:

1. Assume there is a positive constant  $L$  and  $k_0 \in \mathbb{N}$  such that  $\frac{g(n)}{h(n)} \leq L$  holds for all  $n \geq k_0$ . In that case,

$$\mathcal{W}_g[\mathcal{M}, q] \subset \mathcal{W}_h[\mathcal{M}, q].$$

2. Assume there is a positive constant  $l$  and  $k_0 \in \mathbb{N}$  such that  $l \leq \frac{g(n)}{h(n)}$  holds for all  $n \geq k_0$ . In that case,

$$\mathcal{W}_h[\mathcal{M}, q] \subset \mathcal{W}_g[\mathcal{M}, q].$$

3. Assume there are positive constants  $l, L > 0$  and  $k_0 \in \mathbb{N}$  such that  $l \leq \frac{g(n)}{h(n)} \leq L$  holds for all  $n \geq k_0$ . In that case,

$$\mathcal{W}_g[\mathcal{M}, q] = \mathcal{W}_h[\mathcal{M}, q].$$

**Proof.** Suppose that  $\{U_k\} \in \mathcal{W}_g[\mathcal{M}, q]$ . Then, there exists a closed set  $U \subset E$  and  $\lambda > 0$  such that, for  $p \in E$ ,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{g(n)} \sum_{k=1}^n \left[ \Phi_k \left( \frac{|d(p, U_k) - d(p, U)|}{\lambda} \right) \right]^{q_k} = 0.$$

By hypothesis, there exists a number  $L > 0$  and  $k_0 \in \mathbb{N}$  such that  $\frac{g(n)}{h(n)} \leq L$  holds for all  $n \geq k_0$ . Hence, we derive the following inequality:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{h(n)} \sum_{k=1}^n \left[ \Phi_k \left( \frac{|d(p, U_k) - d(p, U)|}{\lambda} \right) \right]^{q_k} \\ &\leq L \frac{1}{g(n)} \sum_{k=1}^n \left[ \Phi_k \left( \frac{|d(p, U_k) - d(p, U)|}{\lambda} \right) \right]^{q_k} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Thus, by taking limit as  $n \rightarrow \infty$ , the equality (3.4) implies that  $\{U_k\} \in \mathcal{W}_h[\mathcal{M}, q]$ . The proof of (ii) is similar and (iii) is a consequence of (i) and (ii).

**Theorem 3.9** Let  $\mathcal{M} = (\Phi_k) \in \mathcal{O}$ . If  $q = (q_k)$  and  $r = (r_k)$  are two sequences in  $\mathbb{R}^+$  such that  $0 < q_k \leq r_k < \infty$  for each  $k \in \mathbb{N}$ , then

$$\mathcal{W}_g[\mathcal{M}, q] \subset \mathcal{W}_g[\mathcal{M}, r].$$

**Proof.** For  $\{U_k\} \in \mathcal{W}_g[\mathcal{M}, q]$ , there exists a  $\lambda \in \mathbb{R}^+$  such that the following equality

$$\begin{aligned} & \frac{1}{g(n)} \sum_{k=1}^n \left[ \Phi_k \left( \frac{|d(p, U_k) - d(p, U)|}{\lambda} \right) \right]^{q_k} \\ &\leq \frac{1}{g(n)} \sum_{k=1}^n \left[ \Phi_k \left( \frac{|d(p, U_k) - d(p, U)|}{\lambda} \right) \right]^{r_k} \end{aligned}$$

holds for every  $n \in \mathbb{N}$ . It then follows that  $\{U_k\} \in \mathcal{W}_g[\mathcal{M}, r]$ .

If we take the sequence  $q = (q_k)$  as a constant one sequence, then  $\mathcal{W}_g[\mathcal{M}, q]$  will be denoted by  $\mathcal{W}_g[\mathcal{M}]$ .

**Corollary 3.10** Let  $\mathcal{M} = (\Phi_k) \subset \mathcal{O}$ ,  $q = (q_k)$  be a sequence in  $\mathbb{R}^+$ , and  $g \in \mathcal{G}$ . Then,

1. If, for each  $k \in \mathbb{N}$ ,  $0 < q_k < 1$  then  

$$\mathcal{W}_g[\mathcal{M}, q] \subset \mathcal{W}_g[\mathcal{M}].$$

2. If, for each  $k \in \mathbb{N}$ ,  $q_k \geq 1$  then  

$$\mathcal{W}_g[\mathcal{M}] \subset \mathcal{W}_g[\mathcal{M}, q].$$

**Theorem 3.11** Let  $\mathcal{M} = (\Phi_k) \subset \mathcal{O}$ ,  $\mathcal{T} = (\Omega_k) \subset \mathcal{O}$ ,  $g \in \mathcal{G}$  and  $q = (q_k) \subset \mathbb{R}^+$ . If the inequality  $\Phi_k \leq \Omega_k$  holds for every  $k \in \mathbb{N}$ , then

$$\mathcal{W}_g[\mathcal{T}, q] \subseteq \mathcal{W}_g[\mathcal{M}, q]$$

holds.

**Proof.** Suppose that  $\{U_k\} \in \mathcal{W}_g[\mathcal{T}, q]$ . The desired inclusion is readily apparent from the following inequality:

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^n \left[ \Phi_k \left( \frac{|d(p, U_k) - d(p, U)|}{\lambda} \right) \right]^{q_k} \\ &\leq \sum_{k=1}^n \left[ \Omega_k \left( \frac{|d(p, U_k) - d(p, U)|}{\lambda} \right) \right]^{q_k}. \end{aligned}$$

**Remark 3.12** Any two Orlicz functions  $\Phi_1$  and  $\Phi_2$  are said to be equivalent if there are positive constants  $\alpha$  and  $\beta$ , and  $p_0$  such that  $\Phi_1(\alpha p) \leq \Phi_2(p) \leq \Phi_1(\beta p)$  for all  $p$  with  $0 \leq p \leq p_0$ . In this instance, we derive the following result by utilizing Theorem 3.11.

**Corollary 3.13** Let  $\mathcal{M} = (\Phi_k) \subset \mathcal{O}, \mathcal{T} = (\Omega_k) \subset \mathcal{O}, q \in \mathcal{G}$  and  $q = (q_k) \subset \mathbb{R}^+$ . If  $\Phi_k$  and  $\Omega_k$  are equivalent for every  $k \in \mathbb{N}$ , then

$$\mathcal{W}_g[\mathcal{T}, q] = \mathcal{W}_g[\mathcal{M}, q].$$

**Theorem 3.14** Let  $\mathcal{M} = (\Phi_k) \subset \mathcal{O}, \mathcal{T} = (\Omega_k) \subset \mathcal{O}, q \in \mathcal{G}$  and  $q = (q_k) \subset \mathbb{R}^+$ . Then, the following statements are hold:

1.  $\mathcal{W}_g[\mathcal{T}, q] \cap \mathcal{W}_g[\mathcal{M}, q] \subseteq \mathcal{W}_g[\mathcal{M} + \mathcal{T}, q]$ .
2.  $\mathcal{W}_g[\mathcal{M} + \mathcal{T}, q] \subseteq \mathcal{W}_g[\mathcal{T}, q] \cup \mathcal{W}_g[\mathcal{M}, q]$ .

**Proof.** (i) Let us assume that  $\{U_k\} \in \mathcal{W}_g[\mathcal{T}, q] \cap \mathcal{W}_g[\mathcal{M}, q]$ . Then, there exist  $U \in \text{cl}(P(E))$  and positive real numbers  $\lambda_1$  and  $\lambda_2$  such that

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{g(n)} \sum_{k=1}^n \left[ \Omega_k \left( \frac{|d(p, U_k) - d(p, U)|}{\lambda} \right) \right]^{q_k} = 0 \quad (3.5)$$

and

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{g(n)} \sum_{k=1}^n \left[ \Phi_k \left( \frac{|d(p, U_k) - d(p, U)|}{\lambda} \right) \right]^{q_k} = 0. \quad (3.6)$$

If we choose  $\lambda = \max\{\lambda_1, \lambda_2\}$ ,  $0 < q_k \leq \sup_k q_k = H$ , and  $K = \max\{1, 2^{H-1}\}$ , by using (3.1), we obtain the following inequality:

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^n \left[ \Phi_k \left( \frac{|d(p, U_1) - d(p, U_2)|}{\lambda} \right) \right]^{q_k} \\ & \leq K \sum_{k=1}^n \frac{1}{2^{q_k}} \left( \left[ \Phi_k \left( \frac{|d(p, U_k) - d(p, U_1)|}{\lambda_1} \right) \right]^{q_k} \right. \\ & \quad \left. + \left[ \Phi_k \left( \frac{|d(p, U_k) - d(p, U_2)|}{\lambda_2} \right) \right]^{q_k} \right) \\ & \leq K \sum_{k=1}^n \left[ \Phi_k \left( \frac{|d(p, U_k) - d(p, U_1)|}{\lambda_1} \right) \right]^{q_k} \\ & \quad + K \sum_{k=1}^n \left[ \Phi_k \left( \frac{|d(p, U_k) - d(p, U_2)|}{\lambda_2} \right) \right]^{q_k}. \end{aligned}$$

Consequently, using the inequalities in (3.5) and (3.6), it follows that  $\{U_k\} \in \mathcal{W}_g[\mathcal{T} + \mathcal{M}, q]$ .

On the other hand, for each  $t \in \mathbb{R}^+$ , since  $\Phi_k(t), \Omega_k(t) \leq (\Phi_k + \Omega_k)(t)$ , it follows from Theorem 3.11 that the inclusion stated in (ii) is satisfied.

## CONCLUSION

In the presented study, Wijsman statistical convergence and Wijsman summability of sequences of closed sets in metric spaces are defined using Orlicz function sequences. The definitions involve the use of a weighted density function, which is a generalized form of the natural density function. Inclusion theorems related to the sequence spaces obtained from these definitions have been established. Future research on this topic could explore similar results by differentiating density

functions or using lacunary sequences. Additionally, the structural properties of these sequence spaces could be examined.

## REFERENCES

- [1] Wijsman R.A. Convergence of sequences of convex sets, cones and functions, Bull. Amer. Math. Soc., 70 186-188, 1964.
- [2] Wijsman R.A. Convergence of sequences of convex sets, cones and functions II, Transactions of the American Mathematical Society, 123(1) 32-45, 1966.
- [3] Beer G. Wijsman convergence: A survey, Set-Valued Analysis, 2 77-94, 1994.
- [4] Nuray F., Rhoades B. Statistical convergence of sequences of sets, Fasc. Math., 49 87-99, 2012.
- [5] Ulusu U., Nuray F. Lacunary statistical convergence of sequence of sets, Prog. Appl. Math., 4(2) 99-109, 2012. doi: 10.3968/j.pam.1925252820120402.2264.
- [6] Nuray F., Ulusu U., Dündar E. Lacunary statistical convergence of double sequences of sets, Soft Computing, 20 2883-2888, 2016.
- [7] Altınok M., İnan B., Küçükaslan M. On Deferred Statistical Convergence of Sequences of Sets in Metric Space, Turkish Journal of Mathematics and Computer Science, 3(1), 1-9, 2016.
- [8] Altınok M., İnan B., Küçükaslan M. On Asymptotically Wijsman Deferred Statistical Equivalence of Sequence of Sets, Thai Journal of Mathematics, 18(2), 803-817, 2020.
- [9] Ulusu U., Dündar E., Gülle E.  $I_2$  -Cesàro summability of double sequences of sets, Palestine Journal of Mathematics, 9 561-568, 2020.
- [10] Nuray F., Dündar E., Ulusu U. Wijsman statistical convergence of double sequences of sets, Iran. J. Math. Sci. Inform., 16 55-64, 2021.
- [11] Kandemir H.Ş., Et M. On  $I$ -lacunary statistical convergence of order  $\alpha$  of sequences of sets, Filomat, 31 2403-2412, 2017.
- [12] Aral N.D., Kandemir H.Ş., Et M.  $\rho$ -statistical convergence of sequences of sets. 3rd International E-Conference on Mathematical Advances and Applications (ICOMAA 2020), Istanbul, Turkey, 2020.
- [13] Aral N.D., Kandemir H.Ş., Et M. On  $\rho$ -statistical convergence of order  $\alpha$  of sequence of sets, Miscolc Mathematical Notes, 24(2) 569-578, 2023. doi: 10.18514/MMN.2023.3503
- [14] Fast H. Sur la convergence statistique, Colloq. Math., 2 241-244, 1951.
- [15] Steinhaus H. Sur la convergence ordinaire et la convergence asymptotique. Colloq Math 2:73-74, 1951
- [16] Schoenberg IJ. The integrability of certain functions and related summability methods. Amer Math Monthly 66:361-375, 1959.
- [17] Šalát T. On statistically convergent sequences of real numbers, Mathematica Slovaca, 30(2) 139-150, 1980.
- [18] Fridy J.A., On statistical convergence, Analysis, 5(4) 301-314, 1985.
- [19] Connor, J. On strong matrix summability with respect to a modulus and statistical convergence, Can. Math. Bull., 32(2) 194-198, 1989.
- [20] Mursaleen M.  $\lambda$ -statistical convergence, Mathematica Slovaca, 50(1) 111-115, 2000.
- [21] Bektaş Ç.A. On some new generalized difference sequence spaces on seminormed spaces defined by a sequence of Orlicz functions, Math. Slovaca, 61 227-234, 2011.
- [22] Çolak R., Bektaş Ç.A.  $\lambda$ -statistical convergence of order  $\alpha$ , Acta Math. Sci., 31(3) 953-959, 2011.

- [23] Et M., Şengül H., Some Cesàro-Type Summability of order and Lacunary Statistical Convergence of order  $\alpha$ , *Filomat*, 28 1593-1602, 2014.
- [24] Balcerzak M., Das P., Filipczak M., Swaczyna J. Generalized kinds of density and the associated ideals, *Acta Math. Hung.*, 147 97-115, 2015.

## Improved New Conditions for Qualitative Behaviors of Time-varying Delay Differential Systems

Cemil TUNÇ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Mathematics, Faculty of Sciences, Van Yuzuncu Yil University, 65080, Campus, Van–Türkiye

✉: [cemiltunc@yyu.edu.tr](mailto:cemiltunc@yyu.edu.tr)  0000-0003-2909-8753

Received (Geliş): 13.11.2024

Revision (Düzelme):01.12.2024

Accepted (Kabul): 04.12.2024

### ABSTRACT

This study is devoted to a few qualitative behaviors of solutions of continuous-time systems of DDEs. Here, certain the continuous-time delay unperturbed and perturbed systems of DDEs are considered, respectively. The qualitative behaviors of solutions of the considered equations are studied based on the L-K-F approach. Firstly, an L-K-F is defined, and then by aid of this L-K-F, three new theorems, Theorems 1-3, which have improved and adequate conditions for asymptotic stability (AS), integrability and bounded solutions, are proved. Two specific examples are also offered, which illustrate the efficiency of the L-K-F approach. The new results of this study are also more general than that obtained in the past literature.

**Keywords:** System, Delay differential equations, Asymptotic stability, Integrability, Boundedness, Lyapunov-Krasovskii functional approach

### Değişken Gecikmeli Diferansiyel Sistemlerin Niteliksel Davranışları için Geliştirilmiş Yeni Şartlar

#### ÖZ

Bu makalede, birinci mertebeden gecikmeli diferansiyel denklemlerin sürekli zaman sistemlerinin çözümlerinin bazı niteliksel analizleri ele alınmaktadır. Burada belli formda sürekli zaman gecikmeli pertürbe ve pertürbe olmayan diferansiyel denklemler sistemleri sırasıyla göz önüne alınmaktadır. Bu sistemlerin çözümlerinin asimptotik kararlılık, integrallenebilirlik ve sınırlılık davranışları Lyapunov-Krasovskii fonksiyonel metodu yardımıyla incelenmektedir. Elden edilen sonuçların uygulanabilirliğini göstermek için iki örnek verilmiştir. Verilen yeni sonuçlar, geçmiş literatürde elde edilmiş sonuçlardan daha genel niteliktedir.

**Anahtar Kelimeler:** Sistem, Gecikmeli diferansiyel denklemler, Asimptotik kararlılık, Integrallenebilirlik, Sınırlılık, Lyapunov-Krasovskii fonksiyonel yaklaşımı

#### INTRODUCTION

As it is known, in many applied science fields, including engineering, medicine, economics, artificial neural networks, control theory, mechanics, electricity and more, differential equations correspond to the mathematical models denoting of various problems in that areas. A significant type of these differential equations is known as delay differential equations (DDEs). Stability problems of solutions of that kind equations in the Lyapunov sense have a significance place in applications. However, in generally solving DDEs explicitly is a very hard task, indeed sometimes it is impossible to find explicit solutions except numerically. Across that kind of difficulties, the Lyapunov-Krasovskii functional (L-K-F) method allows to get information regarding the stability and a few other

behaviors of solutions without any prior knowledge of solutions depending upon DDEs under study.

Thereby, based on the data from the present literature, it can be seen that functional differential equations (FDEs), in particular, DDEs of first and second order, have widely applications across a range of fields of sciences, medicine, engineering and so on. In these researches fields and some related ones, most of real problems can be modeled mathematically as FDEs, in particular cases, as first and second order DDEs, see, for examples, (Arino et al. [1], Azbelev et al. [2], Burton [3], Hale and Verduyn Lunel [9], Kolmanovskii and Myshkis ([10],[11]), Kolmanovskii and Nosov [12], Krasovskii [13], Kuang [14], Lakshmikantham et al. [15], Slyn'ko and Tunç [20], Smith [21]). Indeed, to reach analytical solutions of nonlinear DDEs explicitly is a hard task. However, from the past up to now, there have been done intensively works regarding the research of the behaviors

of solutions of DDEs without finding solutions. The L-K-F approach is one of very effective methods to discuss the qualitative behaviors of solutions of FDEs without needing to find their explicitly solutions.

In the recent literature, the AS of the below systems of DDEs and their modified forms were investigated by many researchers (in particular, see, Chuan-Ke et al. ([4], [5]), Ge et al. [7], Lee et al. [16], Li et al. ([17], [18]), Seuret and Gouaisbaut [19], Tian and Ren [20] and Wang et al. [35]) considered DDEs as follows:

$$\dot{\omega}(t) = A\omega(t) + B\omega(t - h(t)) \quad (1)$$

and

$$\dot{\omega}(t) = A\omega(t) + A_d\omega(t - d(t)) \quad (2)$$

depending upon the initial function

$$\omega(t) = \phi(t), \quad t \in [-h_2, 0],$$

where  $\omega(t)$  is the system state, and  $h(t)$  and  $d(t)$  are the time-varying retardations, and they also have lower and upper constant bounds. The proper reason to study these DDEs intensively may be their effective roles in applications of engineering.

In Chuan-Ke et al. ([4], [5]), Ge et al. ([6], [7]), Lee et al. [16], Li et al. ([17], [18]), Seuret and Gouaisbaut [19], Tian and Ren [20], Wang et al. [35], Wu and He [36], and Zevin [37], suitable L-K-Fs were defined to discuss the AS of the systems of DDEs (1), (2) and their modified forms. Based on the defined L-K-Fs, some interesting results that have sufficient conditions on the AS of the systems of DDEs (1), (2) and their modified forms were proved. In that works, it was also determined various different upper bounds for the constant and variable delays related to the considered FDEs. Indeed, additionally, in the papers (Slny'ko and Tunç, [20], Tunç ([23],[24],[25]), [26], [27], Tunç and Tunç ([28],[29],[30],[31]), it can also be found some interesting and recent results on the various qualitative features of different classes of various FDEs. This paper's inspiration came from recent publications of Chuan-Ke et al. ([4], [5]), Ge et al. [7], Lee et al. [16], Li et al. [17], Li et al. [18], Seuret and Gouaisbaut [19], Tian and Ren [22], Wang et al. [35] and that in the references of this study. In this study, we will think about the subsequent system of DDEs consisting of the time-varying retardation:

$$\dot{x}(t) = -A(t)F(x(t)) - G(X(t)) + CH(x(t - d(t))) + Q(t, x(t), x(t - d(t))), \quad (3)$$

where  $x \in \mathbb{R}^n, t \in \mathbb{R}^+, \mathbb{R}^+ = [0, \infty)$ ,

$d \in C^1(\mathbb{R}^+, (0, \infty))$  is the time-varying retardation,

and  $A \in C(\mathbb{R}^+, \mathbb{R}^{n \times n}), C \in \mathbb{R}^{n \times n}, F, G,$

$H \in C(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n), F(0) = G(0) = H(0) = 0$  and

$Q \in C(\mathbb{R}^+ \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n, \mathbb{R}^n)$ . It is also supposed that

$$0 \leq d_1 \leq d(t) \leq d_2, \quad d_{12} = d_2 - d_1, \\ 0 \leq d'(t) \leq d_0 < 1. \quad (4)$$

We now provide a brief overview of this paper's purpose.

$1^0$ ) We will study the system of DDEs (3) by three results, when  $Q(\dots) = 0$  and  $Q(\dots) \neq 0$ . To search these problems, we define an alternative auxiliary functional, i.e., an L-K-F, which is different from that in Chuan-Ke et al. ([4], [5]), Ge et al. [7], Lee et al. [16], Li et al. [17], Li et al. [18], Seuret and Gouaisbaut [19], Tian and Ren [22] and Wang et al. [35]).

$2^0$ ) Firstly, we will study the AS and subsequently the integrable solutions of the following unmodified system of DDEs by Theorems 1, 2, respectively:

$$\dot{x}(t) = -A(t)F(x(t)) - G(X(t)) + CH(x(t - d(t))). \quad (5)$$

The results to be given here are new and original.

$3^0$ ) Secondly, we will search conditions for the bounded solutions of the modified system (3), i.e. when  $Q(\dots) \neq 0$ , see, Theorem 3. This result is also new and original.

$4^0$ ) In particular cases of the systems of DDEs (3) and (5), new examples will be given to justify the applications of Theorems 1-3.

## PRELIMINARIES

We take into account the below system:

$$\frac{dx}{dt} = Z(t, x_t), \quad (6)$$

where  $Z \in C(\mathbb{R} \times C_0, \mathbb{R}^n), Z(t, 0) = 0$ , and it converts bounded sets into bounded sets. Suppose that for some  $\tau > 0, C_0 = C_0([- \tau, 0], \mathbb{R}^n)$  is the space the functions  $\phi: [- \tau, 0] \rightarrow \mathbb{R}^n$ , which are continuous

Let  $x \in C_0([t_0 - \tau, t_0 + a], \mathbb{R}^n)$ , where  $a \geq 0, a \in \mathbb{R}, x_t = x(t + \theta)$  for  $- \tau \leq \theta \leq 0$  and  $t \geq t_0$ .

Let  $z \in \mathbb{R}^n$ . The norm  $\|\cdot\|$  is described by

$$\|z\| = \sum_{i=1}^n |z_i|. \text{ Next, assume that } U \in \mathbb{R}^{n \times n}. \text{ Then, } \|U\|$$

$$\text{is described by } \|U\| = \max_{1 \leq j \leq n} \left( \sum_{i=1}^n |u_{ij}| \right).$$

Throughout this study, let  $x(t)$  denote  $x$ .

For any  $\phi \in C_0$ , assume that

$$\|\phi\|_{C_0} = \sup_{\theta \in [-r, 0]} \|\phi(\theta)\| = \|\phi(\theta)\|_{[-r, 0]}$$

and

$$C_H = \{\phi : \phi \in C_0 \text{ and } \|\phi\|_{C_0} \leq H < \infty\}.$$

It is also assumed that the functional  $Z$  has the conditions of the uniqueness of solutions of (6). We note that the systems (1), (2), (3) and (5) are particular cases of the system (6). Let  $\wp = [t_0 - \tau, t_0]$  and  $x(t) = x(t, t_0, \phi)$  be a solution of (6), where  $\phi \in C(\wp, \mathbb{R}^n)$ , i.e., it is an initial function, and  $x(t) = \phi(t), \forall t \in \wp$ .

Let

$$\Pi(t, \phi) : \mathbb{R}^+ \times C_H \rightarrow \mathbb{R}^+$$

be a continuous L-K-F for its arguments and  $\Pi(t, 0) = 0$ . Additionally, let  $\frac{d}{dt} \Pi(t, x_t)$  represent the derivative of this L-K-F along the system (6) on the right.

### STABILITY AND INTEGRABILITY PROPERTIES

We take  $Q(\cdot) = Q(t, x(t), x(t - d(t))) = 0$  in DDEs (3). Let's consider the system of DDEs (5). We now establish generalizations and improve some results mentioned above under new and more suitable conditions. Our results will be confirmed by the L-K-F approach. The first new result, Theorem 1, studies the asymptotic stability.

**Theorem 1.** Assume that

(C1)  $a_0 > 0, a_0$  from (C1), is such that

$$\sum_{j=1, j \neq i}^n |a_{ji}(t)| - a_{ii}(t) \leq -a_0 \text{ for all } t \in \mathbb{R}^+;$$

(C2)  $f_0 > 0, g_0 > 0, h_0 > 0$  and  $\rho_0 > 0$  are real constants such that

$$F(0) = 0, \|F(x)\| \geq f_0 \|x\|,$$

$$G(0) = 0, \|G(x)\| \geq g_0 \|x\|,$$

$$H(0) = 0, \|H(x)\| \leq h_0 \|x\|, \forall x \in \mathbb{R}^n,$$

$$(a_0 f_0 + g_0)(1 - d_0) - h_0 \|C\| \geq \rho_0,$$

where the constant  $d_0 > 0$  is from (4). Then, trivial solution of (5) is asymptotically stable.

**Proof.** Let  $\Pi_1 := \Pi_1(t, x_t)$  be an L-K-F given by

$$\Pi(t, x_t) := \|x(t)\| + \nu \int_{t-d(t)}^t \|H(x(s))\| ds, \quad (7)$$

in which  $\nu \in \mathbb{R}, \nu > 0$ . In fact, the constant  $\nu$  is arbitrary and it will be chosen in the proof, after a few steps.

The L-K-F (7) is converted to the subsequent form:

$$\Pi(t, x_t) := \sum_{i=1}^n |x_i(t)| + \nu \sum_{i=1}^n \int_{t-h(t)}^t |h_i(x(s))| ds.$$

Based on the information above, it is derived from the

L-K-F  $\Pi(t, x_t)$  that

$$\Pi(t, 0) = 0,$$

$$\Pi(t, x_t) \geq \sum_{i=1}^n |x_i(t)| = \|x(t)\|.$$

Considering the auxiliary functional  $\Pi(t, x_t)$  in (7) and employing (3), we find

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Pi(t, x_t) &= \sum_{i=1}^n x_i'(t) \operatorname{sgn}(x_i(t+0)) \\ &+ \nu \|H(x(t))\| \\ &- \nu(1 - d'(t)) \|H(x(t-d(t)))\|. \end{aligned} \quad (8)$$

As for the next step, by virtue of the first term of (8), conditions (C1), (C2) and elementary calculations, we get:

$$\begin{aligned} &\sum_{i=1}^n \operatorname{sgn} x_i(t+0) x_i'(t) \\ &\leq \sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1, j \neq i}^n |a_{ji}(t)| - a_{ii}(t) \right) |F_i(x(t))| \\ &- \|G(x(t))\| + \|C\| \|H(x(t-d(t)))\| \\ &\leq -a_0 f_0 \|x(t)\| - g_0 \|x(t)\| \\ &+ \|C\| \|H(x(t-d(t)))\|. \end{aligned}$$

Substituting the result of the inequality above into (8) and using the conditions (C1), (C2) and

$0 \leq d'(t) \leq d_0 < 1$ , we derive:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Pi(t, x_t) \leq & -a_0 f_0 \|x(t)\| - g_0 \|x(t)\| \\ & + \|C\| \|H(x(t-d(t)))\| \\ & + v \|H(x(t))\| \\ & - v(1-d_0) \|H(x(t-d(t)))\|. \end{aligned}$$

Choosing  $v$  as  $v = (1-d_0)^{-1} \|C\|$ , we get

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Pi(t, x_t) \leq & -[a_0 f_0 + g_0] \|x(t)\| \\ & + (1-d_0)^{-1} h_0 \|C\| \|H(x(t))\| \\ \leq & -[a_0 f_0 + g_0 - (1-d_0)^{-1} h_0 \|C\|] \|x(t)\| \\ = & - (1-d_0)^{-1} \\ & \times [(a_0 f_0 + g_0)(1-d_0) - h_0 \|C\|] \|x(t)\|. \end{aligned}$$

Using the condition (C2), we reach that

$$\frac{d}{dt} \Pi(t, x_t) \leq - (1-d_0)^{-1} \rho_0 \|x(t)\| \leq 0. \quad (9)$$

Thus,  $\frac{d}{dt} \Pi(t, x_t)$  is negative definite. Hence, the proof of the result of the AS is finished, (see, [5]). The second new result, Theorem 2, studies integrability of solutions.

**Theorem 2.** Let conditions (C1) and (C2) be fulfilled. Then, the solutions of (5) satisfy

$$\int_{t_0}^{\infty} \|x(s)\| ds \leq I < \infty,$$

where  $I = (1-d_0)\rho_0^{-1}\Pi_0 > 0$ , and

$$(1-d_0)\rho_0^{-1}\Pi_0 \in \square^+.$$

**Proof.** Take into account the L-K-F  $\Pi(t, x_t)$ . Next, according to the conditions (C1) and (C2), it is obvious

that  $\frac{d}{dt} \Pi(t, x_t) \leq - (1-d_0)^{-1} \rho_0 \|x(t)\| < 0$ .

The inequality above confirms that the L-K-F  $\Pi(t, x_t)$  is decreasing.

Subsequently, integrating the above inequality, we get:

$$\int_{t_0}^t \|x(s)\| (1-d_0)^{-1} \rho_0 ds \leq \Pi(t_0, \phi(t_0)),$$

$$t \geq t_0 \geq 0.$$

Let  $\Pi(t_0, \phi(t_0)) = \Pi_0 \geq 0$ ,  $\Pi_0 \in \square^+$ .

Based on the above results, we have

$$\int_{t_0}^t \|x(s)\| ds \leq (1-d_0)\rho_0^{-1}\Pi_0.$$

Let  $t \rightarrow +\infty$ . Then,

$$\int_{t_0}^{\infty} \|x(s)\| ds \leq (1-d_0)\rho_0^{-1}\Pi_0 < \infty.$$

Because of this reason, the solutions of (5) are integrable. It should be noted that here integrability is taken in meaning of Lebesgue on  $\square^+$ . Thereby, Theorem 2's proof was completed.

**Example 1.** We take into account to the beneath two dimensional system of DDEs with a variable delay:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} x_1' \\ x_2' \end{pmatrix} = & - \begin{pmatrix} 25 + (1+t)^{-1} & -(1+t)^{-1} \\ -(1+t)^{-1} & 25 + (1+t)^{-1} \end{pmatrix} \\ & \times \begin{pmatrix} 2|x_1| + x_1^4 \\ 2|x_2| + x_2^4 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} |x_1| + \frac{|x_1|}{1 + \exp(x_1^2)} \\ |x_2| + \frac{|x_2|}{1 + \exp(x_2^2)} \end{pmatrix} \\ & + \begin{pmatrix} 3 & 1 \\ 1 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1(t - \frac{1}{\pi} \arctgt) \\ x_2(t - \frac{1}{\pi} \arctgt) \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (10)$$

where  $d(t) = \frac{1}{\pi} \arctgt$  is the delay function and  $t \geq 2^{-1}$ .

As the next step, from the comparison of the systems of DDEs (10) and DDEs (5), we find the following relations:

$$\begin{aligned} A(t) = & \begin{pmatrix} 25 + (1+t)^{-1} & (1+t)^{-1} \\ (1+t)^{-1} & 25 + (1+t)^{-1} \end{pmatrix}, \\ -a_{ii}(t) + & \sum_{j=1, j \neq i}^n |a_{ji}(t)| = -25 < -24 = -a_0 \end{aligned}$$

thanks to



$$\begin{aligned}
 & a_{11}(t) + |a_{21}(t)| \\
 &= -25 - \frac{1}{1+t} + \frac{1}{1+t} = -25 < -24 = -a_0, \\
 & a_{22}(t) + |a_{12}(t)| \\
 &= -25 - \frac{1}{1+t} + \frac{1}{1+t} = -25 < -24 = -a_0; \\
 & F(x) = F(x_1, x_2) = \begin{pmatrix} 2|x_1| + x_1^4 \\ 2|x_2| + x_2^4 \end{pmatrix}, F(0) = 0, \\
 & \|F(x)\| = \|F(x_1, x_2)\| = \left\| \begin{pmatrix} 2|x_1| + x_1^4 \\ 2|x_2| + x_2^4 \end{pmatrix} \right\| \\
 &= 2|x_1| + x_1^4 + 2|x_2| + x_2^4 \\
 &\geq 2\|x\|, f_0 = 2; \\
 & G(x) = G(x_1, x_2) = \begin{pmatrix} |x_1| + \frac{|x_1|}{1 + \exp(x_1^2)} \\ |x_2| + \frac{|x_2|}{1 + \exp(x_2^2)} \end{pmatrix}, \\
 & \|G(x)\| = \|G(x_1, x_2)\| = \left\| \begin{pmatrix} |x_1| + \frac{|x_1|}{1 + \exp(x_1^2)} \\ |x_2| + \frac{|x_2|}{1 + \exp(x_2^2)} \end{pmatrix} \right\| \\
 &= |x_1| + \frac{|x_1|}{1 + \exp(x_1^2)} + |x_2| + \frac{|x_2|}{1 + \exp(x_2^2)} \\
 &\geq |x_1| + |x_2| = \|x\|, g_0 = 2; \\
 & C = \begin{pmatrix} 3 & 1 \\ 1 & 3 \end{pmatrix}, \|C\| = 4; \\
 & H(x_1(t), x_2(t)) = \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{pmatrix}, H(0) = 0, \\
 & \|H(x)\| = \|H(x_1(t), x_2(t))\| = \left\| \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{pmatrix} \right\| \\
 &= |x_1| + |x_2| = \|x\|, h_0 = 1; \\
 & d(t) = \frac{1}{\pi} \arctgt,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & 0 \leq d(t) = \frac{1}{\pi} \arctgt \leq \frac{1}{2}, \\
 & 0 \leq d'(t) = \frac{1}{\pi(1+t^2)} \leq \frac{1}{\pi} = d_0 < 1; \\
 & (a_0 f_0 + g_0)(1 - d_0) - h_0 \|C\| \\
 &= (48 + 2)(1 - \pi^{-1}) - 4 = 46 - 50\pi^{-1} > 0.
 \end{aligned}$$

According to the results above, the conditions (C1) and (C2) of the two proved results, i.e., Theorem 1 and Theorem 2, have been satisfied. Thanks to this fact, the solution  $(x_1(t), x_2(t)) = (0, 0)$  of (10) is asymptotically stable, additionally, the solutions are integrable depending upon their norm.

### BOUNDEDNESS

The third new result, Theorem 3, studies boundedness of solutions.

As for the bounded solutions of the system (3), we need the following conditions, which are modified forms of conditions in (C2):

$$\begin{aligned}
 (C3) \quad & F(0) = 0, \|F(x)\| \geq f_0 \|x\|, \\
 & G(0) = 0, \|G(x)\| \geq g_0 \|x\|, \\
 & H(0) = 0, \|H(x)\| \leq h_0 \|x\|, \forall x \in \mathbb{R}^n, \\
 & \|Q(t, x(t), x(t - d(t)))\| \leq |q_0(t)| \|x(t)\|
 \end{aligned}$$

and

$$\begin{aligned}
 & [(a_0 f_0 + g_0)(1 - d_0) - h_0 \|C\| - (1 - d_0)|q_0(t)|] \geq 0, \\
 & \forall t \in \mathbb{R}^+, \forall x, x(t - d(t)) \in \mathbb{R}^n,
 \end{aligned}$$

where the constants  $d_0 > 0$  is from (4),  $a_0$  is from (C1),  $f_0 > 0, g_0 > 0, h_0 > 0, \rho_0 > 0$  are from (C2), respectively, and  $q_0 \in C(\mathbb{R}^+, \mathbb{R})$ .

**Theorem 3.** Let the conditions (C1) and (C3) be fulfilled. Then the solutions of (3) are bounded.

**Proof.** Like the same as before, the L-K-F  $\Pi(t, x_t)$  is the main tool here for the proof. The conditions (C1) and (C3) lead that

$$\frac{d}{dt} \Pi(t, x_t) \leq$$

$$\begin{aligned} & - (1-d_0)^{-1} [(a_0 f_0 + g_0)(1-d_0) - h_0 \|C\|] \times \|x(t)\| \\ & + \|Q(t, x(t), x(t-d(t)))\| \\ & \leq - (1-d_0)^{-1} [(a_0 f_0 + g_0)(1-d_0) - h_0 \|C\| - (1-d_0)q_0(t)] \|x(t)\|. \end{aligned}$$

Hence, according to the condition (C3), it is evident that

$$\frac{d}{dt} \Pi(t, x_t) \leq 0. \quad (11)$$

Integrating, we obtain

$$\Pi(t, x_t) \leq \Pi(t_0, \phi(t_0)) \equiv \Pi_0 > 0, \quad \Pi_0 \in \mathbb{R}.$$

By the virtue of (11) and the auxiliary functional  $\Pi(t, x_t)$ , it follows that

$$\begin{aligned} \|x(t)\| & \leq (1-d_0)^{-1} \|C\| \int_{t-d(t)}^t \|F(x(s))\| ds + \|x(t)\| \\ & = \Pi(t, x_t) \leq \Pi(t_0, \phi(t_0)) \equiv \Pi_0 > 0. \end{aligned}$$

Thereby, in the subsequent, we have

$$\|x(t)\| \leq \Pi_0.$$

Next, it is obvious that

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \|x(t)\| \leq \lim_{t \rightarrow +\infty} \Pi_0 = \Pi_0.$$

Then, the boundedness of solutions of (3) is observed depending upon  $t \rightarrow +\infty$ . Theorem 3's proof was completed.

**Example 2.** We have the following modified system:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} x_1' \\ x_2' \end{pmatrix} & = - \begin{pmatrix} 25 - \frac{1}{1+t} & -\frac{1}{1+t} \\ -\frac{1}{1+t} & 25 - \frac{1}{1+t} \end{pmatrix} \\ & \times \begin{pmatrix} 2|x_1| + x_1^4 \\ 2|x_2| + x_2^4 \end{pmatrix} \\ & - \begin{pmatrix} |x_1| + \frac{|x_1|}{1 + \exp(x_1^2)} \\ |x_2| + \frac{|x_2|}{1 + \exp(x_2^2)} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + \begin{pmatrix} 3 & 1 \\ 1 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1(t - \frac{1}{\pi} \arctgt) \\ x_2(t - \frac{1}{\pi} \arctgt) \end{pmatrix} \\ & + \begin{pmatrix} \frac{\exp(t) \sin x_1}{1 + \exp(2t) + x_1^4(t - \frac{1}{\pi} \arctgt)} \\ \frac{\exp(t) \sin x_2}{1 + \exp(2t) + x_2^4(t - \frac{1}{\pi} \arctgt)} \end{pmatrix}, \quad (12) \end{aligned}$$

where  $d(t) = \frac{1}{\pi} \arctgt$  is time-varying retardation and  $t \geq 2^{-1}$ .

If we compare the systems (12) and (3), then it is evident that functions  $A(t)$ ,  $F$ ,  $G$ ,  $H$  and the matrix  $C$  are the same as in Example 1. We do not need to show the calculations related to these functions again. Hence, we consider the subsequent function:

$$\begin{aligned} & Q(t, x(t), x(t - \frac{1}{\pi} |\arctan(t)|)) \\ & = \begin{pmatrix} \frac{\exp(t) \sin x_1}{1 + \exp(2t) + x_1^4(t - \frac{1}{\pi} \arctgt)} \\ \frac{\exp(t) \sin x_2}{1 + \exp(2t) + x_2^4(t - \frac{1}{\pi} \arctgt)} \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Then,

$$\begin{aligned} & \left\| Q(t, x(t), x(t - \frac{1}{\pi} |\arctan(t)|)) \right\| \\ & = \left\| \begin{pmatrix} \frac{\exp(t) \sin x_1}{1 + \exp(2t) + x_1^4(t - \frac{1}{\pi} \arctgt)} \\ \frac{\exp(t) \sin x_2}{1 + \exp(2t) + x_2^4(t - \frac{1}{\pi} \arctgt)} \end{pmatrix} \right\| \\ & \leq (1 + \exp(2t))^{-1} [\exp(t) |\sin x_1| + \exp(t) |\sin x_2|] \\ & \leq \exp(t) (1 + \exp(2t))^{-1} [|x_1| + |x_2|] = |q_0(t)| \|x\|, \end{aligned}$$

where

$$|q_0(t)| = \exp(t)(1 + \exp(2t))^{-1}, \quad \|x\| = |x_1| + |x_2|.$$

By the virtue of Example 1 and the discussion above, we obtain

$$\begin{aligned} & \left[ (a_0 f_0 + g_0)(1 - d_0) - h_0 \|C\| - (1 - d_0) |q_0(t)| \right] \\ &= (48 + 2)(1 - \pi^{-1}) - 4 - (1 - \pi^{-1}) \frac{\exp(t)}{1 + \exp(2t)} \\ &= 46 - 50\pi^{-1} - (1 - \pi^{-1}) = 45 - 49\pi^{-1} > 0. \end{aligned}$$

Thereby, the conditions (C1) and (C3) of Theorem 3 are satisfied. Therefore, we can reach that the solutions of (12) are bounded depending upon  $t \rightarrow \infty$ .

## CONCLUSION

In this study, the unperturbed and perturbed systems of DDEs (3) and (5) were considered. We proved there new results, Theorems 1-3, on the behaviors of solutions of the non-perturbed system (3) as well as the perturbed system (5). These theorems, Theorems 1-3, include new sufficient conditions. As the main tool in the proofs, a Lyapunov- Krasovskii type functional was constructed and used to prove Theorems 1-3. As for the applications of the results of this study, two examples were given to show applications of Theorems 1-3. The new outcomes of this study have new contributions to the qualitative theory of DDEs, and they extend and enhance a few related results in the past literature.

## REFERENCES

- [1] Arino, O., Hbid, M. L., & Ait Dads, E. Delay differential equations and applications, Proceedings of the NATO Advanced Study Institute held at the Cadi Ayyad University, Marrakech, September 9–21, NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry, 205. Springer, Dordrecht, 2006.
- [2] Azbelev, N., Maksimov, V., & Rakhmatullina, L. Introduction to the theory of linear functional-differential equations, Advanced Series in Mathematical Science and Engineering, 3. World Federation Publishers Company, Atlanta, GA, 1995.
- [3] Burton, T. A. Stability and periodic solutions of ordinary and functional differential equations, Corrected version of the 1985 original, Dover Publications, Inc., Mineola, NY, 2005.
- [4] Chuan-Ke, Z., He, Y., Lin Jiang, M. W., & Qing-Guo, W. An extended reciprocally convex matrix inequality for stability analysis of systems with time-varying delay, Automatica J. IFAC. 85 481–485, 2017.
- [5] Chuan-Ke, Z., Long, F., He, Y., Yao, W., Jiang, L., & Wu, M. A relaxed quadratic function negative-determination lemma and its application to time-delay systems, Automatica J. IFAC. 113 6 pp, 2020.
- [6] Xue Tang, D. Some kinds of Liapunov functional in stability theory of RFDE, Acta Math. Appl. Sinica. 11: 2 214–224, 1995.
- [6] Ge, X., Wang, Z., Lei, S. -L.; Vong, S. Exponential stability of system with time delay based on matrix-refined weighted functions, Eur. J. Control . 79, Paper No. 101076, 7 pp, 2024.
- [7] Ge, X., Shi, C., Vong, S. Weng Exponential stability of time delay systems based on intermediate polynomial-based weighted functions, Appl. Math. Lett. 116 Paper No. 107055, 7 pp., 2021.
- [8] Graef, J. R., Tunç, C. Continuability and boundedness of multi-delay functional integro-differential equations of the second order, Rev. R. Acad. Cienc. Exactas Fís. Nat. Ser. A Mat. RACSAM 109: 1 169–173, 2015.
- [9] Hale, J. K., Verduyn Lunel, S. M. Introduction to functional-differential equations, Applied Mathematical Sciences, 99. Springer-Verlag, New York, 1993.
- [10] Kolmanovskii, V., Myshkis, A. Applied theory of functional-differential equations, Mathematics and its Applications (Soviet Series), 85. Kluwer Academic Publishers Group, Dordrecht, 1992.
- [11] Kolmanovskii, V., Myshkis, A. Introduction to the theory and applications of functional-differential equations, Mathematics and its Applications, 463. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1999.
- [12] Kolmanovskii, V. B., Nosov, V. R. Stability of functional-differential equations, Mathematics in Science and Engineering, 180. Academic Press, Inc. [Harcourt Brace Jovanovich, Publishers], London, 1986.
- [13] Krasovskii, N. N. Stability of motion. Applications of Lyapunov's second method to differential systems and equations with delay, Translated by J. L. Brenner Stanford University Press, Stanford, Calif, 1963.
- [14] Kuang, Y. Delay differential equations with applications in population dynamics, Mathematics in Science and Engineering, 191. Academic Press, Inc., Boston, MA, 1993.
- [15] Lakshmikantham, V., Wen, L. Z., & Zhang, B. G. Theory of differential equations with unbounded delay, Mathematics and its Applications, 298. Kluwer Academic Publishers Group, Dordrecht, 1994.
- [16] Lee, T.H., Park, J. H., Xu, S. Relaxed conditions for stability of time-varying delay systems, Automatica J. IFAC. 75 11–15, 2017.
- [17] Li, X., Yang, X., Song, S. Lyapunov conditions for finite-time stability of time-varying time-delay systems, Automatica J. IFAC. 103 135–140, 2019.
- [18] Li, Z., Yan, H., Zhang, H., Zhan, X., Huang, C. Improved inequality-based functions approach for stability analysis of time delay system, Automatica J. IFAC 108 8 pp, 2019.
- [19] Seuret, A., Gouaisbaut, F. Hierarchy of LMI conditions for the stability analysis of time-delay systems, Systems Control Lett. 81 1–7, 2015.
- [20] Slyn'ko, V.I., Tunç, C. Instability of set differential equations, J. Math. Anal. Appl. 467: 2 935–947, 2018.
- [21] Smith, H. An introduction to delay differential equations with applications to the life sciences, Texts in Applied Mathematics, 57. Springer, New York, 2011.
- [22] Tian, J., Ren, Z. Stability analysis of systems with time-varying delays via an improved integral inequality, IEEE Access. 8 90889–90894, 2020.

- [23] Tunç, C. A note on boundedness of solutions to a class of non-autonomous differential equations of second order, *Appl. Anal. Discrete Math.* 4: 2 361–372, 2010.
- [24] Tunç, C. Uniformly stability and boundedness of solutions of second order nonlinear delay differential equations, *Appl. Comput. Math.* 10: 3 449–462, 2011.
- [25] Tunç, C. Stability to vector Liénard equation with constant deviating argument, *Nonlinear Dynam.* 73:3 1245–1251, 2013.
- [26] Tunç, C., Erdur, S. New qualitative results for solutions of functional differential equations of second order., *Discrete Dyn. Nat. Soc, Art. ID 3151742:* 13 pp, 2018.
- [27] Tunç, C., Golmankhaneh, A.K. On stability of a class of second alpha-order fractal differential equations. *AIMS Math.* 5: 3 2126–2142, 2020.
- [28] Tunç, C., Tunç, O. A note on certain qualitative properties of a second order linear differential system, *Appl. Math. Inf. Sci.* 9: 2 953–956, 2015.
- [29] Tunç, C., Tunç, O. On the boundedness and integration of non-oscillatory solutions of certain linear differential equations of second order, *Journal of Advanced Research.* 7:1 165-168, 2016.
- [30] Tunç, C., Tunç, O. A note on the stability and boundedness of solutions to non-linear differential systems of second order, *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences.* 24 169-175, 2017.
- [31] Tunç, C., Tunç, O. Qualitative analysis for a variable delay system of differential equations of second order, *Journal of Taibah University for Science.* 13: 1 468–477, 2019.
- [32] Tunç, C., Tunç, O., Wang, Y., & Yao, J.-C. Qualitative analyses of differential systems with time-varying delays via Lyapunov–Krasovskii approach, *Mathematics.* 9, 1196, 2021.
- [33] Tunç, O. On the behaviors of solutions of systems of non-linear differential equations with multiple constant delays, *Rev. R. Acad. Cienc. Exactas Fís. Nat. Ser. A Mat. RACSAM* 115: 4 22 pp, 2021.
- [34] Tunç, O., Tunç, C., Wang, Y. Delay-dependent stability, integrability and boundedness criteria for delay differential systems, *Axioms.* 10: 3 138, 2021.
- [35] Wang, Y., Liu, H., & Li, X. A novel method for stability analysis of time-varying delay systems, *IEEE Trans. Automat. Control.* 66: 3 1422–1428, 2021.
- [36] Wu, M., He, Y. Parameter-dependent Lyapunov functional for systems with multiple time delays, *J. Control Theory Appl.* 2:3 239–245, 2004.
- [37] Zevin, A. A. Maximum Lyapunov exponents and stability criteria of linear systems with variable delay, *J. Appl. Math. Mech.* 79: 1 1–8, 2015.

## Prediction of Mechanical Properties of Synthetic Waste Reinforced Polyolefins with GA-LSTM Hybrid Model

Anıl Utku<sup>1</sup>, Yılmaz Kısmet<sup>2</sup>, Ümit Can<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Computer Engineering Department, Munzur University, 62000 Tunceli, Turkey

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Munzur University, 62000 Tunceli, Turkey

<sup>3</sup> Computer Engineering Department, Munzur University, 62000 Tunceli, Turkey.

✉:ucan@munzur.edu.tr  <sup>1</sup> 0000-0002-7240-8713  <sup>2</sup> 0000-0003-3145-6214  <sup>3</sup> 0000-0002-8832-6317

Received (Geliş): 19.08.2024

Düzeltilme (Revision): 17.09.2024

Kabul (Accepted): 09.10.2024

### ABSTRACT

In this study, the effects of the production parameters used in injection molding of particle-reinforced thermoplastics on the product quality and mechanical properties of the produced part are modeled using an optimized Genetic Algorithm-Long Short-Term Memory (GA-LSTM) hybrid deep learning method. Here, LDPE, HDPE, and PP, the most important members of the polyolefins group, were used as thermoplastics, while powdered synthetic paint wastes were evaluated as reinforcement elements. Using different parameters, 819 specimens were produced by injection molding, and mechanical tensile, three-point bending, and izod impact tests were performed on each specimen. The GA-LSTM model was trained with the parameters used and the results obtained during the experimental process, and the predicted values were determined to correspond to the actual values. Well-known methods were used to measure the success of the hybrid GA-LSTM model. The designed GA-LSTM model produced the best outcomes, according to the results attained.

**Keywords:** Deep Learning, Injection Molding, Machine Learning, Mechanical Properties, Thermoplastic

### Sentetik Atık Takviyeli Poliolenlerin Mekanik Özelliklerinin GA-LSTM Hibrit Modeli ile Tahmini

#### ÖZ

Bu çalışmada, parçacık takviyeli termoplastiklerin enjeksiyon kalıplamasında kullanılan üretim parametrelerinin ürün kalitesi ve üretilen parçanın mekanik özellikleri üzerindeki etkileri optimize edilmiş bir Genetik Algoritma-Uzun Kısa Süreli Bellek (GA-LSTM) hibrit derin öğrenme yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Burada termoplastik olarak poliolefinler grubunun en önemli üyesi olan AYPE, YYPE ve PP kullanılırken takviye elemanı olarak ise toz halde sentetik boya atıkları kullanılmıştır. Farklı parametreler kullanılarak enjeksiyon kalıplama yoluyla 819 numune üretilmiş ve her numune üzerinde mekanik çekme, üç nokta eğme ve izod darbe testleri gerçekleştirilmiştir. GA-LSTM modeli, kullanılan parametreler ve deneysel süreç boyunca elde edilen sonuçlarla eğitilmiş ve tahmin edilen değerlerin gerçek değerlere karşılık geldiği belirlenmiştir. Hibrit GA-LSTM modelinin başarısını ölçmek için iyi bilinen yöntemler kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre tasarlanan GA-LSTM modeli en iyi sonuçları üretmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Derin Öğrenme, Enjeksiyon Kalıplama, Mekanik Özellikler, Makine Öğrenmesi, Termoplastik

#### INTRODUCTION

Polymers are materials we use in all areas of our daily life because they are simple to produce, low cost, and readily available. In particular, the use of polymer matrix composites developed together with many different reinforcing elements, in addition to their use alone, is widespread [1, 2]. One of the most preferred types of composite is thermoplastic matrix composites. Many organic or inorganic reinforcement elements can be used in these composites, as well as synthetic fillers [3-6]. Especially if the reinforcing element used is in the form of particles, the injection molding method is preferred in

production. The injection molding method is a mass production method, and the production parameters used here are critical. Parameters such as temperature, injection pressure, holding pressure, receiving pressure, etc., belonging to the injection part of the injection machine, and parameters such as mold temperature and cooling time belonging to the mold part of the injection machine significantly affect the part quality in production. Knowing these parameters in advance will enable the production to be carried out in series by saving both material and energy without resorting to trial and error at the beginning of the machine in case of changing

the type of matrix and reinforcing element to be used in production or changing the mixture ratios [7, 8]. Today, artificial intelligence methods have started to be used to learn and predict these parameters. With the emergence of the ease of application of these methods to different fields with the developing technology, artificial intelligence methods are used more easily and widely in various production areas. Thus, the production advantages it brings in production industries have positively affected the sectors economically [9-10]. Due to these important features, it plays an important role in modeling production stages and estimating the optimum values of various parameters (e.g. mechanical properties) used in the production of various parts used in manufacturing. For example, a database was created based on the mechanical results, such as maximum compressive/crushing force, maximum strain, and modulus of elasticity of cylindrical section pipes produced from carbon fibers used in textiles after production. With this database, predictions with high convergence accuracy were developed for pipes containing different proportions of carbon fiber by using methods such as artificial neural networks (ANN) based feedforward backpropagation algorithm (FFBP) and machine learning (ML) [11]. In addition, dog bones were produced by plastic injection molding method using high-density polyethylene, and studies were carried out to increase the efficiency of the samples produced using ANN and ML methods [12]. Similarly, the dimensional stability of injection molded thermoplastics, such as width and thickness, and mechanical properties, such as Young's modulus, tensile stress, and elongation at break, can be predicted using machine learning (ML) [13-15]. Ahmed et al. [16] used Random Forest (RF) and Gradient Boosted Regression Tree (GBRT) algorithms to predict the warpage of a PVC component obtained in the injection molding process. The results achieved using the absolute percentage metric show that the RF algorithm performs better than the other algorithms. In order to reduce the costs of plastic manufacturing companies during injection molding, the correct parameter values should be used. Schulze Struchtrup et al. [17] applied various feature selection methods based on this idea. Then they used ANN, Binary Decision Trees (bDT), k-Nearest-Neighbors (kNN), Support-Vector Machines (SVM), LSBoost, RF, and Gaussian Process Regression (GPR) methods. Kiehas et al. [18] studied Charpy fracture surface images and tried to reveal the mechanisms that cause stress whitening. In this context, they tried to understand the Ductile to Brittle Transition Temperature (DBTT) based on fracture surface features. They also trained a CNN model to predict the DBTT. Wu et al. [19], offered an efficient machine learning-based model instead of the old and time-consuming methods used during the production of polymer materials. The mechanical properties and polymorphic properties of the models to be produced with this model were predicted by RF, Extreme Gradient Boosting (XGBoost), Extreme Tree (ET), and Gradient Boosting Tree (GBT) machine learning methods. Nasri and Toubal [20] tried to predict

the impact and mechanical properties of biocomposite materials with pine and flax fibers reinforced with polypropylene using an artificial neural heavy (ANN) model. Many tests and expenses are required to determine the appropriate properties of these materials that degrade prematurely. With this model, this situation was avoided.

In recent years, traditional machine learning and deep learning methods have been applied to solve the problem of accurate prediction of various production parameters due to their ability to solve complex and nonlinear problems [21]. However, there are some situations where the performance of traditional machine learning methods is degraded. For example, in any prediction task, most machine learning algorithms require the user to provide relevant features. However, deep learning models extract the features themselves [22]. In addition, the large amount of data generated during manufacturing, the exceptionally high feature space of this data, and the multimodal data structure all have a negative impact on the performance of traditional machine learning methods. Deep learning models, on the other hand, yield quite successful results in complex tasks such as speech recognition, image processing, and natural language processing. Owing to their multi-layered structure, these methods automatically process data and uncover non-linear and complex relationships. These automatic learning capabilities have made deep learning models an effective tool in complex manufacturing processes [23]. This study created a dataset based on the injection molding production parameters of polyolefins reinforced with synthetic dye wastes and the mechanical test results of the produced samples, and a GA-LSTM hybrid algorithm was designed to predict the mechanical analysis results obtained during the production phase. Linear Regression (LR), RF, SVM, Multilayer Perceptron (MLP), Recurrent Neural Networks (RNN), and LSTM models were then applied to measure the accomplishment of this model.

The contributions of this study are listed as below:

- The predictive power of the LSTM model was optimized with the GA method.
- In this study, 819 injection-molded specimens were produced, and each specimen underwent mechanical tensile, three-point bending, and izod impact testing with different parameters.
- The mechanical analysis results of both LDPE-HDPE and LDPE-HDPE-PP were predicted with GA-LSTM.
- The designed GA-LSTM model was compared with RF, LR, SVM, MLP, RNN, and LSTM.
- Mean Square Error (MSE), Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE) and R squared ( $R^2$ ) metrics were used to measure the success of the proposed models in predicting mechanical properties.

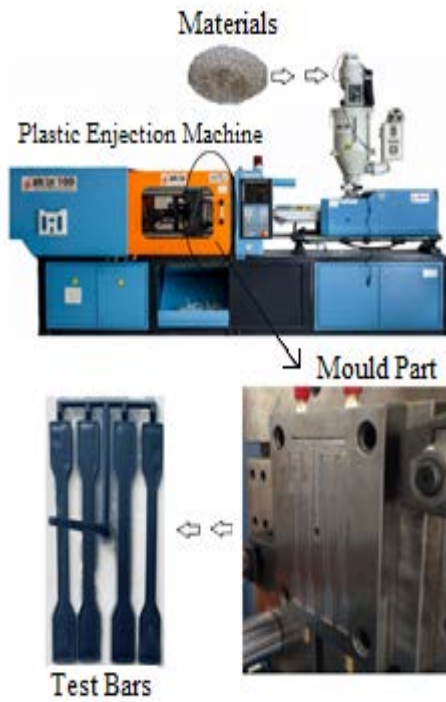
## MATERIAL and METHOD

The matrix materials used in the production are LDPE, HDPE, and PP obtained from PETKIM A.Ş. The reinforcement elements are three different synthetic paint

wastes belonging to epoxy, epoxy/polyester (hybrid), and polyurethane systems.

### Production of Test Bars

Powder coating wastes were mixed with each matrix material separately by %5, 10%, 20%, and 30% by weight, first mechanically and then homogeneously using a single screw extruder device in the Polymer Science and Technology Laboratory of Munzur University Mechanical Engineering Department. After these mixtures were cooled at the extrusion outlet, they were passed through a crusher to 2 to 3-mm granules. These granules were separately produced into test bars using the "EKİN 100 T" brand/model plastic injection molding machine shown in Figure 1 in the Polymer Science and Technology Laboratory.



**Figure 1.** Production Flow chart of test bars

During these productions, the injection machine temperature, injection pressure, secondary pressure, holding pressure, mold temperature, cooling time, and cycle time values vary depending on the type and mixing ratio of each matrix material and reinforcing element. Samples were also produced using pure LDPE, HDPE, and PP without reinforcements, and the production parameters varied for each. For example, the number of samples produced according to the AYPE and paint waste used for these experiments is given in Table 1. In addition, the same number of test bars were produced for other thermoplastics

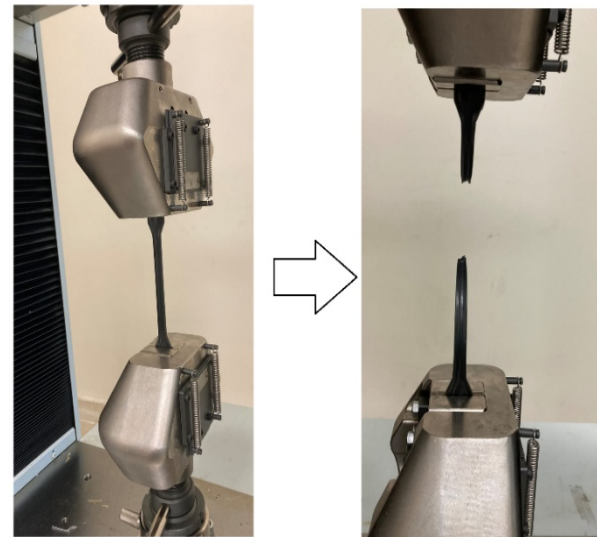
**Table 1.** Test LDPE matrix samples used in mechanical tests

Materials/Mechanical Tests	Tensile Test	Three-point bending	Izod Impact Test
AYPE pure	7	7	7
AYPE+%5 Epoxy	7	7	7
AYPE+%10 Epoxy	7	7	7
AYPE+%20 Epoxy	7	7	7
AYPE+%30 Epoxy	7	7	7
AYPE+%5 Hybrid	7	7	7
AYPE+%10 Hybrid	7	7	7
AYPE+%20 Hybrid	7	7	7
AYPE+%30 Hybrid	7	7	7
AYPE+%5 P-Pure	7	7	7
AYPE+%10 P-Pure	7	7	7
AYPE+%20 P-Pure	7	7	7
AYPE+%30 P-Pure	7	7	7

A total of 819 test bars were produced as specified, and the mechanical properties of each of these test bars were analyzed. In addition, tensile, three-point bending, and izod impact tests were performed as mechanical tests.

### Mechanical Tests

Tensile and three-point bending tests for the bars were performed using the 100 kN "Shimadzu AG-X" device in the Mechanical Engineering Laboratory of Munzur University. The device used in the experiment for the produced specimens is shown in Figure 2.



**Figure 2.** Tensile test performed for the produced specimens.

Tensile tests were performed under EN ISO 527 standards with a 50 mm/min tensile speed. And three-point bending tests were performed under EN ISO 178 standards with a bending speed of 10 mm/min, and a maximum travel of 6 mm. Izod impact tests followed EN ISO 180 standards using the Italian brand "Ceast Fractovis Plus" impact device in Dokuz Eylül University Mechanical Engineering Department.

### Classification Models

Popular artificial intelligence methods used in many current researches were used to measure the performance of the GA-LSTM hybrid model developed in this study. These methods are briefly described in this section.

**LR:** Linear regression is a commonly used method in statistical data analysis. LR is used for linear and continuous variables and is one of the popular machine learning methods. LR shows the relationships between one or more independent variables and a dependent variable [24]. There are two different types of LR: Simple Linear Regression and Multiple Linear Regression models. The first one deals with one independent variable, while the other has more than one independent variable [25].

**RF:** It is one of the most promising ensemble learning methods that aims to find more successful solutions to problems by combining different methods. The random forest algorithm is an ensemble of multiple decision trees [26]. The algorithm comprises decision trees that independent of the input vector of each classifier. For the classification of the input vector, each tree produces a unit vote result [27]. The RF algorithm achieves successful results from both large data sets and small data sets. It can also work with a combination of discrete and continuous data types.

**SVM:** It is a trained statistical learning method used for classification and regression and successfully solves machine learning problems. SVM, developed by Vapnik [28], has gained popularity due to its many efficient features and good performance in solving nonlinear problems. The version used to solve regression problems is called the Support Vector Regression model [29].

**MLP:** This model is a nonparametric artificial neural network technique that performs many detection and prediction tasks. It is a general-purpose, flexible, non-linear model consisting of units (neurons) organized in multiple layers [30]. It consists of many layers, and for each neuron in these layers, it takes the sum of the product of the connection weight and the input signals and calculates its output as a function of this sum. This model is also known as feedforward ANN, as the learning is done from the previous layer to the following layer [31].

**RNN:** In RNN, a type of artificial neural network, the output data depends on the calculation of the sequential time series inputs of the neural network. These models are networks where the connections between units form a directed loop. RNN allows a system to exhibit dynamic temporal behavior [32]. Unlike feedforward neural networks, RNNs can process inputs using their own input memory. RNN performs processing time series data in application areas such as handwriting, speech, and activity classifications [33-34].

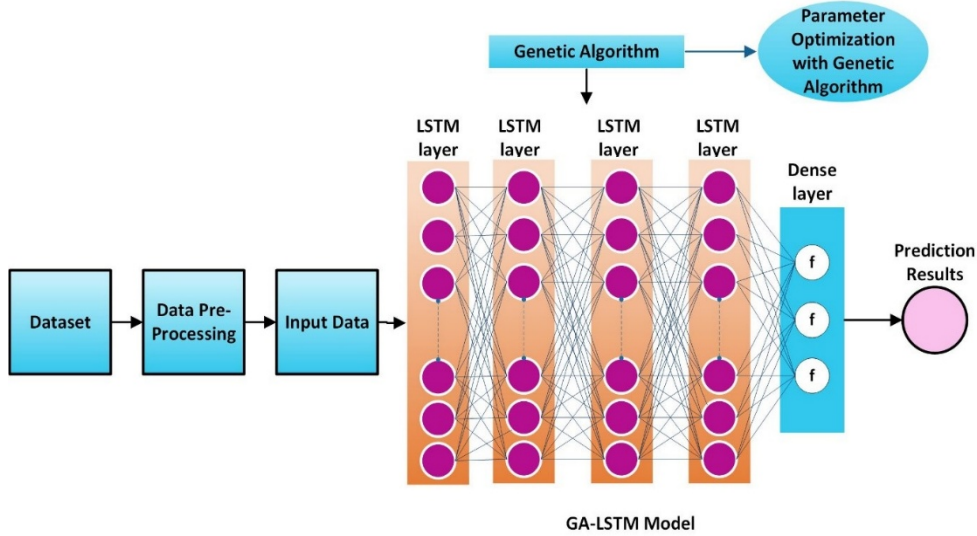
**LSTM:** This effective model is a variant of RNN and is used to solve various problems where the RNN method does not provide the desired solution power. LSTM is designed to overcome error-backflow problems. It was proposed by Hochreiter and Schmidhuber [35]. There are four layers in the LSTM architecture: input, forget, output, and cell. The cells that are the key to the architecture can keep or remove the information because of the features in the LSTM architecture, which are expressed as gates [36]. The other layers in the architecture, namely the input, output, and forgetting layers, constitute the memory of the network in the cell state. LSTM achieves very effective results in classification and regression problems, especially in text and audio-related tasks.

### Developed Hybrid Deep Learning Model

This section describes the development process of the deep learning-based model, which successfully predicts the actual experimental results by using the production parameter values used and obtained experimental results in the real experimental environment and thus realistically models this experimental process. First, a data set was created using real experimental results, and then the data was given as input to the model after preprocessing steps. The developed GA-LSTM hybrid model inputs the experimental parameters and generates predictions for mechanically tensile, three-point bending, and izod impact tests as output. The architecture of the developed GA-LSTM model is shown the Figure 3.

As seen in Figure 3, the GA-LSTM architecture consists of an input layer, LSTM layers, and an output layer. The input layer is taken to the input layer after the data has gone through a certain preprocessing process in the first stage of the model. This layer receives time series data and prepares it in a format suitable for the LSTM layers. LSTM layers are used to learn and model long-term dependencies of consecutive data. Each LSTM layer contains an input gate, an output gate, a forget gate, and a cell state. The input gate determines how to process newly arriving data. The forget gate decides how much of the previous state information to forget. The output gate outputs the updated state information. The cell state stores and updates the long-term information. These gates and the memory cell control how the data is updated and stored at each time step. Hidden layers, the outputs obtained from the LSTM layers, are passed to the hidden layers. These layers represent the learned features at a higher level and increase the learning capacity of the model. The output layer provides the final prediction results of the model. Information from the hidden layers is passed to the output layer to produce the model's predictions.





**Figure 3.** The architecture of the developed GA-LSTM model

### Dataset

The dataset used in this study comprises three mechanical test results: tensile, three-point bending, and izod impact results of the samples produced with the parameters used during the injection molding of polyolefins reinforced with synthetic dye wastes. The dataset consists of 819 real test results obtained in the laboratory. Table 2 shows the attributes and value ranges in the dataset.

**Table 2.** Attributes and value ranges in the dataset

Attributes	Value ranges
Percentage contribution	$\geq 0 \leq 0.3$
Temperature ( °C )	$\geq 165 \leq 200$
Injection pressure (bar)	$\geq 60 \leq 90$
Secondary pressure (bar)	$\geq 50 \leq 0.3$
Holding pressure (bar)	$\geq 0 \leq 80$
Mold temperature ( °C )	$\geq 25 \leq 90$
Cooling time (s)	$\geq 30 \leq 80$
Cycle time (s)	$\geq 60 \leq 110$
Tensile strength	$\geq 5.13 \leq 56.783$
Tree point bending strength	$\geq 10.54 \leq 68.55$
Izod impact strength	$\geq 2.11 \leq 23.87$

### Evaluation Metrics

In prediction problems, the metrics Root Mean Squared Error (RMSE), Mean Squared Error (MSE), Mean Absolute Error (MAE), and R Squared (R<sup>2</sup>) are mainly used to determine the error between predictions and actual values. MSE is calculated by subtracting the predicted values from the actual values, squaring them, and calculating the average. MSE is calculated using Eq.1, where  $y$  is the actual value,  $\hat{y}$  predicted values and  $n$  is the number of samples.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y - \hat{y})^2 \quad (1)$$

RMSE calculates the standard deviation of the prediction errors. The square root value of MSE represents RMSE, as shown in Eq.2.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (|y - \hat{y}|)^2} \quad (2)$$

MAE takes the absolute value of the difference between the actual values found and the values predicted by the methods and then calculates their average. It calculates the mean of the prediction errors. MAE is calculated using Eq.3.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y - \hat{y}| \quad (3)$$

R<sup>2</sup> is a statistical measure of the proportion of variance. R<sup>2</sup> is calculated using Eq.4.  $\bar{y}$  is the average of the actual values. The values of  $y$  and  $\hat{y}$  were mentioned at the beginning of the section and are not repeated here.

$$R^2 = \frac{\sum (y - \hat{y})^2}{(y - \bar{y})^2} \quad (4)$$

### Proposed Hybrid GA-LSTM Prediction Model

In this research, the hybrid model was designed and compared with RF, LR, SVM, MLP, RNN, and LSTM models in practice. First, this dataset was normalized in between 0 and 1 values with the MinMaxScaler method belongs to the Scikit Learn library and then artificial intelligence models were applied. After the normalization step, the data were divided into training, test, and validation sets. As a result of the experimental studies, the highest prediction accuracy was achieved in the combination of 80% training and 20% testing, so these values were chosen for the experimental studies. In

addition, 10% of the training data was reserved for validation. The validation data was used to optimize the parameters of the applied models. The model parameters were optimized using the GridSearchCV method from the Scikit Learn library to ensure the applied models get the best prediction outcomes. GridSearchCV uses a different combination of all specified hyperparameters and their values and selects the best value for the hyperparameters by calculating the performance for each combination. However, in the GA-LSTM model, parameter optimization was carried out using the GA algorithm to create the ideal parameter configuration for accurately predicting mechanical properties. Initially, 3x3 and 5x5 kernel sizes were tried for kernel sizes. These sizes were evaluated in a wide range to ensure that the model could learn different features and as a result of the experimental studies, 3x3 kernel size was selected. For epoch numbers, 50, 100 and 150 epoch values were used in the training process and as a result of the experimental studies, 100 epoch number was selected. For number of neurons, 50, 100 and 150 values were tried as the neuron numbers used in different layers and as a result of the experimental studies, 50 neurons were selected.

For learning rate, 0.001, 0.01 and 0.1 values were tried and as a result of the experimental studies, 0.01 learning rate was selected.

The LSTM can learn and model the sequential data more efficiently. This allowed LSTM to learn long-term patterns better. The following equations show the stages of the LSTM algorithm.

#### LSTM algorithm

For the input sequence  $T_1, T_2, \dots, T_N$  the hidden state  $h_t$  and the output  $y_t$  can be calculated as in Equations 1 and 2.

$$h_t = H(W_{ih}T_t + W_{hh}h_{t-1} + b_h) \quad (1)$$

$$y_t = W_{ho}h_t + b_o \quad (2)$$

$W_{ih}, W_{hh}$  and  $W_{ho}$  refer to the weight matrices between the input, hidden, and output layers. Here, an input  $x_t$  is received at time  $t$ .  $C_{t-1}$  denotes long-term memory and  $h_{t-1}$  denotes the transaction memory.

The following equations are used for learning and prediction by the LSTM deep learning model.

$$i_t = \sigma(w_{xi}x_t + w_{hi}h_{t-1} + w_{ci}c_{t-1} + b_i) \quad (3)$$

$$f_t = \sigma(w_{xf}x_t + w_{hf}h_{t-1} + w_{cf}c_{t-1} + b_f) \quad (4)$$

$$c_t = f_t \odot c_{t-1} + i_t \odot \tanh(w_{xc}x_t + W_{hc}h_{t-1} + b_c) \quad (5)$$

$$o_t = \sigma(w_{xo} + w_{ho}h_{t-1} + w_{co}c_{t-1} + b_o) \quad (6)$$

$$h_t = o_t \odot h(c_t) \quad (7)$$

where,  $i_t$  represents the input gate,  $o_t$  the output gate,  $f_t$  the forgetting gate,  $c$  denotes the cell activation vector,  $w$  weight matrix, and  $b$  is the bias vector.  $\odot$  is a the scalar product of two vectors.  $x_t$  and  $h_t$  denotes input-output sequences.

The parameters used in the experiments performed in this study were given as input to the LSTM model. These parameters were used in the construction of the algorithms to be selected while building the model. The selection of the activation function and the construction of the optimization algorithm can be given as examples. In order for the model to make effective and high performance predictions, the optimum values of the hyperparameters should be selected, and also the limits of the hyperparameters should be considered during this selection. Some of these hyperparameters to be selected are the kernel size, epochs, neurons, and layers numbers. However, finding the optimum values of the hyperparameters is a time-consuming process. The first hyperparameters obtained while designing the model usually do not give successful results. In the following process, many trials are made to achieve the highest success of the model and optimum results are obtained. The model is trained with these hyperparameter values. By adjusting the most successful hyperparameter combination, the best results are tried to be obtained by using success metrics. In this study, the hyperparameter values are optimized using GA to increase the success of the LSTM model. Thus, the most successful model was tried to be found.

#### Genetic Algorithm

GA is a population-based and stochastic method. It is also an efficient classification and search algorithm. Its ability to adapt to problems, its fast operation, and the fact that it does not get stuck in local solutions in the search space make it stand out. This algorithm was introduced by John Holland [37]. GA is a method developed based on Darwin's theory of evolution and the principle that the best-adapted individual will survive [38]. The operators that form the basic structure of the algorithm are crossover, mutation, and selection operators. When adapting GA to problems, the representation of individuals should be done correctly, the fitness function should be created efficiently, and the correct genetic operators should be selected.

In GA, each solution corresponds to a chromosome, and gene represents each variable. GA calculates the fitness of each candidate solution in a population, and the individual with the best fitness after all iterations is presented as the solution. The GA algorithm first generates a random initial population. The aim here is to expand the solution space by creating a wide variety of individuals [39]. The pseudocode of GA is given in Figure 4.

---

**Input:**  
Set initial population size ( $n$ )  
Set the maximum ( $MAX$ ) number of iterations  
Define objective function

**Output:**  
Return the best  $X_{best}$  solution

**begin**  
Generate an initial population of  $n$  chromosomes,  $X_i (i = 1, 2, \dots, n)$   
Set iteration counter  $t=0$   
Calculate the fitness value of each chromosome  
**while** ( $t < MAX$ )  
    Select a chromosome pair from the initial population, taking into account the fitness value  
    Perform the crossover operation with a crossover probability on the selected chromosome pair  
    Apply the mutation operation to the offspring with a certain mutation probability  
    Replace the old population with the new population  
    Increase the current number of iterations by one  
**end while**  
Return the best solution  $X_{best}$

**end**

---

**Figure 4.** The pseudocode of GA

The selection operator determines whether chromosomes will participate in the reproduction process. In other words, individuals selected by the selection operator are eligible to enter the crossover pool, while unselected individuals are destroyed. In some studies, the selection operator is also called the reproduction operator. This operator affects the convergence process of the algorithm. Various selection methods include the Roulette wheel, rank, tournament, and Boltzmann [41]. The crossover process, which is used to create new generations in the evolutionary process, comes to life in the genetic algorithm as a crossover operator that produces better solutions. The crossover operator creates a new generation from individuals selected by the selection operator. New chromosomes are produced at this stage, just as new ones are produced from parent chromosomes. After the replication process is finished, two chromosomes are randomly selected from the new population to be crossed. Generally, single-point, double-point, k-point, partially matched, uniform, shuffle, order, and cycle crossover operators are used [40]. The last operator is the mutation operator. With this operator, a process similar to the natural mutation process is carried out. It diversifies the solutions formed after the selection and crossover processes with a certain probability. This increases the diversity of the population, recovers good features that may be lost due to crossover, and prevents the algorithm from getting stuck in local solutions [39]. In the process of optimizing the LSTM model with the genetic algorithm, 20 iterations were performed for each experiment. In the implementation of the GA, the Python-based Distributed Evolutionary Algorithms in

Python (DEAP) package was used. In addition, the Keras and PyGAD packages were used for the LSTM model to integrate the GA into the LSTM. In the optimization process with the GA, the population size was determined as 50 agents. This number of agents was found to be sufficient to reach optimum results by scanning a large part of the solution space. The tanh transfer function was preferred as the activation function used in the LSTM. This function was chosen to ensure that the LSTM cells learn long-term dependencies better. In the output layer, since it was a regression problem, the linear activation function was used. Finally, the KerasGA class generates the initial population of parameters of the LSTM model. The MSE metric served as a fitness measure. Through the algorithm's operation, these values were attempted to be maximized. In other words, an effort was made to identify the maximum fitness value. As a result, GA optimized the parameters of the LSTM. Additionally, the LSTM's weights were initially set to random numbers. Here the sliding window size parameter and the LSTM cells number are represented as chromosomes and encoded in binary bits. Recombination and selection operators work to discover the best solution from the population. As a result, the solutions with the best fitness values were selected for reproduction. If the condition to terminate the algorithm is reached after the reproduction operator is applied, it means that the optimal solution is approached. If the desired quality solutions are not reached as a result of iterations, crossover and mutation operators are applied again in order for the model to generate better solution candidates. The flowchart of the developed model is shown in Figure 5.

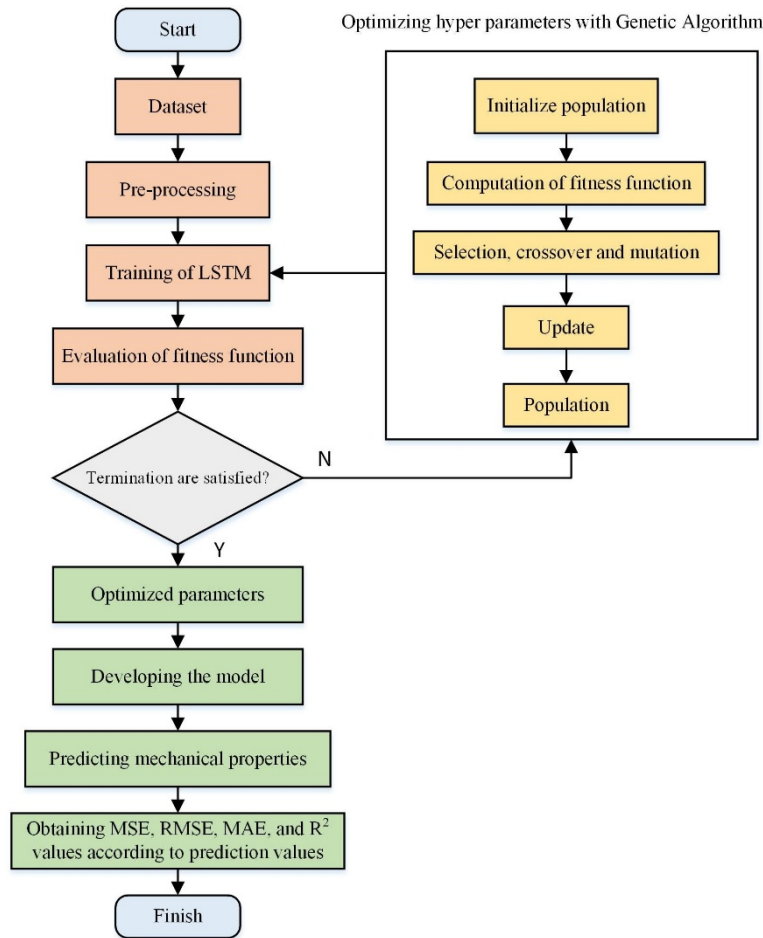


Figure 5. Flowchart of the developed model

## EXPERIMENTAL RESULTS

In order to determine the error between the predictions and the actual values, MSE, MAE, RMSE, and  $R^2$  results are given below for each thermoplastic separately and together.

### Mechanical Predictions of LDPE-HDPE

This study evaluated the mechanical test results of LDPE and HDPE specimens in the data set. In addition, the tensile, bending, and izod test results of LDPE-HDPE obtained with the developed hybrid GA-LSTM model were given.

Table 3 shows the variations among the actual and predicted values of the tensile test results of LDPE and HDPE processed together. If  $R^2$  is examined from these changes, it is seen that it is above 0.9 for all models. Therefore, when this value approaches 1, the difference in standard deviation among the actual and predicted values is nearly negligible, and the accuracy is high. A convergence to zero is sought if the MSE, RMSE, and MAE metrics are examined. When we look at the developed GA-LSTM-based deep learning method, it is seen that the  $R^2$  value is 0.992 and the margin of error is minimum, and the other metrics are the closest values to

0 in the GA-LSTM-based model. If the  $R^2$  value moves away from 1, it is understood that the standard deviation range increases and the difference between the actual and predicted values widen.

Table 3. Tensile strength results

Model	MSE	RMSE	MAE	$R^2$
LR	2.718	1.649	1.271	0.925
RF	1.724	1.313	1.007	0.953
SVM	2.607	1.615	1.176	0.928
MLP	1.482	1.218	0.938	0.959
RNN	1.192	1.092	0.899	0.967
LSTM	0.748	0.865	0.759	0.979
GA-LSTM	<b>0.444</b>	<b>0.666</b>	<b>0.585</b>	<b>0.992</b>

Table 4. Three Point Bending strength results

Model	MSE	RMSE	MAE	$R^2$
LR	1.813	1.347	1.077	0.869
RF	1.780	1.334	0.987	0.871
SVM	3.416	1.848	1.314	0.753

MLP	1.744	1.320	1.096	0.874
RNN	1.569	1.253	1.036	0.886
LSTM	0.800	0.894	0.682	0.942
GA-LSTM	<b>0.771</b>	<b>0.878</b>	<b>0.670</b>	<b>0.958</b>

**Table 5.** Izod impact strength results

Model	MSE	RMSE	MAE	R <sup>2</sup>
LR	9.612	3.100	2.451	0.501
RF	4.393	2.096	1.765	0.772
SVM	8.194	2.862	1.858	0.575
MLP	7.346	2.710	2.195	0.619
RNN	6.062	2.462	1.848	0.686
LSTM	1.441	1.200	0.854	0.925
GA-LSTM	<b>1.396</b>	<b>1.181</b>	<b>0.841</b>	<b>0.939</b>

Tables 4 and 5 analysis reveals that GA-LSTM is the most effective model. The minimal standard deviation R<sup>2</sup> in Table 4 is 0.958, whereas the minimum distinction among the actual and predicted values in Table 5 is 0.939. In addition, if all three tables are examined, it is seen that the LSTM deep learning method gives the second-best results, apart from GA-LSTM.

### Mechanical Predictions of LDPE-HDPE-PP

The results for the LDPE-HDPE and PP co-processed values are given in the tables below. Table 6 shows the success of the tensile test results obtained by machine learning and deep learning methods. These results show that LSTM and GA-LSTM deep learning models give the most accurate convergence, similar to the analysis performed for LDPE and HDPE. However, the difference here is that the standard deviation range, i.e., the difference between the actual and predicted values, is higher than the LDPE-HDPE results. This is because although polypropylene is a commercial thermoplastic in the polyolefin group, it is a different material with different properties than polyethylene.

**Table 6.** Tensile strength results

Model	MSE	RMSE	MAE	R <sup>2</sup>
LR	17.254	4.154	3.380	0.756
RF	16.180	4.022	2.615	0.771
SVM	18.816	4.338	2.803	0.734
MLP	17.297	4.159	3.472	0.755
RNN	8.067	2.840	2.483	0.886
LSTM	7.608	2.758	2.263	0.892
GA-LSTM	<b>7.287</b>	<b>2.699</b>	<b>2.215</b>	<b>0.911</b>

PP and PE have a crystalline/semi-crystalline structure, but PP is synthesized from propene monomer instead of ethylene and has unique properties. LDPE and HDPE are both PE-based; that is, they are more similar in structure since the polymerization of ethylene monomer produces them. The most apparent difference between them is their density. In addition, PP is a brittle material, while PE is ductile. This makes PP more brittle and therefore causes variability from production parameters to test results.

**Table 7.** Three Point Bending strength results

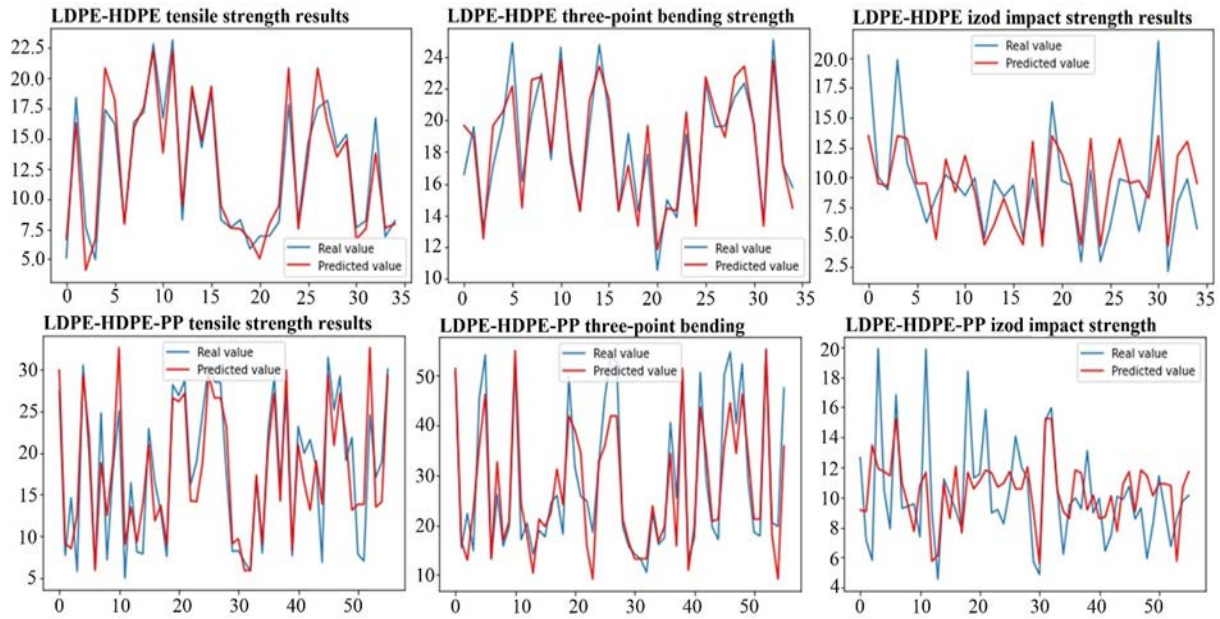
Model	MSE	RMSE	MAE	R <sup>2</sup>
LR	40.777	6.386	5.128	0.810
RF	29.076	5.392	4.048	0.864
SVM	45.741	6.763	4.814	0.786
MLP	38.241	6.184	4.498	0.821
RNN	24.095	4.909	3.525	0.888
LSTM	14.927	3.864	2.210	0.930
GA-LSTM	<b>14.236</b>	<b>3.773</b>	<b>2.158</b>	<b>0.952</b>

**Table 8.** Izod impact strength results

Model	MSE	RMSE	MAE	R <sup>2</sup>
LR	14.587	3.819	2.962	0.224
RF	5.698	2.387	2.006	0.697
SVM	14.707	3.835	2.326	0.218
MLP	3.068	1.751	1.316	0.837
RNN	1.960	1.400	1.081	0.896
LSTM	1.605	1.267	0.968	0.915
GA-LSTM	<b>1.559</b>	<b>1.248</b>	<b>0.954</b>	<b>0.928</b>

The outputs of the models used to predict the bending test results are shown in Table 7. Similar to earlier studies, it is clear from these data that GA-LSTM and LSTM deep learning models produce the most outstanding outcomes. However, the difference between the actual and predicted results has increased since the results for PP are included in addition to LDPE and HDPE. For example, while the R<sup>2</sup> value obtained only for LDPE-HDPE was 0.958, here it was 0.952, slightly more than 1.

Table 8 shows the models' outputs depending on the Izod impact test results obtained by working with LDPE-HDPE-PP. Looking at these results, it is seen that the best models are GA-LSTM and LSTM, deep learning models. The following compares the predicted values obtained for tensile, three-point bending, and izod tests with the actual values. As shown in Figure 6, the mechanical results obtained from the original experimental results were successfully predicted. Graphically, it is seen that the actual results and the predicted results coincide.



**Figure 6.** The comparison of original experimental values and GA-LSTM predicted values

The LDPE-HDPE-PP izod impact strength results overlap less than the others, as shown in the graph above. Within a limited range, the hybrid model gave mechanical results comparable to the actual experimental results.

## DISCUSSION

GA-LSTM has achieved quite successful results in the training and testing phases, but the model's performance with completely new data that is not in the original dataset may have some difficulties. LSTM models are strong at learning long-term dependencies in time series data, but when faced with new untrained data patterns, performance may decrease. This situation can occur especially when structural changes or different distributions in the dataset are not fully reflected in the model.

LSTM optimized with GA may be prone to learning data-specific features. In this way, although the model achieves successful results on training data, it may lead to overfitting problems on new data. Although cross-validation techniques have been used to prevent overfitting, this risk exists when faced with a completely new dataset.

The GA-LSTM model used in this study has shown superior performance in the injection molding processes of polyolefin matrix thermoplastics when compared to other machine learning and deep learning methods frequently used in the literature.

Ahmed et al. [16] used Random Forest and Gradient Boosting models to predict the bending properties of PVC in injection molding processes, providing over 85% accuracy. However, the GA-LSTM model used in this study achieved a superior performance in modeling complex process parameters, achieving over 0.95 in  $R^2$  value.

Schulze Struchtrup et al. [17] used ANN and SVM methods for quality prediction in injection molding, and  $R^2$  values were generally below 0.90 in their studies. Our GA-LSTM model, on the other hand, showed that it better models complex and nonlinear relationships, providing results up to 0.95 in  $R^2$  value, especially in flexural strength and impact strength predictions.

The ability of the LSTM model presented by Hochreiter and Schmidhuber [35] to process time series data was also verified in this study. However, the GA-LSTM model optimized with genetic algorithms clearly demonstrated the effect of parameter optimization by achieving lower error rates in predictions compared to the pure LSTM.

Comparisons with studies in the literature support that the proposed model offers higher accuracy and consistency for the prediction of mechanical properties, especially in polymer-based injection molding processes, compared to the methods in the literature. When compared with the data obtained from other studies in the literature, it was concluded that the hybrid model used can accurately model the effects of different parameters and has a significant potential for improving product quality.

## CONCLUSION

This study investigated the effect of production parameters on product quality in the injection molding of LDPE, HDPE, and PP thermoplastics with particle filler reinforcement. In plastic injection molding production, the part must be easy to separate from the mold, burr formation is prevented, and the part surface must be smooth. All these are also among the factors affecting the mechanical properties of the produced parts. In this study, the optimum production parameters of the parts produced by plastic injection molding were processed with the developed GA-LSTM-based deep learning



model, and the forecasted values were studied using the actual values of the mechanical analysis results of both LDPE-HDPE and LDPE-HDPE-PP. Especially in the LSTM learning model used, it was determined that the  $R^2$  value was close to 1, and the MAE value was close to 0. These results indicate that the standard deviation range is decreasing, and the actual and predicted values are close to each other. Therefore, it is supported that these parameters, which are used primarily in producing synthetic particle filler-reinforced LDPE, HDPE, and PP, can also be used in similar productions. Nowadays, items that directly affect production, such as material and labor costs, especially energy costs, are essential for companies to be sustainable. As a result of the outcomes obtained in this study, energy, labor, and material costs for companies producing with plastic injection molding machines can be reduced, and time losses can be minimized by supporting mass production. Predicting the production parameters that directly affect the product quality, such as temperature, pressure, receiving amount, and cooling time in advance, will allow production to start without trial and error. As a result, material, energy, and time spent on production can be saved. Consequently, the quality of the parts produced and production efficiency will increase positively. In future work, we aim to expand the use of GA-LSTM in different industrial applications and apply it to more complex data sets. In addition, it is planned to apply it to different areas such as other manufacturing processes, biomedical data analysis and time series prediction, in addition to the mechanical properties of the polymer materials used in this study.

## REFERENCES

- [1] Kaiser W. Polyolefine: Kunststoffchemie für Ingenieure, 4th ed., Carl Hanser Verlag, München, Germany, 2016.
- [2] Ravve A. Principles of Polymer Chemistry, Springer, New York, 2000.
- [3] Gysau D. Füllstoffe, Vincentz Network GmbH, Hannover, Germany, 2006.
- [4] Xanthos M. Functional Fillers for Plastics, Wiley-VCH, Hoboken, NJ, 2005.
- [5] Jeyaprakash P, Moshi A.A.M., Rathinavel S., Babu A.G. Mechanical property analysis on powdered tamarind seed-palm natural fiber hybrid composites, Mater Today-Proc 43:1919–1923, 2020.
- [6] Kismet Y., Wagner M.H. Mechanical, thermal, and morphological properties of powder coating waste reinforced acetal copolymer, Polymer Testing 82 (106322), 2020.
- [7] Michaeli W. Einführung in die Kunststoffverarbeitung, Verarbeitungsverfahren für die Kunststoffe, 5th ed., Carl Hanser Verlag, München Germany, 2006.
- [8] Maulidina L.N., Atmaji F.T.D., Alhilman J. The proposed maintenance task for plastic injection machine using reliability and risk centered maintenance (RRCM) method in manufacturing industry, Computer, Mathematics and Engineering Applications, 10, 83-92, 2019.
- [9] Habbal A., Ali M.K, Abuzaraida M.A. Artificial Intelligence Trust, Risk and Security Management (AI TRiSM): Frameworks, applications, challenges and future research directions, Expert Systems with Applications 240:122442, 2024.
- [10] Dwivedi Y.K., Pandey N., Currie W., Micu A. Leveraging ChatGPT and other generative artificial intelligence (AI)-based applications in the hospitality and tourism industry: practices, challenges and research agenda, International Journal of Contemporary Hospitality Management. 36 (1):1-12, 2024.
- [11] Wang W., Wang H., Zhou J., Fan H., Liu X. Machine learning prediction of mechanical properties of braided-textile reinforced tubular structures, Materials & Design. 212:110181, 2021.
- [12] Ogorodnyk O., Lyngstad O.V., Larsen M., Wang K., Martinsen K. Application of machine learning methods for prediction of parts quality in thermoplastics injection molding. Advanced Manufacturing and Automation VIII (pp.237-244), 2019.
- [13] Ogorodnyk O. Towards Intelligent Process Control for Thermoplastics Injection Molding, Norwegian University of Science and Technology, Thesis PhD, 2021.
- [14] Jayabal S., Rajamuneeswaran R., Ramprasath et al., Artificial Neural Network Modeling of Mechanical Properties of Calcium Carbonate Impregnated Coir-Polyester Composites. Transactions of the Indian Institute of Metals. 66 (3):247–255, 2013.
- [15] Rout A.K., Satapathy A. Study on mechanical and tribo-performance of ricehusk filled glass-epoxy hybrid composites, Materials & Design. 41:131–141, 2012.
- [16] Ahmed T., Sharma P., Karmaker C.L., Nasir S. Warpage prediction of Injection-molded PVC part using ensemble machine learning algorithm, Materials Today: Proceedings, 2020.
- [17] Schulze Struchtrup A., Kvaktun D., Schifffers R. A holistic approach to part quality prediction in injection molding based on machine learning. In Advances in Polymer Processing 2020 (pp. 137-149). Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2020.
- [18] Kiehas F., Reiter M., Torres J.P., Jerabek M., Major Z. Predicting Ductile-Brittle transition temperatures for polyolefins using convolutional neural networks and instrumented notched Charpy experiments, Polymer. 126797, 2024.
- [19] Wu F.Y., Yin J., Chen S.C et al. Application of machine learning to reveal relationship between processing-structure-property for polypropylene injection molding, Polymer. 269:125736, 2023.
- [20] Nasri K., Toubal L. Artificial Neural Network Approach for Assessing Mechanical Properties and Impact Performance of Natural-Fiber Composites Exposed to UV Radiation, Polymer. 16(4):538, 2024.
- [21] Kumar S., Gopi T., Harikeerthana N., Gupta M.K., Gaur V., Krolczyk G.M., Wu C. Machine learning techniques in additive manufacturing: a state of the art review on design, processes and production control, Journal of Intelligent Manufacturing. 34(1):21-55, 2023.
- [22] Herriott C., Spear A.D. Predicting microstructure-dependent mechanical properties in additively manufactured metals with machine-and deep-learning methods, Computational Materials Science. 175:109599, 2020.
- [23] Wang J., Ma Y., Zhang L., Gao R.X., Wu D. Deep learning for smart manufacturing: Methods and applications, Journal of Manufacturing Systems. 48:144-156, 2018.
- [24] Jumin E., Zaini N., Ahmed A.N et al. Machine learning versus linear regression modelling approach for accurate ozone concentrations prediction, Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. 14(1):713-725, 2020.
- [25] Su X., Yan X., Tsai C.L. Linear regression, Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics. 4(3):275-294, 2012.
- [26] Utku, A., Akcayol, M. A. Neural Network Based a Comparative Analysis for Customer Churn Prediction.

- Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 12(1): 137-148, 2024.
- [27] Pal M. Random forest classifier for remote sensing classification, *International Journal of Remote Sensing*. 26(1):217-222, 2005.
- [28] Vapnik V. *The Nature of Statistical Learning Theory*. New York: Springer-Verlag, 1995.
- [29] Drucker H., Burges C.J., Kaufman L., Smola A., Vapnik V. Support vector regression machines. *Advances In Neural Information Processing Systems*. 9, 155-161, 1997.
- [30] Najah A., El-Shafie A., Karim O.A., El-Shafie A.H. Application of artificial neural networks for water quality prediction, *Neural Computing and Applications*. 22(1):187-201, 2013.
- [31] Guo Y., Liu Y., Oerlemans A., Lao S., Wu S., Lew M.S. Deep learning for visual understanding: A review, *Neurocomputing*. 187:27-48, 2016.
- [32] Sherstinsky A. Fundamentals of recurrent neural network (RNN) and long short-term memory (LSTM) network, *Phys D: Nonlinear Phenom*. 404:132306, 2020.
- [33] Ackerson J.M., Dave R., Seliya N. Applications of recurrent neural network for biometric authentication & anomaly detection, *Information*. 12(7):272, 2021.
- [34] Kuanar S., Athitsos V., Pradhan N., Mishra A., Rao K.R. Cognitive analysis of working memory load from EEG, by a deep recurrent neural network. In 2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (pp. 2576-2580). IEEE, 2018.
- [35] Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory, *Neural Computation*. 9(8):1735-1780, 1997.
- [36] Utku, A. Hindistan'daki Turistik Şehirlerin İklim Değişkenlerinin Tahminine Yönelik Hibrit ConvGRU Modeli. *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, 6(2): 165-176, 2024.
- [37] Utku, A., Can, Ü., Kamal, M., Das, N., Cifuentes-Faura, J., Barut, A. A long short-term memory-based hybrid model optimized using a genetic algorithm for particulate matter 2.5 prediction. *Atmospheric Pollution Research*, 14(8), 2023.
- [38] Goldberg D.E., Holland J.H. Genetic algorithms and machine learning. 3 (2): 95-99, 1988.
- [39] Mirjalili S. Genetic algorithm. In *Evolutionary algorithms and neural networks* (pp. 43-55). Springer, Cham, 2019.
- [40] Katoch S., Chauhan S.S., Kumar V. A review on genetic algorithm: past, present, and future, *Multimedia Tools Application*. 80(5):8091-8126, 2021.
- [41] Slowik A., Kwasnicka H. Evolutionary algorithms and their applications to engineering problems, *Neural Computing and Applications*. 32(16):12363-12379, 2020.



## The Effect of *Viburnum opulus* L. Fruit Extract on Seed Germination and Seedling Growth of Maize (*Zea mays* L.) Under Salt Stress

Cansu ALTUNTAŞ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Medical-Aromatic Plants Application and Research Center, Artvin Coruh University, 08100, Artvin, Turkey

✉: [cansualtuntas@artvin.edu.tr](mailto:cansualtuntas@artvin.edu.tr)  0000-0002-1363-6142

Received (Geliş): 27.09.2024

Revision (Düzeltilme): 27.10.2024

Accepted (Kabul): 16.12.2024

### ABSTRACT

*Viburnum opulus* L., known for its high antioxidant activity and positive health effects, is a valuable medicinal plant. The effects of different concentrations of *Viburnum opulus* fruit extract on seed germination and seedling growth of maize (*Zea mays* L.) under salt stress were investigated. Parameters such as germination rate, speed, energy, seed viability were examined; additionally, shoot and root., as well as shoot and root length, weight, and hypocotyl length were evaluated. The findings revealed that 500 and 1000 µg/ml *Viburnum opulus* fruit extract significantly inhibited germination and growth, while 125 µg/ml had no substantial effect. However, the application of 250 µg/ml *Viburnum opulus* fruit extract notably promoted seed germination and seedling growth under salt stress. These results suggest that 250 µg/ml *Viburnum opulus* fruit extract may play a critical role in enhancing tolerance to salt stress.

**Keywords:** Germination, Growth, Maize, Salt stress

### Tuz Stresi Altında Mısır (*Zea mays* L.) Tohumlarının Çimlenmesi ve Fide Büyümesine *Viburnum opulus* L. Meyve Ekstraktının Etkisi

### ÖZ

Gilaburu (*Viburnum opulus* L.), yüksek antioksidan aktivitesi ve sağlık üzerindeki olumlu etkileriyle bilinen değerli bir tıbbi bitkidir. Bu çalışmada, *Viburnum opulus* meyve ekstraktının farklı konsantrasyonlarının tuz stresi altındaki mısır tohumlarının çimlenmesi ve fide gelişimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çimlenme oranı, hızı, enerjisi ve tohum canlılığı gibi parametreler incelenmiş; ayrıca sürgün ve kök uzunluğu, ağırlığı ve hipokotil uzunluğu değerlendirilmiştir. Bulgular, 500 ve 1000 µg/ml *Viburnum opulus* meyve ekstraktı uygulamalarının çimlenme ve büyümeyi belirgin şekilde sınırladığını, 125 µg/ml'nin ise anlamlı bir etki göstermediğini ortaya koymuştur. Ancak, 250 µg/ml *Viburnum opulus* meyve ekstrakt uygulamasının tohum çimlenmesini ve fide gelişimini tuz stresi altında anlamlı düzeyde teşvik ettiği gözlenmiştir. Bu sonuçlar, 250 µg/ml *Viburnum opulus* meyve ekstraktının tuz stresine toleransta önemli bir rol oynayabileceğini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Büyüme, Çimlenme, Mısır, Tuz stresi

### INTRODUCTION

Abiotic stresses, such as heavy metals, drought, extreme temperatures, salinity, and UV radiation, pose significant threats to crop productivity, leading to substantial yield losses. Among these, salt stress is particularly impactful, as it severely impedes seed germination and early seedling development. High salinity levels are especially detrimental during the germination phase, where elevated salt concentrations reduce germination rates, indices, and seedling growth parameters, including root and shoot lengths and fresh weight. This inhibition is primarily due to salt-induced interference with water uptake, which is crucial during the early stages of plant development [1]. Moreover, high salinity triggers osmotic stress and ion toxicity, disrupting essential physiological processes and

ultimately diminishing crop yields [2]. Notably, the impact of salt stress varies widely across different plant species. Wild plants, often demonstrate higher resilience to salinity compared to cultivated crops [3]. Understanding these species-specific responses is crucial for developing targeted strategies to enhance salt tolerance in crops, especially given that salinity affects approximately 20% of the world's cultivated land and 33% of irrigated agricultural land [4]. This knowledge is vital for advancing agricultural resilience in the face of growing environmental challenges.

Exogenous applications have demonstrated significant potential in enhancing seed germination under salt stress by improving various physiological responses that enable plants to cope with saline conditions. Studies indicate that substances such as salicylic acid (SA), melatonin (MT), and gibberellic acid (GA) can

effectively stimulate germination even in high-salinity environments [5-7]. For instance, SA has been found to mitigate the inhibitory effects of salinity on seed germination by enhancing antioxidant activity and modulating hormonal balances that support stress tolerance [8]. Similarly, MT application has been shown to increase germination rates in salt-stressed seeds by regulating genes associated with stress response pathways, thereby facilitating improved osmotic adjustment and protection against oxidative damage [9]. Additionally, GA has been reported to counteract salt-induced reductions in germination by maintaining cellular ion balance and promoting the breakdown of germination inhibitors [10]. These findings underscore the utility of exogenous treatments in promoting seed germination and establishing robust seedlings in salt-affected soils, providing a valuable strategy for sustaining crop production in challenging environments [11], [12].

*Viburnum opulus* (VO) is a valuable decorative, medicinal, and edible plant belonging to the Adoxaceae family, naturally growing in Europe, Russia, and some regions of North Africa and North Asia [13, 14]. It is commonly known as guelder rose, European cranberrybush, rosol elder, European guelder, water elder, crampbark, snowball tree, and in Turkey, it is referred to as gilaburu [15, 16]. *V. opulus* holds a significant place in traditional medicine, where its fruit juice is utilized for the treatment of coughs, colds, tuberculosis, rheumatic pain, ulcers, liver diseases, diabetes, and hypertension [17-18]. Numerous studies have revealed various biological activities of *V. opulus*. Animal studies have supported VO's positive effects on the urinary system [19, 20] anti-inflammatory [21], and vasorelaxant [22] activities. In vitro studies indicate that the *V. opulus* shows antimicrobial [23,] antidiabetic [24] anti-obesity [25] anti-inflammatory [26] and anti-cancer [27] properties.

The beneficial effects of *V. opulus* are attributed to its bioactive compounds, including phenolic compounds, vitamin C, carotenoids, iridoids, and essential oils [13], [28, 29]. This rich composition positions *V. opulus* as a promising raw material for the production of functional foods. Additionally, it has been determined that *V. opulus* fruit concentrate can serve as an alternative antioxidant source to delay oxidative changes in the food industry and holds potential as a natural preservative in various products [30].

The aim of this study was to elucidate whether *V. opulus* fruit extracts (VOFE) have a role on the germination of maize seeds under salt stress conditions. The aim of this study is to investigate the bioactive compounds of *V. opulus* and their potential effects on plant development under abiotic stress conditions, particularly salt stress. Additionally, the study seeks to evaluate the traditional medicinal significance of *V. opulus*, its diverse biological activities (such as antimicrobial, anti-inflammatory, and anticancer properties), and its potential applications in functional food production. This research aims to explore the role

of *V. opulus* bioactive compounds in enhancing resilience to abiotic stresses in agricultural production while highlighting its value as a natural resource for health and food industries.

## MATERIAL and METHODS

### Preparation of *V. opulus* Fruit Extraction

Fresh *V. opulus* fruits were thoroughly washed with tap water and allowed to drain overnight. Following traditional extraction methods practiced by the local population, a crude extract was prepared. Specifically, 40 g of fresh fruit sample was ground with 2000 mL of tap water using a hand grinder until a homogeneous pellet formed. The mixture was then filtered through 0.22  $\mu\text{m}$  filter paper to obtain a clear extract. The resulting extract was stored at +4°C in darkness for subsequent pretreatment applications on maize seedlings. The obtained extract was stored in a refrigerator at +4°C for analyses.

### Plant Material, Germination Conditions and Experimental Design

*Zea mays* L. (cultivar, ADA 523) seeds were provided from Sakarya Maize Research Institute. The seeds were initially washed with 70% ethanol and then surface-sterilized with a 5% sodium hypochlorite solution [31] for 3 minutes. Residual hypochlorite was removed by rinsing the seeds five times with sterile distilled water, after which the seeds were placed in sterilized petri dishes. Germination was conducted in a plant growth chamber under controlled conditions of 60–65% relative humidity, a light intensity of 400  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , a temperature of 25°C  $\pm$  2, and a 16-hour light/8-hour dark photoperiod. Firstly, based on the measurement of germination percentage by applying four different salt conditions (0, 150, 200 and 300 mM NaCl) to maize seeds, the salt concentration of 300 mM NaCl, which causes severe stress on seed germination, was determined.

Secondly, four different VOFE treatments (125, 250, 500, 1000  $\mu\text{g/ml}$ ) were applied to maize seeds to test the hypothesis that VOFE applications would increase the germination limited by salt stress conditions and contribute strongly to salt stress tolerance. The seeds were pretreated with VOFE solutions for 24 hours and then subjected to 300 mM NaCl for 10 days. For each petri dish, 10 mL of the salt solution was added, and germination parameters were recorded daily for 10 days. Germination percentage, germination energy, germination rate index, mean germination time, root length, hypocotyl length, root weight, and shoot weight were evaluated. This study aimed to assess the potential effects of VOFE on mitigating the adverse effects of salt stress on maize seed germination and seedling growth.

### Collection of *Viburnum opulus* Fruits

The mature fruits of *V. opulus* (VO) were collected on August 29, 2023, from the vicinity of Şavşat Karagöl National Park, Artvin, along roadsides and near streams (600 m, 41°18'15"N, 42°28'10"E). Specimen identification was verified through herbarium materials (Aksu 459). These collected fruits are preserved in the personal collection at the Medical Plants Application and Research Center of Artvin Çoruh University.

### Germination Assessment

#### Germination Percentage (%GP)

The number of seeds germinated was recorded daily for up to 10 days. From these germination counts, several germination attributes were calculated to characterize the salt tolerance, including germination percentage (%). Seeds with 2 mm long rootlets emerging 3 days after sowing were counted as germinated, and the seeds were counted as germinated when cotyledons appeared at the end of the 10th day.

$$FGP\% = [TNG/TNP] \times 100$$

where FGP % refers to the final germination percentage, TNG refers to the total number of germinated seeds, and TNP refers to the total number of seeds [32].

#### Germination Rate Index (GRI)

The germination rate index (GRI) represents the daily germination percentage throughout the germination period. Higher GRI values indicate both a greater percentage of seeds germinating and a faster overall germination process.

$$GI = \sum(Gt/Tt)$$

where Gt is the number of seeds germinated on day t, and Tt is the number of days [33].

#### Germination Energy (GE)

Germination energy was assessed on the fourth day by counting the number of typical seedlings [34].

#### Mean Germination Time (MGT)

The lower the MGT, the faster a population of seeds has germinated.

$$MGT = \sum(Ti \times Ni) / \sum Ni$$

where MGT refers to mean germination time, Ni refers to the number of germinated seeds on germination days, and Ti refers to the number of days during the germination interval (between 0 and 10 days) [35].

#### Seed Vigour (SV)

$$SV = [SDM(g) \times GP/100]$$

where SI = seed vigour, SDM is the dry seedling mass (g), and GP = germination (%) [36].

### Seedlings Growth Assessment

To assess seedling growth, ten seedlings were randomly selected from each petri dish at the end of the germination period. After selection, shoot length (SL), root length (RL) and hypocotyl length (HL) were measured in cm. We also assessed shoot fresh weight (SFW) and root fresh weight (RFW). SFW and RFW were measured in grams (gr), while the SL, RL, and HL were shown in centimeters (cm).

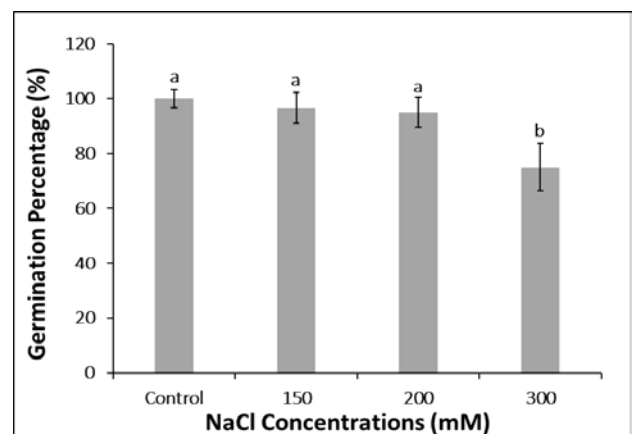
### Statistical Analysis

Each experiment was conducted with a minimum of three replicates. Using one-way analysis of variances (ANOVA), data were analyzed via SPSS software version 27.0 in relation to the Duncan's multiple range test, which was used for comparisons among the treatment means.

## RESULTS and DISCUSSION

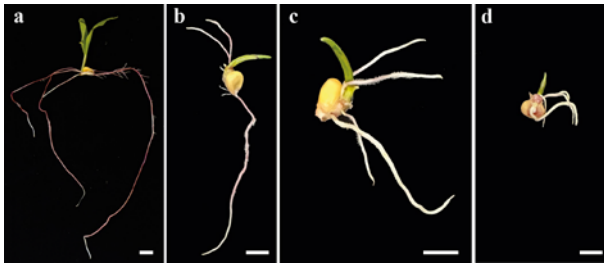
### Effect of Different Salt Stress Conditions on Germination Percentage (%) and Morphological Changes

Firstly, the effective salt stress concentration was selected based on the germination percentage. It was determined that 150 mM NaCl and 200 mM NaCl treatments did not cause a statistically significant difference in germination percentage compared to the control group (non-stressed group). However, 300 mM NaCl treatments decreased the germination percentage in maize seedlings by 25% (Fig 1). According to results, 300 mM NaCl was selected as the salt stress concentration that severe affected seed germination.



**Figure 1.** Effects of Different Salt Concentrations on GP (%) in Maize. Bars marked with the same letters indicate no significant difference ( $p \leq 0.05$ ), VOFE: *Viburnum opulus* fruit extract, GP: Germination percentage (%).

To visually demonstrate the effects of salt stress, representative images of maize seedlings subjected to different salt stress concentrations were provided (Figure 2). In the control group (Figure 2a), healthy root and shoot development was observed. Similarly, treatments with 150 mM NaCl (Figure 2b) and 200 mM NaCl (Figure 2c) did not show significant reductions in root and shoot development compared to the control. However, seedlings exposed to 300 mM NaCl (Figure 2d) exhibited a marked reduction in root and shoot growth, clearly demonstrating the detrimental effects of salt stress.



**Figure 2.** Morphological Alterations of Maize Seedlings After 10 Days of Germination under Different Salt Stress Concentrations. (a) Control group (no salt stress applied); (b) 150 mM NaCl treatment; (c) 200 mM NaCl treatment; (d) 300 mM NaCl treatment. Scale bars represent 1 cm.

#### **Effect of VOFE on Germination Percentage (%) and Germination Rate Index under Salt Stress**

To minimize the aging process and protect seedlings from environmental stressors, seeds must meticulously regulate the germination process. Germination and seedling development are essential stages in a plant's life cycle, greatly influenced by temperature and moisture conditions. In this context, the germination percentage (GP) plays a critical role in determining seed viability, plant establishment, and final crop yield, particularly under adverse environmental conditions [37, 38]. Many studies have highlighted the beneficial effects of exogenous antioxidant applications, such as MT and SA, 2,4-epibrassinolide (EBR) etc. on improving seed germination in some crops under salt stress conditions. For instance, MT and EBR have been shown to significantly enhance GE and GRI and improve seedling growth by activating antioxidant defense mechanisms [39]. Likewise, as shown Table 1, compared to the salt stressed group alone, 125 and 250  $\mu\text{g/ml}$  VOFE increased the GP by 11.2% and 19.6%, respectively, whereas 500 and 1000  $\mu\text{g/ml}$  VOFE decreased in the germination percentage by 8.8% and 6.6% (Table 1).

The germination rate index (GRI), a key indicator of seedling vigor and speed of development, can be significantly improved under salt stress conditions through the application of growth regulators or protective treatments, helping to mitigate the inhibitory effects of salinity and promote more uniform and rapid germination [40]. Studies have shown that improving

the GRI under salt stress can be achieved through various methods. For example, exogenous GA3 treatment significantly increased the germination rate index, seed vigor, and other parameters under salt stress conditions, thereby reducing the inhibitory effects of salinity on seed germination [11]. Similarly, seed priming techniques have proven effective in enhancing germination indices in salt-stressed wheat seeds, showing improved germination rates even at higher NaCl concentrations [40]. As shown Table 1, 125, 250, 500 and 1000  $\mu\text{g/ml}$  VOFE increased the GRI by 24.3%, 31.27%, 12.19% and 6.32%, respectively, in comparison with the salt stressed group alone. The highest the GRI was showed in 250  $\mu\text{g/ml}$  VOFE. These results suggest that 250  $\mu\text{g/ml}$  VOFE could be more effective in promoting seed germination under salt stress due to its high antioxidant properties, providing a promising approach to enhancing maize resilience to salinity and improving crop productivity [41].

#### **Effect of VOFE on Germination Energy Index under Salt Stress**

The ability to optimize germination energy (GE) is key to ensuring plant establishment in adverse environmental conditions, as seeds with higher GE show better resilience and growth potential under stress, such as salinity. As shown Table 1, compared to the salt stressed group alone, 125  $\mu\text{g/ml}$  VOFE  $\mu\text{g/ml}$  did not cause a statistically significant ( $p \leq 0.05$ ) difference in the GE. However, 250  $\mu\text{g/ml}$  VOFE increased the GE by 15.28%, but 500 and 1000  $\mu\text{g/ml}$  VOFE decreased by 18.5% and 16.08% in comparison with the salt stressed group alone (Table 1). Some studies has shown that the positive effects of exogenous treatments on improving seed GE and resilience some plants under salt stress conditions [42, 43]. For instance, exogenous proline improved GE in rice under salt stress [43]. These results provide valuable insights into how about 250  $\mu\text{g/ml}$  VOFE can improve GE and seedling development under salt stress conditions?

#### **Effect of VOFE on Mean Germination Time under Salt Stress**

Mean germination time (MGT) serves as an indicator of both the spread of time and the speed of germination across the seed population [44]. Therefore, a high germination rate generally corresponds with a lower MGT, which means the seeds germinate faster and more efficiently [44]. As shown Table 1, it was detected that 125, 500 and 1000  $\mu\text{g/ml}$  VOFE  $\mu\text{g/ml}$  did not cause a significant difference in MGT compared to the salt stressed group alone. However, 250  $\mu\text{g/ml}$  VOFE decreased the MGT by 7.24%. The lowest the MGT was observed with 250  $\mu\text{g/ml}$  VOFE (Table 1). The relationship between GP and MGT is significant as MGT is used to assess the speed of germination. A study showed that maize seeds with a higher GP typically have a lower MGT, indicating that they

complete germination more quickly [45]. The results for GP and rate provide strong evidence that, with the increased GP and rate due to 250 µg/ml VOFE, the germination time decreased under salt stressed group alone. The results provide strong evidence that the 250 µg/ml VOFE not only increased germination percentage rate but also effectively reduced mean germination time in comparison with the salt stressed group alone.

### Effect of VOFE on Seed Vigour under Salt Stress

Seed vigour, a complex agronomic trait that encompasses seed longevity, germination speed, seedling growth, and early stress tolerance, determines the duration and success of the establishment period. In this process, the germination rate-defined as the percentage of seeds that successfully sprout within a specific timeframe-serves as a key indicator of seed viability and vigour under various environmental conditions [46]. The results showed that 125 and 250 µg/ml VOFE increased the SV by 25.04% and 32.8%. However, 500 and 1000 µg/ml VOFE decreased the SV by 19.54% and 29.14%, respectively, in comparison with salt stressed group alone (Table 1). The SV is strongly influenced by germination percentage, as a higher germination percentage typically reflects a more vigorous seed lot, indicating that seeds are not only viable but also capable of rapid and uniform development [47]. Compared to the salt stressed group alone, the increase in germination percentage observed with the application of 250 µg/ml VOFE aligns with the enhanced vigour index, further reinforcing its potential role in mitigating the adverse effects of salinity.

**Table 1.** Effects of Salt Stress and Different VOFE on GP, GRI, GE and MGT and SV in Maize

Treatment	GP (%)	GRI	GE	MGT	SV
300 mM NaCl	75±8.6 <sup>c</sup>	16.35±0.3 <sup>c</sup>	71.5±3 <sup>b</sup>	6.25±0.17 <sup>a</sup>	317.7±2.2 <sup>c</sup>
<i>Under salt stress conditions</i>					
125 µg/ml VOFE	84.4±3.5 <sup>b</sup>	21.6±0.6 <sup>b</sup>	78.3±5.5 <sup>b</sup>	6.25±0.14 <sup>a</sup>	423.9±9.8 <sup>f</sup>
250 µg/ml VOFE	93.3±4.2 <sup>a</sup>	23.8±1.2 <sup>a</sup>	84.4±6.3 <sup>a</sup>	5.8±0.11 <sup>b</sup>	473.1±8.4 <sup>e</sup>
500 µg/ml VOFE	68.3±5.5 <sup>c</sup>	18.6±1.5 <sup>c</sup>	58.3±8.6 <sup>c</sup>	6.2±0.11 <sup>a</sup>	255.6±2.3 <sup>d</sup>
1000 µg/ml VOFE	70±7.5 <sup>c</sup>	17.4±1.7 <sup>d</sup>	60±4.7 <sup>c</sup>	6.24±0.15 <sup>a</sup>	225.1±3.2 <sup>e</sup>

Bars marked with the same letters indicate no significant difference ( $p \leq 0.05$ ), VOFE: *Viburnum opulus* fruit extract, GP: Germination percentage (%), GRI: germination rate index, GE: germination energy, MGT: mean germination time and SV: seed vigor

### Effect of VOFE on Seedling Growth Parameters on Salt Stress

As shown Table 2, the effect of various concentrations of VOFE on shoot fresh weight (SFW), shoot length (SL), root fresh weight (RFW), root weight (RW), hypocotyl length (HL) were evaluated and also as

shown Figure 2, the morphological alterations were observation under salt stress.

The shoot fresh weight (SFW) was decreased with 125, 500, and 1000 µg/ml VOFE by 20.37%, 5.28% and 27.16% respectively, in comparison with salt stressed group alone. However, the 250 µg/ml VOFE concentration was observed to increase SFW by 5.69% comparison with salt stressed group alone (Table 2). Compared to salt stressed group alone, 125, 250, 500 µg/ml VOFE increased the shoot length (SL) by 81.3%, 87.5%, 62.5%, respectively. However, SL did not show any statistically significant ( $p \leq 0.05$ ) change with the 1000 µg/ml VOFE under salt stressed group alone. The highest SL was observed in 250 µg/ml VOFE.

Likewise, the root fresh weight (RFW) was decreased with 125, 500 and 1000 µg/ml VOFE by 11.94%, 34.82%, and 43.78%, respectively, but 250 µg/ml VOFE increased RFW by 15.55% in comparison with salt stressed group alone (Table 2). Additionally, in root length (RL), 125, 500 µg/mL and 1000 µg/mL VOFE did not result in a statistically significant ( $p \leq 0.05$ ) difference compared to the salt stressed group alone. However, the 250 µg/mL VOFE increased RL by 37.4% under salt stressed group alone (Table 2).

The hypocotyl length (HL) of plants tends to reduce significant or not? due to the inhibitory effects of salinity on cell elongation and overall growth compared to salt stressed alone. For instance, studies have shown that exposure to high salt stress leads to a reduction in the length of the hypocotyl, indicating that inhibition of normal hypocotyl growth [48]. As shown in Table 1, HL did not show any statistically significant ( $p \leq 0.05$ ) change with the 125 and 500 µg/ml VOFE under salt stressed group alone. However, it was observed that the 250 µg/ml VOFE increased the HL by 18.46%, in comparison with salt stress treatment alone. Additionally, no hypocotyl development was detected with 1000 µg/ml VOFE (Table 2). Many studies investigated that several exogenous substances, have a potential antioxidant properties, have been shown to mitigate the adverse effects of salt stress. For example, in a study on *Leptochloa fusca*, it was observed that increased salinity up to 300 mM NaCl led to improved root and shoot length under salt [49].

**Table 2.** Effects of Salt Stress and Different VOFE on SFW, SL, RFW, RL and HL in Maize.

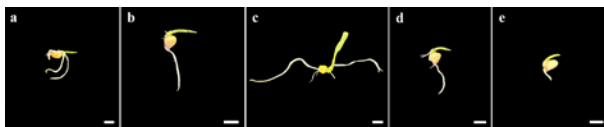
Treatment	SFW (gr)	SL (cm)	RFW (gr)	RL (cm)	HL (cm)
300 mM NaCl	2.65±0.02 <sup>c</sup>	0.3±0.03 <sup>d</sup>	2.01±0.03 <sup>b</sup>	3.6±1.2 <sup>b</sup>	1.06±0.12 <sup>b</sup>
<i>Under salt stress conditions</i>					
125 µg/ml VOFE	2.68±0.03 <sup>b</sup>	1.06±0.01 <sup>b</sup>	1.77±0.04 <sup>c</sup>	3.6±1.1 <sup>b</sup>	1.06±0.07 <sup>b</sup>
250 µg/ml VOFE	2.81±0.04 <sup>a</sup>	2.4±0.02 <sup>a</sup>	2.38±0.02 <sup>a</sup>	5.75±0.67 <sup>a</sup>	1.3±0.08 <sup>a</sup>
500 µg/ml VOFE	2.51±0.02 <sup>d</sup>	0.8±0.04 <sup>c</sup>	1.31±0.06 <sup>d</sup>	3.4±1.3 <sup>b</sup>	1.1±0.07 <sup>b</sup>
1000 µg/ml VOFE	1.93±0.05 <sup>e</sup>	0.36±0.03 <sup>d</sup>	1.13±0.07 <sup>e</sup>	2.52±0.8 <sup>b</sup>	-

Bars marked with the same letters indicate no significant difference ( $p \leq 0.05$ ), VOFE: *Viburnum opulus* fruit extract, SFW: shoot fresh weight, SL: shoot length, RFW: root fresh weight, RL: root length and HL: hypocotyl length



Similarly, jasmonic acid was found to significantly increase root and shoot growth parameters in *Hibiscus sabdariffa* seedlings [50]. These findings suggest that specific antioxidant substance treatments can enhance growth and stress resilience in plants exposed to high salinity conditions. These results support that, compared to salt stressed group alone, 250 VOFE  $\mu\text{g/ml}$ , due to its antioxidant potential, can significantly promote plant growth and development, thereby enhancing salt stress tolerance in plants.

As shown Figure 2, the effects of different concentrations of *V. opulus* fruit extract (VOFE) on the germination and morphology of maize seeds under 300 mM NaCl salt stress. In the absence of VOFE application (Figure 2a), the adverse effects of salt stress are evident, with root and shoot growth severely inhibited, highlighting the significant inhibitory impact of 300 mM NaCl on germination and seedling development. When 125  $\mu\text{g/mL}$  VOFE was applied (Figure 3b), slight improvements in root and shoot elongation were observed, indicating a partial alleviation of salt stress. The most notable improvement was observed at 250  $\mu\text{g/mL}$  VOFE (Figure 3c), where the seedlings exhibited maximum root and shoot lengths and enhanced vigor, suggesting that this concentration was the most effective in mitigating the effects of salt stress. However, at 500  $\mu\text{g/mL}$  VOFE (Figure 3d), the growth improvement was limited and less pronounced compared to 250  $\mu\text{g/mL}$ . At the highest concentration of 1000  $\mu\text{g/mL}$  VOFE (Figure 3e), seedling growth was severely inhibited, producing results similar to or worse than those observed under salt stress alone (Figure 3a). This suggests potential toxicity or reduced efficacy at excessive concentrations. Overall, 250  $\mu\text{g/mL}$  VOFE emerges as the optimal concentration for supporting maize seed germination and seedling development under salt stress, demonstrating its potential as a biostimulant for alleviating plant stress.



**Figure 3.** Morphological Effects of Different Concentrations of *Viburnum opulus* Fruit Extract (VOFE) on Maize Seed Germination and Seedling Growth under 300 mM NaCl. (a) 300 mM NaCl; (b) 125  $\mu\text{g/mL}$  VOFE; (c) 250  $\mu\text{g/mL}$  VOFE; (d) 500  $\mu\text{g/mL}$  VOFE; (e) 1000  $\mu\text{g/mL}$  VOFE. Scale bars represent 1 cm.

## CONCLUSION

Maize seeds were treated with varying concentrations of *Viburnum opulus* fruit extract (VOFE) to evaluate its effectiveness in enhancing germination and growth under salt stress conditions. The results showed that especially 500 and 1000  $\mu\text{g/ml}$  VOFE had a detrimental effect on seed germination and seedling development,

including root and shoot length/weight, as well as hypocotyl length under 300 mM salt stress. However, the exogenous treatment of 250  $\mu\text{g/ml}$  VOFE significantly improved germination and promoted plant growth, indicating increased tolerance to high salinity. These findings strongly suggest that the antioxidant properties of *Viburnum opulus*, 250  $\mu\text{g/ml}$  VOFE plays a crucial role in mitigating the harmful effects of salt stress, providing strong evidence for its potential use in enhancing crop resilience in saline environments. Consequently, the exogenous application of VOFE during the germination stage is an effective strategy to improve seed performance under salt stress. It is therefore recommended to prime crop seeds with VOFE before planting in saline conditions.

## THANKS

We would like to thank Dr. Nurşen AKSU KALMUK and for her valuable contributions in collecting the *Viburnum opulus* plant materials from the field. Also, we would like to thank Kemal Vehbi İMAMOĞLU for technical assistance in the figures and tables.

## REFERENCES

- [1] Bliss R., Platt-Aloia K., Thomson W. Effects of salt on cell membranes of germinating seeds, California Agriculture. 38 24-25, 1984.
- [2] Naseer S., Nisar A., Ashraf M. Effect of salt stress on germination and seedling growth of barley (*Hordeum vulgare* L.), Pakistan Journal of Biological Sciences. 4 359-360, 2001.
- [3] Demir I., Okcu G. Aerated hydration treatment for improved germination and seedling growth in aubergine (*Solanum melongena*) and pepper (*Capsicum annuum*), Annals of Applied Biology. 144 121-123, 2004.
- [4] Machado R.M.A., Serralheiro R.P. Soil salinity: effect on vegetable crop growth. Management practices to prevent and mitigate soil salinization, Horticulturae. 3 30, 2017.
- [5] Liu J., Li L., Yuan F., Chen M. Exogenous salicylic acid improves the germination of *Limonium bicolor* seeds under salt stress, Plant Signaling & Behavior. 14 e1644595, 2019.
- [6] Chen L., Lu B., Liu L., Duan W., Jiang D., Li J., Bai Z. Melatonin promotes seed germination under salt stress by regulating ABA and GA3 in cotton (*Gossypium hirsutum* L.), Plant Physiology and Biochemistry. 162 506-516, 2021.
- [7] Alonso-Ramírez A., Rodríguez D., Reyes D., Jiménez J.A., Nicolás G., López-Climent M., Gómez-Cadenas A., Nicolás C. Evidence for a role of gibberellins in salicylic acid-modulated early plant responses to abiotic stress in Arabidopsis seeds, Plant Physiology. 150 1335-1344, 2009.
- [8] Farhangi-Abriz S., Ghassemi-Golezani K. How can salicylic acid and jasmonic acid mitigate salt toxicity in soybean plants?, Ecotoxicology and environmental safety. 147 1010-1016, 2018.
- [9] Ebrahimi M., Ehsanzadeh P., Vafadar F. Exogenously applied melatonin and calcium alleviate salt injuries to growth, physiological, and biochemical attributes of *Borago officinalis*, Journal of Plant Growth Regulation. 42 6853-6869, 2023.
- [10] Kim S.G., Park C.M. Gibberellic acid-mediated salt signaling in seed germination, Plant Signal Behav. 3 877-9, 2008.

- [11] Qiu Z., Guo J., Zhu A., Zhang L., Zhang M. Exogenous jasmonic acid can enhance tolerance of wheat seedlings to salt stress, Ecotoxicology and environmental safety. 104 202-208, 2014.
- [12] Ali Q., Daud M., Haider M.Z., Ali S., Rizwan M., Aslam N., Noman A., Iqbal N., Shahzad F., Deeba F., Ali I., Zhu S.J. Seed priming by sodium nitroprusside improves salt tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) by enhancing physiological and biochemical parameters, Plant physiology and biochemistry. 119 50-58, 2017.
- [13] Rop O., Reznicek V., Valsikova M., Jurikova T., Mlcek J., Kramarova D. Antioxidant properties of European cranberrybush fruit (*Viburnum opulus* var. *edule*), Molecules. 15 4467-4477, 2010.
- [14] Konarska A., Domaciuk M. Differences in the fruit structure and the location and content of bioactive substances in *Viburnum opulus* and *Viburnum lantana* fruits, Protoplasm. 255 25-41, 2018.
- [15] Velioglu, Y.S, Ekici L., Poyrazoglu E.S. Phenolic composition of European cranberrybush (*Viburnum opulus* L.) berries and astringency removal of its commercial juice, International journal of food science & technology. 41 1011-1015, 2006.
- [16] Akbulut M., Calisir S., Marakoglu T., Coklar H. Chemical and technological properties of European cranberrybush (*Viburnum opulus* L.) fruits, Asian Journal of Chemistry. 20 1875, 2008.
- [17] Soyлак A., Elci L., Saracoglu S., Divrikli U. Chemical analysis of fruit juice of European cranberrybush (*Viburnum opulus*) from Kayseri-Turkey. Asian Journal of Chemistry. 14 135-138, 2002.
- [18] Al Ö., Ülger H., Eetekin T., Nisari M., Susar H., Ceylan D., Karatoprak G.Ş. The effect of gilaburu (*Viburnum opulus*) juice on Ehrlich ascites tumor (EAT) cell culture, In Proceedings. 1 1051, 2017.
- [19] Ilhan M., Ergene B., Süntar I., Özbilgin S., Çitolu G.S., Demirel M.A., Keles H., Altun L., Akkol E.K. Preclinical evaluation of antiurolithiatic activity of *Viburnum opulus* L. on sodium oxalate-induced urolithiasis rat model, Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine. 1 578103, 2014.
- [20] Erdem G., Kesik V., Honca T., Ozcan A., Uguz S., Akgul E.O., Aykutlug O., Alp B.F., Korkmazer N., Saldır M. Antinephrolithiatic activity of *Persea americana* (avocado) and *Viburnum opulus* (guelder rose) against ethylene glycol-induced nephrolithiasis in rats, African Journal of Traditional, Complementary and Alternative Medicines. 13 110-119, 2016.
- [21] Altun M., Saltan Çitoğlu G., Sever Yılmaz B., Özbek H. Antinociceptive and anti-inflammatory activities of *Viburnum opulus*, Pharm Biol. 47 653-8, 2009.
- [22] Bujor A., Miron A., Luca S.V., Skalicka-Wozniak K., Silion M., Ancuceanu R., Dinu M., Girard C., Demougeot C., Totson P. Metabolite profiling, arginase inhibition and vasorelaxant activity of *Cornus mas*, *Sorbus aucuparia* and *Viburnum opulus* fruit extracts, Food and Chemical Toxicology. 133 1-2, 2019.
- [23] Sagdic O., Aksoy A., Ozkan, G. Evaluation of the antibacterial and antioxidant potentials of cranberry (gilaburu, *Viburnum opulus* L.) fruit extract, Acta Alimentaria. 35 487-492, 2006.
- [24] Zaklos-Szyda M., Majewska I., Redzynia M., Koziolkiewicz M. Antidiabetic effect of polyphenolic extracts from selected edible plants as  $\alpha$ -amylase,  $\alpha$ -glucosidase and PTP1B inhibitors, and  $\beta$  pancreatic cells cytoprotective agents-a comparative study, Current topics in medicinal chemistry. 15 2431-2444, 2015.
- [25] Podśędek A., Zaklos-Szyda M., Polka D., Sosnowska D. Effects of *Viburnum opulus* fruit extracts on adipogenesis of 3T3-L1 cells and lipase activity, Journal of Functional Foods. 73 104111, 2020.
- [26] Kalinkevich K., Karandashov V.E., Ptitsyn L.R. In vitro study of the anti-inflammatory activity of some medicinal and edible plants growing in Russia, Russian Journal of Bioorganic Chemistry. 40 752-761, 2014.
- [27] Chojnacka K., Owczarek K., Fichna J., Sosnowska D., Lewandowska U. Wpływ ekstraktów zliści kaliny koralowej (*Viburnum opulus* L.) na wzrost ludzkich komórek jelita, Post Fitoter. 20 10-17, 2019.
- [28] Perova I.B., Zhogova A.A., Cherkashin A.V., Éller K.I., Ramenskaya G.V., Samylna I.A. Biologically active substances from European guelder berry fruits, Pharmaceutical Chemistry Journal. 48 332-339, 2014.
- [29] Česonienė L., Daubaras R., Venclovienė J., Viškelis P. Biochemical and agro-biological diversity of *Viburnum opulus* genotypes, Open Life Sciences. 5 864-871, 2010.
- [30] Çemtekin B., Kiliç E., Karabacak L., Dağtekin T. An evaluation of guelder rose (*Viburnum opulus* L.) and hawthorn (*Crataegus monogyna*) concentrates as alternative antioxidant sources to BHT and nitrite in poultry meat model system. Scientific Papers, Series D. Animal Science. 62 2019.
- [31] Inceer H., Cuce M., Imamoglu K.V., Ergin T., Ucler A.O. In vitro propagation and cytogenetic stability of *Tripleurospermum insularum* (Asteraceae)—a critically endangered insular endemic species from Turkey, Plant Biosystems-An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology. 156 1213-1221, 2022.
- [32] Ranal M.A., Santana D.G.D. How and why to measure the germination process?, Brazilian Journal of Botany. 29 1-11, 2006.
- [33] Esehie H.A. Interaction of Salinity and Temperature on the Germination of Sorghum, Journal of Agronomy and Crop Science. 172 194-199, 1994.
- [34] ISTA (2004): International rules for seed testing. Edition 2004. The International Seed Testing Association. Bassersdorf, Switzerland.
- [35] Mauromicale G., Licandro P. Salinity and temperature effects on germination, emergence and seedling growth of globe artichoke, Agronomie. 22 443-450, 2002.
- [36] Kharb R.P.S., Lather B.P.S., Deswal D.P. Prediction of field emergence through heritability and genetic advance of vigour parameters, Seed Sci. Technol. 22 461-466, 1994.
- [37] Finch-Savage W.E., Leubner-Metzger G. Seed dormancy and the control of germination, New phytologist. 171 501-523, 2006.
- [38] Khaeim H., Kende Z., Jolánkai M., Kovács G., Gyuricza C., Tarnawa Á. Impact of Temperature and Water on Seed Germination and Seedling Growth of Maize (*Zea mays* L.), Agronomy. 12 397, 2022.
- [39] Lei X., Wan C., Tao J., Leng J., Wu Y., Wang J., Wang P., Yang Q., Feng B., Gao J. Effects of soaking seeds with MT and EBR on germination and seedling growth in buckwheat under salt stress, Acta Agronomica Sinica. 1210-1221, 2022.
- [40] Fuller M.P., Hamza J.H., Rihan, H.Z., Al-Issawi M. Germination of primed seed under NaCl stress in wheat, International Scholarly Research Notices. 167804, 2012.
- [41] Rady M., Hemida K. Sequenced application of ascorbate-proline-glutathione improves salt tolerance in maize seedlings, Ecotoxicology and environmental safety. 133 252-9, 2016.
- [42] Hossain M.M., Ferdush J., Akter K., Talukder F.U., Asaduzzaman M., Imran S. Citric acid and hydro-priming and exogenous application alleviate salt-inhibited seed germination and seedling growth of chilli (*Capsicum annum* L.), Journal of Agriculture and Crops. 9 495-502, 2023.
- [43] Hua-long L., Hanjing S., Jingguo W., Yang L., Detang Z., Hongwei Z. Effect of seed soaking with exogenous proline on seed germination of rice under salt stress, Journal of Northeast Agricultural University. 21 1-6, 2014.
- [44] Soltani E., Ghaderi-Far F., Baskin C.C., Baskin J.M. Problems with using mean germination time to

- calculate rate of seed germination, Australian Journal of Botany. 63 631-635, 2015.
- [45] Matthews S., Khajeh Hosseini M. Mean germination time as an indicator of emergence performance in soil of seed lots of maize (*Zea mays*), Seed Science and Technology. 34 339-347, 2006.
- [46] Reed R.C., Bradford K.J., Khanday I. Seed germination and vigor: ensuring crop sustainability in a changing climate, Heredity. 128 450-459, 2022.
- [47] Sheidaei S., Abad H., Hamidi A., Mohammadi G., Moghaddam A. Relationship between laboratory indices of soybean seed vigor with field emergence and yield, International Journal of Biosciences. 5 281-287, 2014.
- [48] Aghaei K., Ehsanpour A., Shah A., Komatsu S. Proteome analysis of soybean hypocotyl and root under salt stress, Amino Acids. 36 91-98, 2009.
- [49] Khodashenas M., Nasibi F., Gangooei F., Rahneshan Z. Physiological and antioxidative responses of a halophytic grass *Leptochloa fusca* L. Kunth (Kallar grass) to salinity, Journal of Plant Process and Function. 8 71-78, 2020.
- [50] Sheyhakinia S., Bamary Z., Einali A., Valizadeh J. The induction of salt stress tolerance by jasmonic acid treatment in roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) seedlings through enhancing antioxidant enzymes activity and metabolic changes, Biologia. 75 681-692, 2020.








## Molecular Docking and Molecular Dynamics Simulations of Molnupiravir Against Covid-19

Tugce Sinem OKTEMER<sup>1</sup>, Zeynep C. ONEM<sup>2</sup>, Sefa ÇELİK<sup>2</sup>, Aysen OZEL<sup>2</sup>, Sevim AKYUZ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Graduate Studies in Sciences, Istanbul University, Istanbul, Turkey

<sup>2</sup> Physics Department, Science Faculty, Istanbul University, Istanbul, Turkey

<sup>3</sup> Physics Department, Science and Letters Faculty, Istanbul Kultur University, Istanbul, Turkey

✉: [scelik@istanbul.edu.tr](mailto:scelik@istanbul.edu.tr) <sup>1</sup> 0009-0001-9059-1216 <sup>2</sup> 0000-0001-6216-1297 <sup>3</sup> 0000-0001-6216-1297  
<sup>4</sup> 0000-0002-8680-8830 <sup>5</sup> 0000-0003-3313-6927

Received (Geliş): 08.10.2024

Revision (Düzelme): 26.11.2024

Accepted (Kabul): 15.12.2024

### ABSTRACT

The most stable conformation of molnupiravir (C<sub>13</sub>H<sub>19</sub>N<sub>3</sub>O<sub>7</sub>), which is frequently used in the COVID-19 treatment, was elucidated by the Spartan06 program. Using the CAVER program, the potential active binding sites that belong to the spike glycoprotein, ACE2 receptor, and both the apo and holo forms of the main protease enzyme (M<sup>pro</sup>) of COVID-19 were identified. To determine the binding affinity of molnupiravir to target receptors, molecular docking analyses were carried out using Autodock Vina. The results of molecular docking calculations of the molnupiravir with the spike glycoprotein (PDB ID: 6VXX), ACE2 (PDB ID: 6M0J; 1R42), the apo form (PDB ID: 6M03) and the holo form of COVID-19 M<sup>pro</sup> (PDB ID: 6LU7) showed strong binding affinities at -7.8, -7.7, -7.7, -7.1, and -7.4 kcal/mol, respectively. Moreover, top-scoring ligand-receptor complex of the molnupiravir with ACE2 (1R42) were subjected to 50 ns all-atom MD simulations to investigate the ligand-receptor interactions in more detail.

**Keywords:** ACE2, Molecular docking, Molecular dynamics, Molnupiravir, Spike glycoprotein

### Molnupiravir'in Covid-19'a Karşı Moleküler Kenetlenme ve Moleküler Dinamik Simülasyonları

#### ÖZ

COVID-19 tedavisinde kullanılan molnupiravir'in (C<sub>13</sub>H<sub>19</sub>N<sub>3</sub>O<sub>7</sub>) en kararlı konformasyonu Spartan06 programı ile belirlenmiştir. CAVER programı kullanılarak, spike glikoprotein, ACE2 reseptörü ve COVID-19'un ana proteaz enziminin (M<sup>pro</sup>) apo ve holo formlarına ait potansiyel aktif bağlanma bölgeleri tanımlanmıştır. Molnupiravir'in hedef reseptörlere bağlanma afinitesini belirlemek için Autodock Vina kullanılarak moleküler kenetlenme analizleri gerçekleştirilmiştir. Molnupiravir'in spike glikoprotein (PDB ID: 6VXX), ACE2 (PDB ID: 6M0J; 1R42), apo formu (PDB ID: 6M03) ve COVID-19 M<sup>pro</sup>'nun holo formu (PDB ID: 6LU7) ile moleküler kenetlenme hesaplamalarının sonuçları sırasıyla -7,8, -7,7, -7,7, -7,1 ve -7,4 kcal/mol'de güçlü bağlanma afinitesi göstermiştir. Ayrıca, ligand-reseptör etkileşimlerini daha detaylı incelemek amacıyla molnupiravirin ACE2 (1R42) ile en yüksek skor alan ligand-reseptör kompleksinin 50 ns MD simülasyonu yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** ACE2, Moleküler kenetlenme, Moleküler dinamik, Molnupiravir, Spike glikoprotein

#### INTRODUCTION

Severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2), a coronavirus variant that belongs to the family of Coronaviridae, is one of the seven coronaviruses known to infect humans. Severe acute respiratory syndrome coronavirus (SARS-CoV) and middle east respiratory syndrome coronavirus (MERS-CoV) can also be given as examples for coronaviruses that can infect humans [1]. Coronaviruses are single-stranded positive RNA viruses that have the biggest known RNA virus genomes [2]. SARS-CoV-2, which is an RNA virus, is

the reason behind the COVID-19 pandemic [3]. Although effective vaccines are available for the rapidly spreading COVID-19 pandemic, it is necessary to develop antiviral drugs that can be used against COVID-19 [3,4]. Molnupiravir is among the drugs that could be of use for the therapy of COVID-19 patients. The fact that molnupiravir does not require a hospital environment to be used by patients and its easy transportation is a significant difference between molnupiravir and other COVID-19 drugs [5]. Molnupiravir is an oral antiviral prodrug of ribonucleoside analogue β-D-N4-hydroxycytidine and this drug gets activated by

metabolism after entering the body [5,6]. Studies have shown that molnupiravir, which was discovered for the treatment of Venezuelan equine encephalitis virus (VEEV) and developed for the treatment of influenza, has the potential to treat diseases caused by RNA viruses [7]. Preclinical studies have revealed that molnupiravir has a broad-spectrum antiviral activity against all coronavirus types, such as SARS-CoV-2, and clinical trials for the drug's usage in the COVID-19 treatment reached the final stage [5,8]. The US Food and Drug Administration issued molnupiravir an Emergency Use Authorization for non-hospitalized adult COVID-19 patients recently [9].

Up until this point, many studies have shown the effect of molnupiravir on COVID-19 and its usability to treat coronavirus. It was observed that molnupiravir showed efficacy against SARS-CoV-2 in vitro when it was examined in a human airway epithelial cell culture system representing human airway epithelial cells [10]. In animal experiments, mice infected with SARS-CoV-2 were treated with molnupiravir. Molnupiravir treatment slowed down the rate of SARS-CoV, SARS-CoV-2 and MERS-CoV virus replication in mice and it improved the respiratory functions of the mice and reduced body weight losses [8,10]. While the molnupiravir effect on virus replication in mice could be observed, the effect of molnupiravir on the rate of transmission of the virus could not be observed because virus transmission to uninfected mice is not possible [6,8]. The effectiveness of molnupiravir in preventing the transmission of SARS-CoV-2 has been investigated through studies on ferrets. This is possible because ferrets can effectively spread the virus in a similar way to young adult humans [6]. As a result of the molnupiravir treatment of ferrets, it was observed that SARS-CoV-2 transmission to untreated animals could be prevented entirely [6]. This study showed that molnupiravir can be effective in stopping disease spread in the community and that secondary spread of SARS-CoV-2 can possibly be prevented with early treatment [6,8]. Positive results were also acquired in phase 1, phase 2 and phase 3 studies with humans [5]. Studies have shown that molnupiravir can be an effective antiviral drug that can be used for the COVID-19 treatment. In this study, the interaction of molnupiravir molecule with the apo and holo form of the main protease enzyme ( $M^{pro}$ ) of COVID-19, the spike glycoprotein, ACE2 and dACE2 proteins were examined by molecular docking analysis and their binding affinities were found. The main protease enzyme,  $M^{pro}$ , plays a crucial role in virus replication and maturation [3]. This is why it has become one of the most critical target proteins for antiviral drug discovery and treatments for SARS-CoV-2 [2]. Since no known human protease shows the cleavage property of  $M^{pro}$ , a drug specially developed for  $M^{pro}$  will possibly have few side effects on humans [3]. The main protease  $M^{pro}$  has two different conformational forms; these are the holo form and the apo form [11]. In this study, molecular docking analysis was performed for both forms of  $M^{pro}$ . Another essential protein examined in this study is the spike glycoprotein. The spike

glycoprotein (S protein) is the first section to come into contact with the host cells since it is located on the surface of the virus [1,12]. The spike glycoprotein's role in binding the virus to host cells by receptors and entering the cell is significant. Different types of coronaviruses can enter the cell using different cell receptors [1]. SARS-CoV-2 enters the host cells through angiotensin converting enzyme 2 (ACE2), which is a cell receptor [12]. For the virus to be able to infiltrate into the human cell, spike glycoprotein must bind with ACE2 [1,12]. For this reason, both have been one of the main targets of vaccines and drugs produced.

Studies have shown that the apo and holo forms of the main protease enzyme ( $M^{pro}$ ) of COVID-19, spike glycoprotein and ACE2 proteins are important targets for drugs produced for COVID-19 treatment, so for molnupiravir to work against COVID-19, it must be able to bind to these proteins. For this reason, firstly, the most stable conformer of the molnupiravir molecule was found by using conformation analysis. Then we performed molecular docking analysis to determine the binding affinities of molnupiravir molecule and the apo form and holo form of COVID-19 main protease enzyme ( $M^{pro}$ ), the spike glycoprotein, and ACE2 proteins.

## METHODS and CALCULATIONS

The most stable conformer of the investigated molecule was ascertained by evaluating all the possible conformations with the Spartan06 software [13] and the AM1 model, which is a semi-empirical quantum mechanical approach [14].

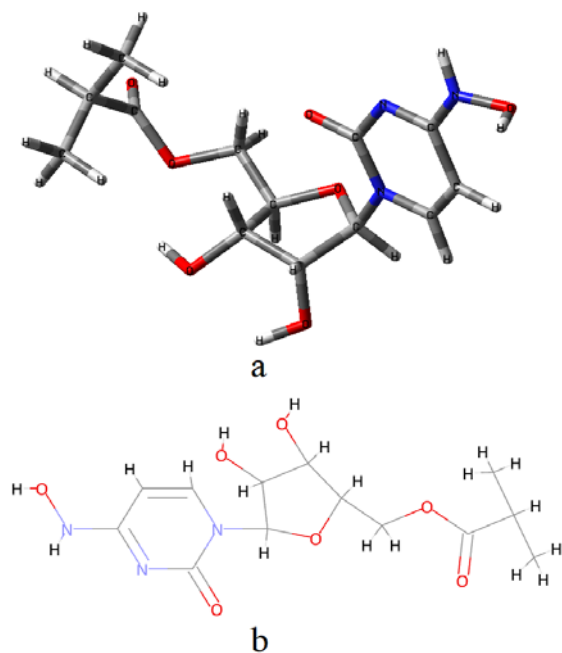
The CAVER software [15] was used to determine the active sites on the receptor's surface. Molecular docking simulations were executed on the identified active sites via AutoDock-Vina [16]. The binding free energies of the most stable ligand-receptor were calculated by a computer-aided, fragment-based drug discovery web server, known as the ACFIS (ACFIS 2.0) [17-20].

Through the application of the Groningen Machine for Chemical Simulations (GROMACS) software package [21- 25] along with the GROMOS96 43a1 force field [26-32], a molecular dynamics (MD) simulation was done on the ligand-receptor complex formed by molnupiravir and the ACE2 enzyme (1R42). Molnupiravir-protein complex that exhibited the lowest binding energy was chosen for molecular dynamics (MD) simulation. The SPC water model was performed in a triclinic periodic box for the solvation of the complex. 0.15 M of NaCl was incorporated after neutralizing the system. Utilizing the steepest descent method, the minimization process of energy was carried out for the duration of 50,000 steps. The MD simulation was performed at a constant temperature of 300 K with constant volume, constant amount of atoms (NVT), and under an invariant pressure of 1.0 bar (NPT) according to the GROMACS equilibration parameters. The Leap-frog molecular dynamics integrator was applied then, establishing an approximate number of simulation frames at 1000. In order to verify the ligand-enzyme complex's

stability, the MD simulation was set to operate for 50 ns. The root mean square deviation (RMSD), root mean square fluctuations (RMSF), the radius of gyration (Rg), protein-ligand hydrogen bonding and Solvent Accessible Surface Area (SASA) were determined with MD simulation to analyze the trajectories of the simulation.

## RESULTS

The most stable conformer of Molnupiravir, obtained from the findings of the conformational analysis, is illustrated in figure 1.



**Figure 1.** The molecular structure obtained from the conformational analysis of the most stable conformer (a) and 2D representation (b) of Molnupiravir

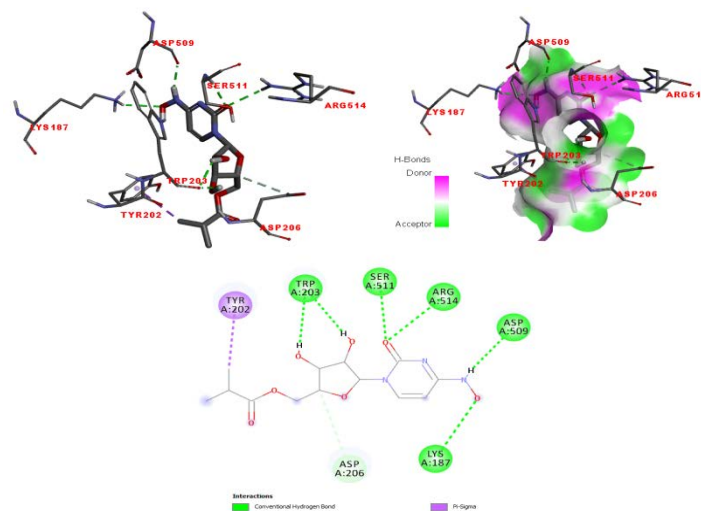
### Molecular Docking

Spike glycoprotein (PDB ID: 6VXX), ACE2 (PDB ID: 6M0J; 1R42), the apo form of COVID-19 M<sup>pro</sup> (PDB ID: 6M03) and the holo form of COVID-19 M<sup>pro</sup> (PDB ID: 6LU7)'s crystal structures were taken from the protein databank [33-37]. Molecular docking calculations were done after the removal of water and the addition of polar hydrogens to the receptors. In addition to that, grid size of 40 Å × 40 Å × 40 Å was used.

The interactions present between the drug and the proteins used in this study are shown in Figures 2-6 and Table 1.

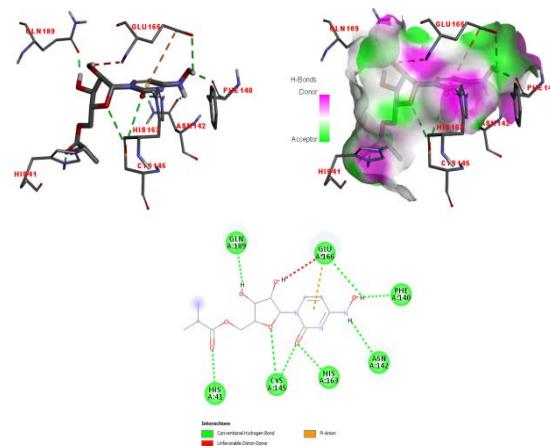
Based on the molecular docking results between Molnupiravir and ACE2 (PDB ID: 6M0J) (Figure 2), several interactions between the ligand and receptor were detected, including a hydrogen bond with Lys187 at a bond length of 2.61 Å, a pi-sigma interaction with Tyr202 at 3.75 Å, hydrogen bonds with Trp203 at 2.05 Å and 2.19 Å bond lengths, a carbon hydrogen bond with Asp206 at 3.61 Å, as well as hydrogen bonds with

Asp509, Ser511, and Arg514 at bond lengths of 2.08 Å, 2.18 Å, and 2.55 Å, respectively.



**Figure 2.** The three-dimensional docked views representing the most stable conformer of Molnupiravir interacting with the ACE2 (PDB ID: 6M0J). The interaction diagrams of the ligand are shown (binding affinity, -7.7 kcal/mol; binding energy -13.14 kcal/mol)

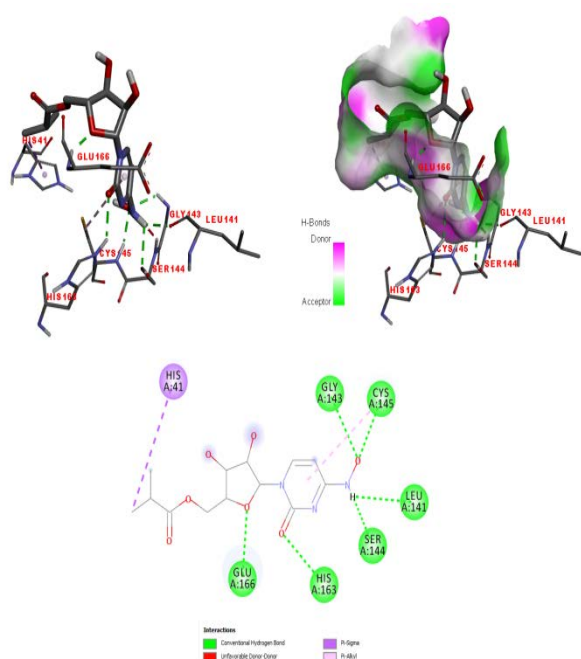
The interactions between Molnupiravir and COVID-19 M<sup>pro</sup> (Apo form) (Figure 3) were found to include a hydrogen bond with His41 at a bond length of 2.22 Å, a hydrogen bond with Phe140 at 1.98 Å, a hydrogen bond with Asn142 at 2.81 Å, hydrogen bonds with Cys145 at 3.6 Å and 3.74 Å, and a hydrogen bond with His163 at 2.31 Å. Additionally, a hydrogen bond was observed at 2.92 Å, a pi-anion interaction at 4.7 Å, and an unfavorable donor-donor interaction at 2.46 Å with Glu166. Finally, a hydrogen bond with Gln189 was identified at a bond length of 1.86 Å.



**Figure 3.** The three-dimensional docked views showing the most stable conformer of molnupiravir interacting with the Apo form of M<sup>pro</sup> (PDB ID: 6M03). The ligand interaction diagrams belonging to the receptor-ligand

complexes are illustrated (binding affinity, -7.1 kcal/mol; binding energy -17.38 kcal/mol)

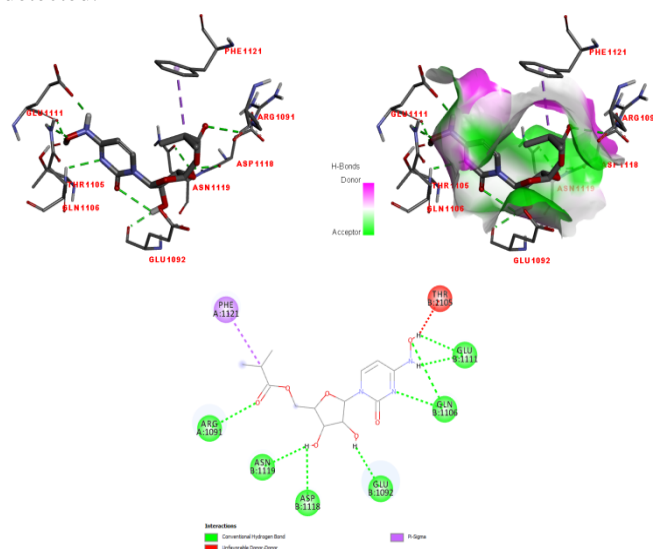
Through the molecular docking analysis between Molnupiravir and COVID-19 M<sup>Pro</sup> (Holo form) (Figure 4) the interactions between the ligand and receptor were revealed. A pi-sigma interaction was observed with His41 at a bond length of 3.96 Å. Furthermore, a hydrogen bond was formed with Leu141 at a bond length of 2.07 Å, and another hydrogen bond was detected at a 2.14 Å bond length with Gly143. An unfavorable donor-donor interaction with Ser144 was obtained at a bond length of 1.46 Å, along with a hydrogen bond at 2.58 Å. In addition, a hydrogen bond was present with Cys145 at a bond distance of 2.11 Å, as well as a pi-alkyl interaction at 5.11 Å. Two hydrogen bonds were also detected, one at a bond length of 2.28 Å with His163, and another at 1.88 Å with Glu166.



**Figure 4.** The three-dimensional docked views that represent the most stable conformer of molnupiravir interacting with the Holo form of M<sup>Pro</sup> (PDB ID: 6LU7). The interaction diagrams of the ligand are illustrated (binding affinity, -7.4 kcal/mol; binding energy -22.56 kcal/mol)

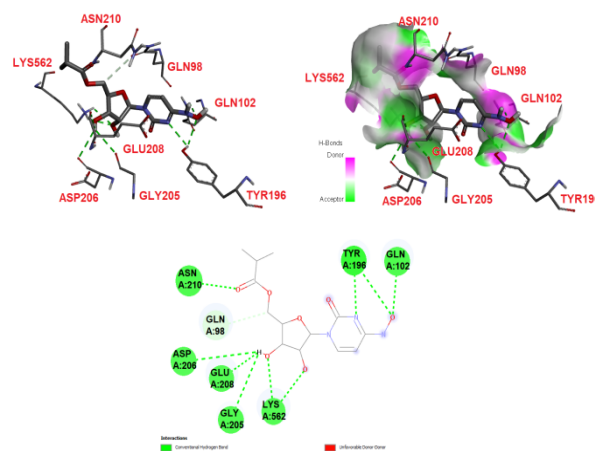
The molecular docking analysis revealed various interactions between Molnupiravir and Spike glycoprotein (Figure 5). These interactions include hydrogen bonds with Arg1091 at a bond length of 2.68 Å, and with Glu1092 at 2.02 Å, an unfavorable donor-donor interaction at a 1.51 Å bond length with Thr1105, two hydrogen bonds at 2.59 Å and 2.77 Å bond lengths with Gln1106, two more hydrogen bonds at 1.96 Å and 2.11 Å bond lengths with Glu1111. Moreover, there are hydrogen bonds observed at a bond length of 2.35 Å with Asp1118 and at a 2.15 Å bond length with Asn1119. A

pi-sigma interaction at 3.95 Å with Phe1121 was also detected.



**Figure 5.** The three-dimensional docked views that show the most stable conformer of molnupiravir interacting with the Spike glycoprotein (PDB ID: 6VXX). The interaction diagrams of the ligand belonging to the receptor-ligand complexes are illustrated (binding affinity, -7.8 kcal/mol; binding energy -15.07 kcal/mol)

Several interactions between Molnupiravir and ACE-2 (PDB ID: 1R42) were identified (Figure 6). These interactions are composed of a carbon hydrogen bond with Gln98 at a bond length of 3.59 Å, a hydrogen bond with Gln102 at 2.41 Å, two hydrogen bonds with Tyr196 at 2.55 Å and 2.74 Å. Additionally, a hydrogen bond was observed with Gly205 at 2.83 Å and Asp206 at 2.91 Å. A hydrogen bond at 2.61 Å and an unfavorable donor-donor interaction at 2.24 Å were formed with Glu208. There is a hydrogen bond at a bond length of 2.2 Å with Asn210 and additional hydrogen bonds at 2.19, 2.34, and 2.67 Å with Lys562.



**Figure 6.** The three-dimensional docked views of the most stable conformation of molnupiravir interacting

with ACE2 (PDB ID: 1R42). The interaction diagrams of the ligand belonging to the receptor-ligand complexes are illustrated (binding affinity, -7.7 kcal/mol; binding energy -22.43 kcal/mol)

**Table 1.** Binding affinity and interacting residues between target protein and Molnupiravir.

Target Protein	Binding Affinity kcal/mol	Interacting Residues	Chain Length (Å)
ACE2 (6M0J)	-7.7	Lys187	2.61
		Tyr202	3.75
		Trp203	2.05,2.19
		Asp206	3.61
		Asp509	2.08
		Ser511	2.18
		Arg514	2.55
apo-form (6M03)	-7.1	His41	2.22
		Phe140	1.98
		Asn142	2.81
		Cys145	3.6,3.74
		His163	2.31
		Glu166	2.46, 2.92, 4.7
Gln189	-7.4	His41	3.96
		Leu141	2.07
		Gly143	2.14
		Ser144	1.46, 2.58
		Cys145	2.11, 5.11
		His163	2.28
Glu166	-7.8	Arg1091	2.68
		Glu1092	2.02
		Thr1105	1.51
		Gln1106	2.59, 2.77
		Glu1111	1.96, 2.11
		Asp1118	2.35
Asn1119	-7.7	Asn1119	2.15
		Phe1121	3.95
		Gln98	3.59
		Gln102	2.41
		Tyr196	2.55, 2.74
		Gly205	2.83
Asp206	-7.7	Asp206	2.91
		Glu208	2.24, 2.61
		Asn210	2.2
		Lys562	2.19, 2.34,
			2.67

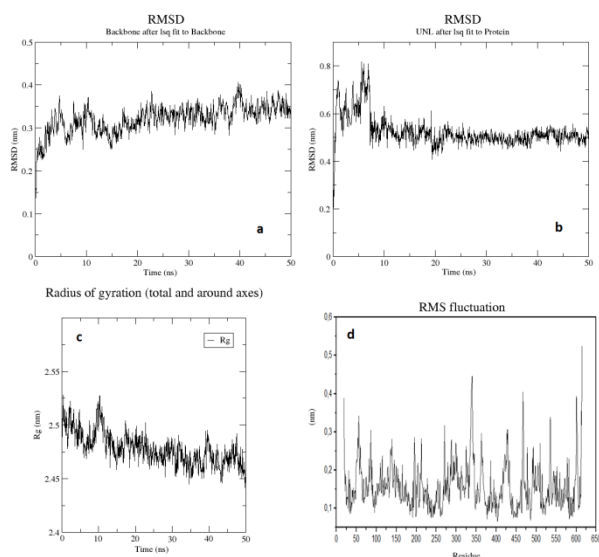
### Molecular Dynamics

The interactions between molnupiravir and the 1R42 receptor and the binding stability were evaluated by conducting a molecular dynamics (MD) simulation. The root mean square deviation (RMSD) for the receptor and ligand, the root mean square fluctuation (RMSF) for the receptor, the radius of gyration (Rg), protein-ligand hydrogen bonding, and solvent accessible surface area (SASA) were determined by the MD trajectory analysis.

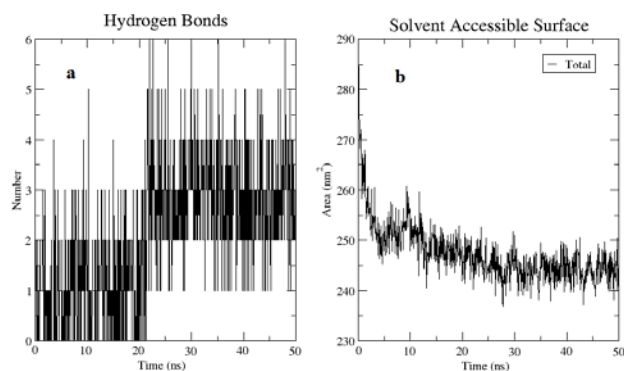
For the comparison of different atomic conformations regarding a given molecular system, the root mean square deviation (RMSD) of a ligand or a protein is applied. The RMSD is a measure of the change seen in the conformation of the ligand or protein, and if the RMSD result shows a small variation, then there are minimal conformation changes; therefore, the complexes are stable. The RMSD value deviations are more important compared to the mean value. A slight deviation in the value also means slight changes in the conformation of the structure. The accepted deviation for the RMSD plot is <4 Å for that complex to be stable enough. In this study, the RMSD analysis was applied separately to determine the displacement in the ligand and the receptor compared to their starting positions. The RMSD graph, which is shown in Figure 7(a), reveals the magnitude of structural deviation that the Ca atoms of the complexes have during the 50 ns-long MD simulations. The RMSD results, which belong to the protein backbone (PDB ID: 1R42) of the complex with molnupiravir, change between 2.21 and 4.07 Å, with an average of 3.22 Å. The RMSD graph of the ligand shown in Figure 7(b) illustrates the structural deviation for the atoms of the ligand in the complexes (1r42) during the 50 ns simulations. In the molnupiravir-1r42 complex the trajectory showed a fluctuation at the beginning but stabilized after 8 ns and appeared to remain stable until 50 ns. Structural variation has an effect over the compactness of the protein after the binding of the investigated protein to the ligand, and the radius of gyration value (Rg) reveals it. A protein that has a folded conformation has a low Rg value, while a protein with an unfolded conformation has a high Rg value. The Rg value changes after the binding of the ligand and protein and causes an alteration in the conformation of the protein. Figure 7(c) shows the Rg plots of the molnupiravir/1r42 complex. The Rg values of the protein (1r42)-molnupiravir complex were found within the range of 24.4–25.3 Å and had some small fluctuations. The RMSF gives information about the fluctuations or local modifications in the residues of a protein–ligand complex. The residues of amino acid in each complex displayed minor variations throughout the entire simulation, as seen in Figure 7(d). Hydrogen bonds are crucial in understanding the stability of the conformation since they play a role in protein-ligand binding. There have been little differences in the hydrogen bonds within the protein of the complex. The graph of the number of hydrogen bonds (HB) formed throughout the MD simulation as a function of time is shown in Figure 8(a) and six hydrogen bonds between the molnupiravir and 1r42 were revealed during 50 ns. To analyze the solvent attributable regions for each of the simulation systems, the solvent accessibility surface area (SASA) calculations were done in this study. A higher SASA profile suggests an expanded protein surface area, while a lower SASA profile suggests possible truncation of the protein complexes. The SASA graph of molnupiravir-1r42 complex is shown in Figure 8(b). The determined result of the SASA for the investigated complex is about



245 nm<sup>2</sup>. Higher values of the SASA indicate more hydrophilicity. Small changes were expected for complex structures and the SASA did not show any significant changes.



**Figure 7.** The final results of the simulation and the analysis of structural stability for the molnupiravir-1R42 complex. (a) The root mean square deviation (RMSD) graph of the protein, (b) the RMSD graph of the ligand, (c) the radius of gyration (Rg) graph, (d) the root mean square fluctuation (RMSF) graph.



**Figure 8.** (a) Hydrogen bond graph, and (b) the solvent accessible surface area (SASA) graph of the molnupiravir-1R42 complex.

## DISCUSSION

In a study on the docking simulations of Paritaprevir with ACE2, it was found that the ligand interacted with ACE2 residues Asn103, Gly104, Asp206 and Lys562 [38]. In another study on the docking simulations of Darunavir with ACE2, it was found that the ligand interacted with ACE2 residues Leu95, Gln102, Asn103, Asn194, Tyr196, Tyr202, Trp203, Gly205, Asp206, Tyr207, Glu208, Val209, Ala396, Lys562, Glu564, Pro565 and Trp566 [39]. The active sites of ACE2 found by our calculations are highly compatible with the conclusions

of Mahdian et al. and Rahman et al. [38,39]. In a previous research authored by Celik et al., the docking simulations of Cepharanthine with the Apo form of M<sup>pro</sup> were investigated, and the results of that study have shown that the ligand interacted with residues His41, Asn142 and Cys145 of the Apo form of M<sup>pro</sup>, through alkyl, pi-alkyl, pi-donor hydrogen bond interactions [40]. The active site of the Apo form found by the docking of Cepharanthine was compatible with the active site identified by the calculations of our study. In a different study, when the docking simulations of Succinic acid with the Apo form of M<sup>pro</sup> were examined by Sagaama et al., it was observed that the ligand interacted with residues Phe140, Leu141, Asn142, Gly143, Ser144, Cys145, His163, Met165, Glu166, and His172 of the Apo form of M<sup>pro</sup> by means of van der Waals, unfavorable donor-donor, and hydrogen bond interactions [41]. The calculations of our study was also compatible with the active site of the Apo form found by the docking of Succinic acid. The previous study in which Celik et al. investigated the docking simulations of Cepharanthine, it was shown that the ligand interacted with residues Glu166, Pro168, Gln189, and Thr190 of the Holo form of M<sup>pro</sup>, via pi-alkyl, pi-anion, and carbon hydrogen bond interactions [40]. The active site revealed by the docking of Cepharanthine to the Apo form of M<sup>pro</sup> demonstrated significant compatibility with the active site determined by the calculations of our study. In an investigation done by Vijayakumar et al., the docking simulations of 14-deoxy-11,12-didehydroandropholide were carried out with the Holo form of M<sup>pro</sup>, and it was found that the ligand interacted with His41, Tyr54, Leu141 and Ser144 residues of the Holo form of M<sup>pro</sup>, through hydrogen bond interactions [42]. The active site of the Holo form of M<sup>pro</sup> identified in our study aligned well with the active site identified by of Vijayakumar et al. [42], where 14-deoxy-11,12-didehydroandropholide was docked to the Apo form of M<sup>pro</sup>. The docking simulations of Sauchinone with the Spike glycoprotein were investigated by Romeo et al. in a previous study [43]. The results showed the interactions between the ligand and the Arg1091, Gly1093, and Asp1118 residues of the Spike glycoprotein, which occurred through hydrogen bond interactions [43]. It was determined that Withasomnine interacted with spike glycoprotein's residues Thr912, Glu1092, Val1104, Thr1105, Gln1106, Glu1111, Gln1113 and Asn1119 in a study on the docking simulations conducted by Srivastava et al. [44]. The spike glycoprotein's active site, which is revealed by our calculations, showed high compatibility with the active sites determined by the dockings of Sauchinone [43] and Withasomnine [44]. The active site identified by the calculations of our study exhibited a high degree of compatibility with the active site found for Curcumin, Demethylcurcumin, 1-(3,4-Dihydroxyphenyl)-7-(4-Hydroxy-3-Methoxyphenyl)Hepta-1,6-diene-3, 5-Dione, (E)-Ferulic acid, Vanillic acid, Carvacrol, (E)-Carveol, E-4-(4-Hydroxy-3-Methoxyphenyl)-3-Buten-2-One, Terpinolene, Vanillin, (Z)-Ferulic Acid, Thymol and Limonene molecules investigated by a study of Khan et

al. [45]. In research using a thiazole derivative, it was observed that the TAZD8 molecule made H-pi interactions with both Ala99 and Leu391, H-donor interactions with Gln102, and cation-pi interactions with Lys562 [46]. In a different investigation by Mohan et al., the Atazanavir molecule was found to have interactions with amino acids Leu95, Arg98, Ala99, Gln102, Tyr196, Trp203, Gly205, Asp206, Glu208 and Arg219 of the target receptor [47].

## CONCLUSION

Assessing the binding affinity of the active compound to target proteins that are involved in viral entry, replication, and maturation is the goal of this investigation. It also examines the modeling and simulation of the virus-induced host cell maturation in silico. The most stable conformer of molnupiravir was determined in consideration of the significance of the relationship between structure and activity in bioactive molecules. The binding mechanism of the molnupiravir with the apo- and holo- forms of M<sup>pro</sup>, the spike glycoprotein and ACE2 was demonstrated in the present study. We provide detailed insights into the types of molecular interactions, such as electrostatic, hydrogen-bonding interactions, etc., that contribute to these geometric alterations. The binding affinities of the Molnupiravir molecule against the target receptors ACE2(6M0J), apo-form(6M03), holo-form(6LU7), spike glycoprotein (6VXX), and ACE-2 (1R42) were calculated to be -7.7, -7.1, -7.4, -7.8, and -7.7 kcal/mol, respectively. Thus, it was found that stable complexes were formed. Through the molecular dynamic calculation, the RMSD graph of the molnupiravir-1r42 complex revealed a small fluctuation until 8 ns, while from 8 ns to 50 ns, this fluctuation decreased and became stable. The data collected by our study suggests that it is possible for molnupiravir to use multiple ways in averting the infection of SARSCoV-2 (COVID-19).

## REFERENCES

- [1] Yang, P., Wang, X. COVID-19: a new challenge for human beings, *Cellular & Molecular Immunology*, 17(5), 555-557, 2020.
- [2] Ullrich, S., Nitsche, C. The SARS-CoV-2 main protease as drug target, *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, 30(17), 127377, 2020.
- [3] Qiao, J., Li, Y. S., Zeng, R., Liu, F. L., Luo, R. H., Huang, C., Wang, Y. F., Zhang, J., Quan, B., Shen, C., Mao, X., Liu, X., Sun, W., Yang, W., Ni, X., Wang, K., Xu, L., Duan, Z. L., Zou, Q. C., Zhang, H. L., Qu, W., Long, Y. H. P., Li, M. H., Yang, R. C., Liu, X., You, J., Zhou, Y., Yao, R., Li, W. P., Liu, J. M., Chen, P., Liu, Y., Lin, G. F., Yang, X., Zou, J., Li, L., Hu, Y., Lu, G. W., Li, W. M., Wei, Y. Q., Zheng, Y. T., Lei, J., Yang, S. SARS-CoV-2 M<sup>pro</sup> inhibitors with antiviral activity in a transgenic mouse model, *Science*, 371(6536), 1374-1378, 2021.
- [4] Benkovics, T., McIntosh, J. A., Silverman, S. M., Kong, J., Maligrès, P., Itoh, T., Yang, H., Huffman, M. A., Verma, D., Pan, W., Ho, H., Vroom, J., Knight, A., Hurtak, J., Morris, W., Strotman, N.A., Murphy, G., Maloney, K. M., Fier, P. S. Evolving to an Ideal Synthesis of Molnupiravir, an Investigational Treatment for COVID-19, 2020.
- [5] Zarenezhad, E., Marzi, M. Review on molnupiravir as a promising oral drug for the treatment of COVID-19, *Medicinal Chemistry Research*, 1-12, 2022.
- [6] Cox, R. M., Wolf, J. D., Plemper, R. K. Therapeutically administered ribonucleoside analogue MK-4482/EIDD-2801 blocks SARS-CoV-2 transmission in ferrets, *Nature microbiology*, 6(1), 11-18, 2020.
- [7] Painter, G. R., Natchus, M. G., Cohen, O., Holman W., Painter, W. P. Developing a direct acting, orally available antiviral agent in a pandemic: the evolution of molnupiravir as a potential treatment for COVID-19, *Current opinion in virology*, 50, 17-22, 2021.
- [8] Fischer, W., Eron Jr, J. J., Holman, W., Cohen, M. S., Fang, L., Szewczyk, L. J., Sheahan, T. P., Baric, R., Mollan, K. R., Wolfe, C. R., Duke, E. R., Azizad, M. M., Borroto-Esoda, K., Wohl, D. A., Loftis, A. J., Alabanza, P., Lipansky, F., Painter, W. P. Molnupiravir, an Oral Antiviral Treatment for COVID-19, *MedRxiv*, 2021-06., 2021.
- [9] Singh, A. K., Singh, A., Singh, R., Misra, A. An updated practical guideline on use of molnupiravir and comparison with agents having emergency use authorization for treatment of COVID-19, *Diabetes & Metabolic Syndrome: Clinical Research & Reviews*, 16(2), 102396, 2022.
- [10] Painter, W. P., Holman W., Bush J.A., Almazed F., Malik H., Erat N. C. J. E., Morin M. J., Szewczyk L. J., Painter G. R. Human Safety, Tolerability, and Pharmacokinetics of a Novel Broad-Spectrum Oral Antiviral Compound, Molnupiravir, with Activity Against SARS-CoV-2, *medrxiv*, 2020-12., 2020.
- [11] Abdel-Maksoud, K., al-Badri, M. A., Lorenz, C., Essex, J. W. Allosteric regulation of SARS-CoV-2 protease: towards informed structure-based drug discovery, 2020.
- [12] Baindara, P., Roy, D., Mandal, S. M. Omicron favors neuropilin1 binding over ACE2: Increased infectivity and available drugs, 2022.
- [13] Shao, Y., Molnar, L. F., Jung, Y., Kussmann, J., Ochsenfeld, C., Brown, S. T., Gilbert, A. T. B., Slipchenko, L. V., Levchenko, S. V., O'Neill, D. P., DiStasio, R. A., Lochan, R. C., Wang, T., Beran, G. J. O., Besley, N. A., Herbert, J. M., Lin, C. Y., Van Voorhis, T., Chien, S. H., Head Gordon, M. Advances in methods and algorithms in a modern quantum chemistry program package, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 8(27), 3172-3191, 2006.
- [14] Dewar, M. J. S., Zois, E. G., Healy, E. F., Stewart, J. J. AM1: A new general purpose quantum mechanical molecular model, *Journal of the American Chemical Society*, 107(13), 3902-3909, 1985.
- [15] Jurcik, A., Bednar, D., Byska, J., Marques, S. M., Furmanova, K., Daniel, L., Kozlikova, B. CAVER Analyst 2.0: analysis and visualization of channels and tunnels in protein structures and molecular dynamics trajectories, *Bioinformatics*, 34(20), 3586-3588, 2018.
- [16] Trott, O., Olson, A. J. AutoDock Vina: improving the speed and accuracy of docking with a new scoring function, efficient optimization, and multithreading, *Journal of computational chemistry*, 31(2), 455-461, 2010.
- [17] Hao, G. F., Jiang, W., Ye, Y. N., Wu, F. X., Zhu, X. L., Guo, F. B., Yang, G. F. ACFIS: a web server for fragment-based drug discovery, *Nucleic acids research*, 44(W1), W550-W556, 2016.
- [18] Hao, G. F., Wang, F., Li, H., Zhu, X. L., Yang, W. C., Huang, L. S., Yang, G. F. Computational discovery of picomolar Q<sub>o</sub> site inhibitors of cytochrome bc<sub>1</sub> complex, *Journal of the American Chemical Society*, 134(27), 11168-11176, 2012.
- [19] Yang, J. F., Wang, F., Jiang, W., Zhou, G. Y., Li, C. Z., Zhu, X. L., Yang, G. F. PADFRag: a database built for the exploration of bioactive fragment space for drug discovery, *Journal of chemical information and modeling*, 58(9), 1725-1730, 2018.
- [20] Cheron, N., Jasty, N., Shakhnovich, E. I. OpenGrowth: an automated and rational algorithm for finding new protein ligands, *Journal of medicinal chemistry*, 59(9), 4171-4188, 2016.



- [21] Abraham, M. J., Murtola, T., Schulz, R., Pall, S., Smith, J. C., Hess, B., & Lindahl, E. GROMACS: High performance molecular simulations through multi-level parallelism from laptops to supercomputers, *SoftwareX*, 1–2, 19–25, 2015.
- [22] Bekker, H., Berendsen, H. J. C., Dijkstra, E. J., Achterop, S., Vondrumen, R., Vanderspoel, D., Sijbers, A., Keegstra, H., Renardus, M. K. R. Gromacs–A parallel computer for molecular-dynamics simulations, In 4th International Conference on Computational Physics (PC 92) (pp. 252–256), World Scientific Publishing, 1993.
- [23] Bjelkmar, P., Larsson, P., Cuendet, M. A., Hess, B., Lindahl, E. Implementation of the CHARMM force field in GROMACS: Analysis of protein stability effects from correction maps, virtual interaction sites, and water models, *Journal of Chemical Theory and Computation*, 6(2), 459–466, 2010.
- [24] Lindorff-Larsen, K., Piana, S., Palmo, K., Maragakis, P., Klepeis, J. L., Dror, R. O., Shaw, D. E. Improved side-chain torsion potentials for the Amber ff99SB protein force field, *Proteins*, 78(8), 1950–1958, 2010.
- [25] van Gunsteren, W. F., Billeter, S. R., Eising, A. A., Hünenberger, P. H., Krüger, P. K. H. C., Mark, A. E., Scott, W. R. P., Tironi, I. G. Biomolecular simulation: The GROMOS96 manual and user guide, Vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, Zürich, 86, 1–1044, 1996.
- [26] Daura, X., Mark, A. E., Van Gunsteren, W. F. Parametrization of aliphatic CHn united atoms of GROMOS96 force field, *Journal of Computational Chemistry*, 19(5), 535–547, 1998.
- [27] Gorai, S., Junghare, V., Kundu, K., Gharui, S., Kumar, M., Patro, B. S., Nayak, S. K., Hazra, S., Mula, S. Synthesis of dihydrobenzo furo [3,2-b] chromenes as potential 3CLpro inhibitors of SARS-CoV-2: A molecular docking and molecular dynamics study, *ChemMedChem*, 17(8), e202100782, 2022.
- [28] Kalimuthu, A. K., Panneerselvam, T., Pavadai, P., Pandian, S. R. K., Sundar, K., Murugesan, S., Ammunje, D. N., Kumar, S., Arunachalam, S., Kunjiappan, S. Pharmacoinformatics-based investigation of bio active compounds of Rasam (South Indian recipe) against human cancer, *Scientific Reports*, 11(1), 21488, 2021.
- [29] Oostenbrink, C., Villa, A., Mark, A. E., & Van Gunsteren, W. F. A biomolecular force field based on the free enthalpy of hydration and solvation: The GROMOS force-field parameter sets 53A5 and 53A6, *Journal of Computational Chemistry*, 25(13), 1656–1676, 2004.
- [30] Prasanna, D., Runthala, A., Shantier, S. W. NudF-boosted strategy to improve the yield of DXS pathway, *bioRxiv*, 2022-03, 2022.
- [31] Tumskiy, R. S., Tumskaiia, A. V. Multistep rational molecular design and combined docking for discovery of novel classes of inhibitors of SARS-CoV-2 main protease 3CLpro, *Chemical Physics Letters*, 780, 138894, 2021.
- [32] Vishvakarma, V. K., Singh, M. B., Jain, P., Kumari, K., Singh, P. Hunting the main protease of SARS-CoV-2 by plitidepsin: Molecular docking and temperature-dependent molecular dynamics simulations, *Amino Acids*, 54(2), 205–213, 2022.
- [33] Walls, A. C., Park, Y. J., Tortorici, M. A., Wall, A., McGuire, A. T., Velesler, D. Structure, function, and antigenicity of the SARS-CoV-2 spike glycoprotein, *Cell*, 181(2), 281–292, 2020.
- [34] Lan, J., Ge, J., Yu, J., Shan, S., Zhou, H., Fan, S., Wang, X. Structure of the SARS-CoV-2 spike receptor-binding domain bound to the ACE2 receptor, *Nature*, 581(7807), 215–220, 2020.
- [35] Cetin, A., Donmez, A., Dalar, A., Bildirici, I. Amino acid and dicyclohexylurea linked pyrazole analogues: synthesis, in silico and in vitro studies, *ChemistrySelect* 8, e202204926, 2023.
- [36] Zhang, B., Zhao, Y., Jin, Z., Liu, X., Yang, H., Rao, Z. The Crystal Structure of COVID-19 Main Protease in Apo Form, *Publ. Online*, 2020.
- [37] Jin, Z., Du, X., Xu, Y., Deng, Y., Liu, M., Zhao, Y., Zhang, B., Li, X., Zhang, L., Peng, C., Duan, Y., et al. Structure of Mpro from SARS-CoV-2 and discovery of its inhibitors, *Nature*, 582, 289–293, 2020.
- [38] Mahdian, S., Zarrabi, M., Panahi, Y., Dabbagh, S. Repurposing FDA-approved drugs to fight COVID-19 using in silico methods: targeting SARS-CoV-2 RdRp enzyme and host cell receptors (ACE2, CD147) through virtual screening and molecular dynamic simulations, *Informatics in medicine unlocked*, 23, 100541, 2021.
- [39] Rahman, M. R., Banik, A., Chowdhury, I. M., Sajib, E. H., Sarkar, S. Identification of potential antivirals against SARS-CoV-2 using virtual screening method, *Informatics in medicine unlocked*, 23, 100531, 2021.
- [40] Celik, S., Akyuz, S., Ozel, A. E. Vibrational spectroscopic characterization and structural investigations of Cepharanthine, a natural alkaloid, *Journal of Molecular Structure*, 1258, 132693, 2022.
- [41] Sagaama, A., Brandan, S. A., Issa, T. B., Issaoui, N. Searching potential antiviral candidates for the treatment of the 2019 novel coronavirus based on DFT calculations and molecular docking, *Heliyon*, 6(8), e04640, 2020.
- [42] Cetin, A. Some flavolignans as potent Sars-Cov-2 inhibitors via molecular docking, molecular dynamic simulations and ADME analysis. *Current Computer-Aided Drug Design*, 18(5), 337–346, 2022.
- [43] Romeo, A., Iacovelli, F., Falconi, M. Fighting Sars-Cov-2 using natural compounds: a virtual screening analysis, *High Performance Computing on CRESCO Infrastructure: research activity and results 2020*, 159, 2021.
- [44] Srivastava, A., Siddiqui, S., Ahmad, R., Mehrotra, S., Ahmad, B., Srivastava, A. N. Exploring nature's bounty: identification of Withania somnifera as a promising source of therapeutic agents against COVID-19 by virtual screening and in silico evaluation, *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*, 40(4), 1858–1908, 2022.
- [45] Khan, N., Fazal, S., Malik, R. M., Azam, S., Jan, S. A., Kanwal, A., Jan, S. A. N-silico analysis of turmeric as an anti-inflammatory agent against ace2 receptor, *Pak. J. Bot.*, 55(2): 763–778, 2023.
- [46] Quang, N. M., Linh, B. T. T., Uyen, T. T., Ngoc, V. T. B., Hoa, T. T., Van Tat, P. Discovery of novel thiazole derivatives as anti-breast cancer agents (MCF-7) and validation of homologous effects on SARS-CoV-2 virus using in silico approaches, *Vietnam Journal of Chemistry*, 61, 17–29, 2023.
- [47] Mohan, M., Rekha, P., Gokulraj, P., Samy, P. A., Thirumalaisamy, R., Khan, R., Aroulmoji, V. Molecular Studies of Antiviral Drug Atazanavir and Hyaluronic Acid-Atazanavir conjugate as Novel Drugs to Target SARS-CoV-2 Viral Proteins, *International journal of advanced Science and Engineering*, 10(3), 3581–3592, 2024.

## Altitudinal Variation of Mineral Elements in Common Plant Species, and Soils of Erzincan Province-Ergan Mountain (Türkiye)

Etem Osma<sup>1\*</sup>, Tuğçe Varol<sup>1</sup>, Muhammet Onur Kıymaz<sup>2</sup>, Halil İbrahim Türkoğlu<sup>1</sup>, Faruk Yıldız<sup>4</sup>, Ali Kandemir<sup>1</sup>, Mert Elverici<sup>1</sup>, Engin Kılıç<sup>3</sup>, Abdullah Hasbenli<sup>5</sup>










<sup>1</sup>Department of Biology, Faculty of Science and Arts, Erzincan Binali Yıldırım University, Erzincan, Turkey.

<sup>2</sup>Environment Engineering, Faculty of Engineering, Erciyes University, Kayseri, Turkey.

<sup>3</sup>Faculty of Pharmacy, Erzincan Binali Yıldırım University, Erzincan, Turkey

<sup>4</sup> Institute of Natural and Applied Sciences, Erzincan Binali Yıldırım University, Erzincan, Turkey.

<sup>5</sup>Department of Biology, Faculty of Science and Arts, Gazi University, Ankara, Turkey.

✉: [eosma@erzincan.edu.tr](mailto:eosma@erzincan.edu.tr)  <sup>1</sup>0000-0002-5250-8194  <sup>2</sup>0000-0001-7027-462X  <sup>3</sup>0000-0002-7974-6651  
 <sup>4</sup>000-0002-1400-2993  <sup>5</sup>0000-0003-1937-6748  <sup>6</sup>0000-0003-1902-9631  <sup>7</sup>0000-0003-3233-9968  
 <sup>8</sup>0000-0002-6838-5977  <sup>9</sup>0000-0002-2919-7594

Received (Geliş): 08.09.2024

Revision (Düzeltilme): 04.12.2024

Accepted (Kabul): 24.12.2024

### ABSTRACT

This study was carried out with 30 plant species growing at different altitudes of Mount Ergan in Erzincan (Türkiye) province in 2021-2022. The concentration of mineral elements was determined in the collected plants and the soils in which they grew at 1500 m of altitude (*Glaucium leiocarpum* Boiss., *Alcea calvertii*, *Genista aucheri*, *Astragalus ornithopodioides*, *Anchusa leptophylla*, *Linum mucronatum*, *Euphorbia virgata*) at 2000 m (*Genista aucheri*, *Hypericum scabrum*, *Tanacetum mucroniferum*, *Barbarea auriculata*, *Onobrychis cornuta*, *Inula oculus-christi*, *Euphorbia virgata*, *Globularia trichosantha*) at 2500 m (*Aster alpinus*, *Lallemantia canescens*, *Scutellaria orientalis*, *Dianthus orientalis*, *Coronilla orientalis*, *Campanula tridentata*, *Crepis armena*, *Anthemis cretica*, *Euphorbia petrophila*, *Papaver fugax*) and at 3000 m (*Senecio hypoleucus*, *Pedicularis comosa*, *Scorzonera sericea*, *Anthemis cretica*, *Astragalus nezaketiae*, *Papaver fugax*, *Campanula tridentata*, *Senecio hypoleucus*, *Hedysarum erythroleucum*). The collected plant (root, leaf, flower) and soil samples were pretreated and analyzed by ICP-MS. The data obtained were statistically evaluated and it was determined that there were differences between altitudes. It was observed that the elements in the soil generally decreased as the altitude increased.

**Keywords:** Altitude, mountain, mineral element, plant, ICP-MS

### Erzincan İli-Ergan Dağı'nda (Türkiye) Yaygın Bitki Türleri ve Topraklarındaki Mineral Elementlerin Rakımsal Değişimi

#### ÖZ

Bu çalışma, 2021-2022 yıllarında Erzincan il sınırları içerisinde yer alan Ergan Dağı'nın farklı yüksekliklerinde yetişen 30 bitki türü ile yapılmıştır. Bunun için 1500 m yükseklikte (*Glaucium leiocarpum* Boiss., *Alcea calvertii*, *Genista aucheri*, *Astragalus ornithopodioides*, *Anchusa leptophylla*, *Linum mucronatum*, *Euphorbia virgata*) 2000 m'de (*Genista aucheri*, *Hypericum scabrum*, *Tanacetum mucroniferum*, *Barbarea auriculata*, *Onobrychis cornuta*, *Inula oculus-christi*, *Euphorbia virgata*, *Globularia trichosantha*) 2500 m'de (*Aster alpinus*, *Lallemantia canescens*, *Scutellaria orientalis*, *Dianthus orientalis*, *Coronilla orientalis*, *Campanula tridentata*, *Crepis armena*, *Anthemis cretica*, *Euphorbia petrophila*, *Papaver fugax*) ve 3000 m'de (*Senecio hypoleucus*, *Pedicularis comosa*, *Scorzonera sericea*, *Anthemis cretica*, *Astragalus nezaketiae*, *Papaver fugax*, *Campanula tridentata*, *Senecio hypoleucus*, *Hedysarum erythroleucum*) olacak şekilde farklı rakımlardan toplanan bitkiler ve yetiştikleri topraklarda mineral elementlerin konsantrasyonu belirlenmiştir. Toplanan bitki (kök, yaprak, çiçek) ve toprak örnekleri ön işlemlerden geçirildikten sonra ICP-MS cihazında analiz edilmiştir. Elde edilen veriler istatistiksel olarak değerlendirilerek, rakımlar arasındaki farklılıklar olduğu tespit edilmiştir. Yükselti arttıkça topraktaki elementlerin genel olarak azaldığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Yükseklik, dağ, mineral element, bitki, ICP-MS

#### INTRODUCTION

Plants need certain amounts of mineral elements in order to continue their development normally [1-4].

Physiologically, macro and micro elements are very important for plants. Elements generally play an important role in the production of oxidation and

reduction reactions, enzyme activities, energy transfer, organic substance production and electron transport in plants [3]. In addition, elements have important roles in metabolic processes such as seed and fruit formation, pollen health, fertilization, protein synthesis, carbohydrate transport, calcium transport and hormones, development and formation of cell tissues, structural and physiological properties of roots and flowers, stability of plant tissue, cell division, cell wall formation, cell expansion and activation of enzymes in plants. Due to the deficiency of essential nutrients, necrosis of young leaves, vegetative development, growth, fruit blossom end rot, significant losses in crop yield and quality, reduction in cell lysis and plant productivity, loss of membrane integrity and problems in plant functions may take place [4-7].

The forms and concentrations of the elements in the soil, the functions of which are precisely determined in plants, are of great importance in terms of plant nutrition. During the uptake of plant nutrients by plant roots, many factors such as plant type, age, root growth, physical, chemical and biological properties of the soil, the types and amounts of elements in the soil, and weather conditions have an effect.

Plants obtain essential nutrients from their surrounding environment. While the majority of these nutrients are absorbed through the root system serving as the primary interface with the soil a smaller fraction is assimilated by aerial structures such as stems, branches, and leaves. [3, 8, 9]. The effect of the physical and chemical structure of the soil on plant growth and propagation is very important. The natural content of metals in soil depends on geochemical and geophysical processes. The factors and time of soil formation are highly influential on the concentration of metals [10, 11].

Geomorphological factors such as lithology, landforms, elevation, slope and aspect are among the important factors affecting vegetation diversity and distribution. Among these factors, elevation is known to be effective in determining the character of vegetation [12]. Elevation plays a crucial role in shaping both biodiversity and the physicochemical properties of soils. Ecosystems at higher altitudes are typically associated with lower temperatures. Fluctuating precipitation patterns decreased atmospheric pressure, and nutrient limitations in the soil further influence biodiversity dynamics in these environments [13-15]. The amount of mineral elements varies according to plant type and elevation. As the elevation increases, climatic characteristics such as temperature and precipitation conditions change. In addition, the land becomes more sloping and faulted. This change in the geographical environment has important effects on the distribution of plant species. At low elevation values, plant species with less precipitation and high temperature demand can grow, while at high elevations, plant species with high precipitation demand and low temperature demand can grow [16].

The primary aim of this study is to examine whether an altitude-dependent relationship exists between the mineral element concentrations in the growing

environment and different parts (roots, stems, leaves) of common plant taxa found at four distinct altitudes on Mount Ergan, with each altitude separated by a 500 m difference. This investigation seeks to understand how variations in altitude influence the uptake and distribution of mineral elements within plant structures. Additionally, the study aims to evaluate whether plants belonging to common floral groups exhibit specific patterns of association with the mineral element concentrations of their respective growing environments at these altitudes. By analyzing these relationships, the research seeks to provide insights into how environmental and altitudinal factors shape the mineral element composition of plants, contributing to a deeper understanding of plant-environment interactions and adaptations in mountainous ecosystems.

## MATERIAL and METHODS

### Study area and plant species

This study was conducted at Mount Ergan with an elevation of 3256 m, which is a continuation of the Munzur Mountains in the province of Erzincan (Türkiye). There is a difference of approximately 2000 m between the average elevation of the Erzincan plain (1200 m) and the average elevation of Mount Ergan (3256 m). The province of Erzincan is covered by mountains and plateaus. Mountains extend in various directions but along a certain line. Munzur to southwest and Refahiye Mountains to northwest constitute the borders of the province. The Karasu River coming from Erzurum to the east and extending towards the west and the Otlukbeli Mountains divide the provincial area in depth, leaving wide plains between them. The mountains cover approximately 60% of the provincial territory [17, 18]. Mount Ergan is composed of pelagic, massive and reefal layered limestone, metamorphic rocks, ophiolites, clastic rocks, mixed ophiolites, vulcanite's, and volcano-sedimentary series and evaporites [19]. In the present study, during the years 2021-2022, plants with different flower coloration (yellow, white, pink-blue-violet, green) and samples were collected from the soils growing at an altitude of 1500 m at Mount Ergan (*Glaucium leiocarpum* Boiss., *Alcea calvertii* (Boiss) Boiss., *Genista aucheri* Boiss., *Astragalus ornithopodioides* Lam., *Anchusa leptophylla* Roem. & Schult., *Linum mucronatum* Bertol., *Euphorbia virgata* Waldst. & Kit.), at 2000 m (*Genista aucheri* Boiss., *Hypericum scabrum* L., *Tanacetum mucroniferum* Hub. Mor. Et Grierson, *Barbarea auriculata* Hausskn. ex Bornm., *Onobrychis cornuta* L., Desv., *Inula oculus-christi* L., *Euphorbia virgata* Waldst. & Kit., *Globularia trichosantha* Fisch. & C.A.Mey) at 2500 m (*Aster alpinus* L., *Lallemantia canescens* (L.) Fisch. & Mey., *Scutellaria orientalis* L., *Dianthus orientalis* Adams., *Coronilla orientalis* Miller, *Campanula tridentata* Schreber, *Crepis armena* DC., *Anthemis cretica* L., *Euphorbia petrophila* C.A. Meyer, *Papaver fugax* Poiret,) and at 3000 m (*Senecio hypoleucus* Benth, *Pedicularis comosa* L., *Scorzonera*

*sericea* DC., *Anthemis cretica* L., *Astragalus nezaketiae* A.Duran & Aytaç, *Papaver fugax* Poirlet, *Campanula tridentata* Schreber, *Senecio hypoleucus* Benth, *Hedysarum erythroleucum* Boiss.) (Fig.1).



**Figure 1.** Study of area

The plant samples used in this study were collected within the framework of ethical rules and relevant legal regulations. Necessary permissions were obtained during the collection process and care was taken not to harm the plant species. The plants were selected to represent the study area. The collected plants were identified. Each identified plant specimen was deposited in Erzincan Binali Yıldırım University Herbarium to create a permanent record [20].

### Heavy metal quantification

Studied plants area common at different elevations. In the laboratory, the collected plant samples were partitioned into flowers (petals), leaves, and roots. The samples were initially dried in an oven at 80°C for 24 hours. Subsequently, the dried material was ground using a dry mortar and passed through a 1.5 mm sieve. To prevent cross-contamination, the drying equipment was cleaned with ethyl alcohol after processing each sample before proceeding with further pulverization [21, 22]. Soil samples were taken using a hoe at a depth of 10 cm from the surface of each area after removing debris. Approximately 500 g of each sample was collected and stored in bags to prevent contamination. Soil samples brought to the laboratory were air-dried and sieved through a 1.5 mm mesh. For further analysis, 0.5 g of the dried and powdered plant and soil samples was measured and transferred into microwave digestion containers. 6 mL HNO<sub>3</sub> 65%, 2 mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 30% was added to the plant samples, while 3 mL HNO<sub>3</sub> 65%, 9 mL HCl 37% was added to the soil samples. The samples were homogenized in a magnetic stirrer for 10 minutes. After placing the containers in the microwave, dissolution was carried out in acid medium up to 2000 °C with 45 bar of pressure for 15 minutes. The samples burned in the container were taken into a balloon jug and filled to 50 mL. 10 mL was withdrawn from the 50 mL samples using a Teflon filter. Finally, the samples were placed in falcon tubes to determine the element concentrations and metal concentrations were

determined by ICP-MS [21, 22]. In the study, B, Na, Ca, Mg, K, Al, Fe, Mn, Zn, Ni metal analyzes were carried out in plants and soil. The data obtained are given as “µg/g dw: micrograms per gram dry weight.

### Statistical analysis

The data collected in the study were subjected to statistical analysis. A significance level of  $p \leq 0.05$  was used for all statistical assessments. Data were analyzed using the ANOVA test within a 95% confidence interval, employing the SPSS 22 software package. Multiple comparisons among samples were evaluated using the Student-Newman-Keuls (S-N-K) and Tukey's tests to identify significant differences [21].

## RESULTS AND DISCUSSION

This study is highly comprehensive in scope, given the diversity of collected plant species, the analysis of various plant parts, and the investigation across multiple altitudinal gradients. Na element was found to have different data in plant parts and soils. *Astragalus ornithopodioides* growing at 1500 m altitude had the highest Na content in root ( $490.6 \pm 11.6$  µg/g dw) and flower ( $413.8 \pm 21.6$  µg/g dw) respectively while *Campanula tridentata* growing at 2500 m altitude had the highest values in leaf ( $464.6 \pm 5.2$  µg/g dw). Na in the soil ( $306.8 \pm 24.8$  µg/g dw) was highest at 1500 m altitude. Separate statistical evaluations were made for plants grown at four different altitudes and significant differences were observed for Na in plants grown at each location (Table 1). In addition, Mg concentration was found to have different data depending on the altitude. Among the plant parts, the highest value was found in the root ( $34764.1 \pm 4337.3$  µg/g dw) in *Astragalus ornithopodioides* growing at 1500 m altitude. Mg concentration in soil decreased significantly with increasing altitude  $p < 0.001$ . Statistical evaluations of the plants grown at each altitude showed significant differences in terms of Mg element (Table 2). Al concentration was generally higher in the flower

parts of the studied plants at 2500 m and in the root part at 2000 m  $p < 0,001$ . *Globularia trichosantha* in flower ( $36029,0 \pm 963,8 \mu\text{g/g dw}$ ) and leaf ( $12859 \pm 669,1 \mu\text{g/g dw}$ ) and *Barbarea auriculata* in root ( $19970,7 \pm 2617,3 \mu\text{g/g dw}$ ) were found to have the highest Al content in plant species growing at 2000 m altitude. Al concentration in soil was ( $43136.3 \pm 2502.1 \mu\text{g/g dw}$ ) at 2000 m altitude, which is higher than that at other altitudes (Table 3). The highest concentrations of K in leaf ( $61902,3 \pm 5432,9 \mu\text{g/g}$ ) and flower ( $51864,8 \pm 1812,5 \mu\text{g/g}$ ) respectively were found in *Anchusa leptophylla* growing at 1500 m. As a result of soil analysis, differences were found between altitudes. The soil with the highest K content was observed in the samples taken from 2000 m (Table 4). Ca concentration had different data for each elevation in the studied plants. Ca element in the soil was close to each other at other elevations except at 2000 m. In terms of statistical evaluations showed significant differences in plant parts (Table 5). The highest values of Fe and Mn were observed in *Globularia trichosantha* in flower and *Barbarea auriculata* in root growing at 2000 m and in *Crepis armena* species growing at 2500 m altitude in leaves. Fe and Mn elements in the soil were found to have similar values at different elevations  $p < 0,001$  (Table 6, 7). Cu concentration was found to be close to each other in plant leaves and roots. The amount of Cu in the soil decreased depending on the elevation (Table 8). The highest value of Zn concentration was found in the flower ( $201.7 \pm 62.3 \mu\text{g/g dw}$ ) in *Genista aucherii*, which grows at 2000 m, and in the leaf ( $149.8 \pm 5.3 \mu\text{g/g dw}$ ) in *Campanula tridentata*, which grows at 3000 m. Statistical evaluations of soil and plant parts showed significant differences between the altitudes  $p < 0,001$  (Table 9). Moreover, Ni content decreased significantly in both plant parts and soil depending on the altitude (Table 10). In the study, Ca/Mg ratio was determined at different elevations and while the ratio was 0.1 at 1500 m, it was found to be 1.36 at 3000 m.

It was recorded that plants with yellow flowers were more dominant and dense at 1500 m and 2000 m, and plants with purple-violet flowers were more dominant and dense at 2500 m and 3000 m on Mount Ergan. Statistical analyses were performed on plants with yellow and blue-violet flowers. It was seen that B, Mn, Fe, Ni, Cu and Zn concentrations did not differ in plants with yellow color and Cu, Zn, Na concentrations did not differ in plants with blue-violet color (Table 11, 12.). There is a strong correlation between the mineral composition of the rocks and soils in an area and the minerals found in the plants growing in that area. However, there is a difference in the mineral composition of some plants in the same region depending on the altitude. This study was compared with previous studies in areas with different geographical characteristics.

Mineral elements were examined in trees and shrubs growing in the mountainous region of Pakistan called Gilgit Baltistan. When the element data they analyzed were compared with the data obtained in this study, it was identified that Ca was very high, Fe was low, Mg,

Mn, Zn and Cu had similar levels [23]. The amount of some metals in trees and herbaceous plants at 600 and 1100 m altitudes of Mount Kaz (Türkiye) was determined. There appeared to be a difference in metal concentrations in the studied plants depending on the elevation. The metal data they obtained are different from the data obtained in this study [24]. Mineral elements in the soils where the endemic *Salvia hydrangea* L. plant growing in the elevations of 1100, 1700, 2000 m were found in Mazanadarn, Iran. The amount of the elements decreased as the altitude increased [14]. Element analysis was conducted as well at different elevations (1000-1400 m, 1400-1800 m, 1800-2200 m) on *Hylocomium splendens* moss species growing in the southeastern Alps of Italy. Significant differences were discovered in the elements studied depending on the elevation [25]. The data obtained as a result of the analysis of Ni, Fe, Mn and Zn in plants growing at 1000 m and 1600 m of Murat Mountain (Türkiye) based on the elevation. The results suggest that some of the plants studied were able to accumulate some metals in their organs and roots [26]. In the element analysis of plants growing at 1000 m and 1600 m altitudes on Mount Honaz (Türkiye), significant differences were found between the two altitudes [27]. According to the data with regards element obtained in the study conducted in Mount Kaz (100 m-1726 m), it was observed that the concentrations of B, Ca, Cu, Mg, Mn and Ni decreased at low altitudes, and the concentrations of these minerals increased up to a certain point and then decreased (except Mg 1600-1700 m) as the altitude increased. The highest average values for B, Ca and Mn were determined at 600 m and for Cu and Ni at 1000 m. Unlike other elements, Al, Fe and Na had relatively low values at 600 m [28]. They determined the content of Al, Ba, Cu, Fe, Mn, Zn, Fe, Mn and Zn in plants growing in Kumalar Mountain (Türkiye) (900-1200 m and 1200-1900 m). Element accumulation values were higher in the 1200-1900 m range [29]. In the study conducted on Alabna rock in Saudi Arabia, the effects of altitude on species diversity, plant community and soil components were examined. As a result of the study, the diversity and distribution of species were affected by the elevation and element contents in the soil [30]. Research on Mount Changbai (500-2300 m) in China has shown that carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) concentrations in plant leaves vary significantly with altitude. They found that as altitude increased, these changes were influenced by plant growth forms, climate and soil properties [31]. In this study, leaf N, P, Ca, K and Mg concentrations were analyzed in six different plant species (trees, shrubs, weeds) at 1400, 1600 and 3100 m altitudes. The data suggest that summer drought, reduced microbial activity and slowed soil development may have indirect effects on plant growth at high altitudes. They suggested that these factors may reduce nutrient pools and possibly nutrient supply at high altitudes [32]. Considering the data obtained in the studies, it was seen that coincided with the data obtained in this study.

**Table 1.** Na concentrations ( $\mu\text{g/g dw}$ ) of plants grown and soil in different altitude (\* $p < 0.05$ ).

Altitude	Plant species	Flower Color	Flower		Leaf		Root		Soil	
1500 m	<i>Linum mucronatum</i> Bertol	Yellow	256,9	$\pm$ 9,8 <sup>b</sup>	342,1	$\pm$ 4,1 <sup>d</sup>	165,7	$\pm$ 1,7 <sup>b</sup>	306,8	$\pm$ 24,8 <sup>c</sup>
	<i>Genista aucheri</i> Boiss.	Yellow	257,0	$\pm$ 6,9 <sup>b</sup>	329,9	$\pm$ 12,6 <sup>cd</sup>	140,1	$\pm$ 16,7 <sup>a</sup>		
	<i>Anchusa leptophylla</i> Roem. & Schult	Blue	250,9	$\pm$ 7,0 <sup>b</sup>	307,4	$\pm$ 10,0 <sup>c</sup>	222,6	$\pm$ 2,4 <sup>d</sup>		
	<i>Euphorbia virgata</i> Waldst. & Kit.	Green	260,0	$\pm$ 37,8 <sup>b</sup>	338,0	$\pm$ 11,5 <sup>cd</sup>	189,1	$\pm$ 5,4 <sup>bc</sup>		
	<i>Glaucium leiocarpum</i> Boiss.	Orange	312,6	$\pm$ 5,0 <sup>b</sup>	160,2	$\pm$ 2,7 <sup>a</sup>	206,5	$\pm$ 9,1 <sup>cd</sup>		
	<i>Astragalus ornithopodioides</i> Lam.	Purple	413,8	$\pm$ 21,6 <sup>c</sup>	222,0	$\pm$ 10,0 <sup>b</sup>	490,6	$\pm$ 11,6 <sup>e</sup>		
	<i>Alcea calvertii</i> (Boiss) Boiss.	White	147,7	$\pm$ 2,8 <sup>a</sup>	160,6	$\pm$ 5,3 <sup>a</sup>	218,7	$\pm$ 3,2 <sup>cd</sup>		
2000 m	<i>Genista aucheri</i> Boiss.	Yellow	326,8	$\pm$ 22,2 <sup>b</sup>	394,7	$\pm$ 11,3 <sup>d</sup>	178,5	$\pm$ 5,5 <sup>a</sup>	90,2	$\pm$ 7,0 <sup>b</sup>
	<i>Euphorbia virgata</i> Waldst. & Kit.	Green	367,6	$\pm$ 19,1 <sup>bc</sup>	446,2	$\pm$ 8,4 <sup>e</sup>	183,2	$\pm$ 1,9 <sup>ab</sup>		
	<i>Tanacetum mucroniferum</i> Hub. Mor. Et Grierson	White	175,7	$\pm$ 5,2 <sup>a</sup>	159,9	$\pm$ 2,0 <sup>ab</sup>	218,8	$\pm$ 4,0 <sup>cd</sup>		
	<i>Inula oculus-christi</i> L.	Yellow	144,1	$\pm$ 2,3 <sup>a</sup>	182,1	$\pm$ 3,1 <sup>bc</sup>	194,7	$\pm$ 3,0 <sup>ab</sup>		
	<i>Hypericum scabrum</i> L.	Yellow	425,5	$\pm$ 16,0 <sup>c</sup>	147,9	$\pm$ 4,2 <sup>a</sup>	178,3	$\pm$ 3,6 <sup>a</sup>		
	<i>Barbarea auriculata</i> Hausskn. ex Bornm	Yellow	401,4	$\pm$ 56,7 <sup>bc</sup>	200,7	$\pm$ 5,0 <sup>c</sup>	233,5	$\pm$ 9,3 <sup>d</sup>		
	<i>Globularia trichosantha</i> Fisch. & C.A.Mey	Purple	319,3	$\pm$ 10,2 <sup>b</sup>	181,4	$\pm$ 5,7 <sup>bc</sup>	203,5	$\pm$ 6,6 <sup>bc</sup>		
<i>Onobrychis cornuta</i> (L.) Desv.	Purple	151,9	$\pm$ 3,9 <sup>a</sup>	145,9	$\pm$ 2,2 <sup>a</sup>	196,0	$\pm$ 9,3 <sup>ab</sup>			
2500 m	<i>Crepis armena</i> DC	Yellow	262,9	$\pm$ 3,7 <sup>b</sup>	381,9	$\pm$ 10,7 <sup>c</sup>	161,1	$\pm$ 2,6 <sup>b</sup>	45,2	$\pm$ 3,4 <sup>a</sup>
	<i>Anthemis cretica</i> L.	White	299,8	$\pm$ 9,5 <sup>c</sup>	426,4	$\pm$ 24,0 <sup>d</sup>	290,7	$\pm$ 4,1 <sup>g</sup>		
	<i>Campanula tridentata</i> Schreber	Purple	235,6	$\pm$ 7,7 <sup>b</sup>	464,6	$\pm$ 5,2 <sup>e</sup>	204,2	$\pm$ 6,0 <sup>d</sup>		
	<i>Euphorbia petrophila</i> C.A. Meyer	Green	321,9	$\pm$ 11,7 <sup>d</sup>	350,9	$\pm$ 14,9 <sup>c</sup>	209,2	$\pm$ 2,5 <sup>d</sup>		
	<i>Papaver fugax</i> Poiret	Pink	358,7	$\pm$ 12,6 <sup>e</sup>	340,0	$\pm$ 13,8 <sup>c</sup>	258,8	$\pm$ 4,9 <sup>f</sup>		
	<i>Aster alpinus</i> L.	Purple	296,0	$\pm$ 11,2 <sup>c</sup>	369,3	$\pm$ 11,5 <sup>c</sup>	179,0	$\pm$ 3,8 <sup>c</sup>		
	<i>Scutellaria orientalis</i> L.	Yellow	197,9	$\pm$ 4,9 <sup>a</sup>	195,4	$\pm$ 10,5 <sup>ab</sup>	164,8	$\pm$ 1,9 <sup>b</sup>		
	<i>Coronilla orientalis</i> Miller	Yellow	176,1	$\pm$ 0,8 <sup>a</sup>	159,9	$\pm$ 3,5 <sup>a</sup>	170,0	$\pm$ 5,8 <sup>bc</sup>		
	<i>Lallemantia canescens</i> (L) Fisch. & Mey.	Purple	179,4	$\pm$ 3,0 <sup>a</sup>	189,6	$\pm$ 5,3 <sup>ab</sup>	133,8	$\pm$ 2,1 <sup>a</sup>		
<i>Dianthus orientalis</i> Adams.	Purple	285,6	$\pm$ 11,8 <sup>bc</sup>	211,7	$\pm$ 1,7 <sup>b</sup>	232,3	$\pm$ 2,9 <sup>e</sup>			
3000 m	<i>Anthemis cretica</i> L.	White	331,4	$\pm$ 4,4 <sup>d</sup>	400,3	$\pm$ 14,0 <sup>d</sup>	203,0	$\pm$ 9,9 <sup>b</sup>	41,0	$\pm$ 2,6 <sup>a</sup>
	<i>Campanula tridentata</i> Schreber	Blue	354,8	$\pm$ 5,3 <sup>e</sup>	357,2	$\pm$ 17,5 <sup>c</sup>	198,1	$\pm$ 2,5 <sup>b</sup>		
	<i>Papaver fugax</i> Poiret	Pink	276,7	$\pm$ 13,0 <sup>c</sup>	369,7	$\pm$ 12,1 <sup>cd</sup>	186,6	$\pm$ 8,9 <sup>b</sup>		
	<i>Hedysarum erythroleucum</i> Boiss.	Purple	373,7	$\pm$ 10,8 <sup>e</sup>	385,4	$\pm$ 7,9 <sup>cd</sup>	169,2	$\pm$ 2,8 <sup>a</sup>		
	<i>Pedicularis comosa</i> L.	White	180,5	$\pm$ 4,4 <sup>ab</sup>	192,3	$\pm$ 5,0 <sup>b</sup>	165,2	$\pm$ 4,2 <sup>a</sup>		
	<i>Scorzonera sericea</i> DC.	Yellow	206,8	$\pm$ 6,1 <sup>b</sup>	157,8	$\pm$ 1,3 <sup>ab</sup>	156,3	$\pm$ 2,4 <sup>a</sup>		
	<i>Senecio hypoleucus</i> Benth	Yellow	196,1	$\pm$ 9,3 <sup>b</sup>	169,5	$\pm$ 2,9 <sup>ab</sup>	201,0	$\pm$ 5,2 <sup>b</sup>		
	<i>Astragalus nezaketiae</i> A.Duran & Aytac	Purple	162,1	$\pm$ 2,5 <sup>a</sup>	146,9	$\pm$ 0,9 <sup>a</sup>	189,9	$\pm$ 2,0 <sup>b</sup>		



**Table 2.** Mg concentrations ( $\mu\text{g/g dw}$ ) of plants grown and soil in different altitude (\* $p < 0.05$ ).

Altitude	Plant species	Flower Color	Flower		Leaf		Root		Soil
1500 m	<i>Linum mucronatum</i> Bertol	Yellow	9751,4	± 563,1 <sup>e</sup>	12507,3	± 344,5 <sup>d</sup>	3590,4	± 92,7 <sup>a</sup>	42618,3 ± 4631,0 <sup>c</sup>
	<i>Genista aucheri</i> Boiss.	Yellow	2497,7	± 182,0 <sup>b</sup>	8591,6	± 221,1 <sup>b</sup>	2705,9	± 81,4 <sup>a</sup>	
	<i>Anchusa leptophylla</i> Roem. & Schult	Blue	3110,2	± 120,5 <sup>bc</sup>	10891,4	± 202,3 <sup>c</sup>	6742,9	± 672,6 <sup>a</sup>	
	<i>Euphorbia virgata</i> Waldst. & Kit.	Green	958,4	± 149,7 <sup>a</sup>	4401,4	± 129,1 <sup>a</sup>	1932,9	± 114,7 <sup>a</sup>	
	<i>Glaucium leiocarpum</i> Boiss.	Orange	3165,6	± 207,0 <sup>bc</sup>	3918,0	± 44,3 <sup>a</sup>	4412,3	± 426,6 <sup>a</sup>	
	<i>Astragalus ornithopodioides</i> Lam.	Purple	5621,3	± 586,6 <sup>d</sup>	10680,0	± 1290,0 <sup>c</sup>	34764,1	± 4337,3 <sup>c</sup>	
	<i>Alcea calvertii</i> (Boiss) Boiss.	White	3795,3	± 25,8 <sup>c</sup>	7761,9	± 96,8 <sup>b</sup>	18649,1	± 1796,8 <sup>b</sup>	
2000 m	<i>Genista aucheri</i> Boiss.	Yellow	1670,7	± 53,8 <sup>ab</sup>	6793,3	± 133,8 <sup>e</sup>	1614,1	± 121,6 <sup>a</sup>	9838,0 ± 586,5 <sup>b</sup>
	<i>Euphorbia virgata</i> Waldst. & Kit.	Green	1550,4	± 114,0 <sup>ab</sup>	6633,6	± 98,5 <sup>c</sup>	2303,8	± 97,1 <sup>a</sup>	
	<i>Tanacetum mucroniferum</i> Hub. Mor. Et Grierson	White	2296,4	± 72,2 <sup>c</sup>	6118,6	± 96,9 <sup>d</sup>	5452,3	± 246,3 <sup>b</sup>	
	<i>Inula oculus-christi</i> L.	Yellow	1392,4	± 30,1 <sup>a</sup>	3378,6	± 138,6 <sup>a</sup>	5406,7	± 349,3 <sup>b</sup>	
	<i>Hypericum scabrum</i> L.	Yellow	2943,4	± 41,2 <sup>d</sup>	3517,2	± 16,4 <sup>ab</sup>	2208,5	± 219,6 <sup>a</sup>	
	<i>Barbarea auriculata</i> Hausskn. ex Bornm	Yellow	1999,0	± 247,5 <sup>bc</sup>	4826,8	± 160,6 <sup>c</sup>	6391,1	± 665,3 <sup>b</sup>	
	<i>Globularia trichosantha</i> Fisch. & C.A.Mey	Purple	13368,5	± 262,0 <sup>e</sup>	5945,9	± 229,8 <sup>d</sup>	5085,3	± 511,2 <sup>b</sup>	
<i>Onobrychis cornuta</i> (L.) Desv.	Purple	3097,4	± 94,0 <sup>d</sup>	3898,3	± 19,3 <sup>b</sup>	6705,2	± 957,4 <sup>b</sup>		
2500 m	<i>Crepis armena</i> DC	Yellow	3171,2	± 116,5 <sup>d</sup>	13985,1	± 274,9 <sup>e</sup>	2882,5	± 86,4 <sup>bc</sup>	4303,8 ± 197,5 <sup>a</sup>
	<i>Anthemis cretica</i> L.	White	2653,3	± 56,8 <sup>c</sup>	6720,3	± 73,3 <sup>e</sup>	1797,2	± 111,1 <sup>a</sup>	
	<i>Campanula tridentata</i> Schreber	Purple	987,5	± 105,8 <sup>a</sup>	6614,7	± 24,4 <sup>e</sup>	3117,8	± 610,2 <sup>c</sup>	
	<i>Euphorbia petrophila</i> C.A. Meyer	Green	3492,4	± 194,0 <sup>d</sup>	10053,9	± 97,3 <sup>f</sup>	4001,8	± 23,2 <sup>d</sup>	
	<i>Papaver fugax</i> Poiret	Pink	5160,6	± 197,8 <sup>e</sup>	6916,7	± 346,6 <sup>e</sup>	2929,5	± 37,7 <sup>bc</sup>	
	<i>Aster alpinus</i> L.	Purple	1640,2	± 151,0 <sup>b</sup>	6207,5	± 211,7 <sup>e</sup>	2274,5	± 165,5 <sup>abc</sup>	
	<i>Scutellaria orientalis</i> L.	Yellow	3726,1	± 141,2 <sup>d</sup>	5158,6	± 589,8 <sup>d</sup>	4148,8	± 193,7 <sup>d</sup>	
	<i>Coronilla orientalis</i> Miller	Yellow	1021,6	± 6,6 <sup>a</sup>	3506,8	± 18,9 <sup>b</sup>	5971,7	± 457,0 <sup>c</sup>	
	<i>Lallemantia canescens</i> (L) Fisch. & Mey.	Purple	3361,4	± 30,3 <sup>d</sup>	4215,7	± 28,0 <sup>c</sup>	4156,2	± 71,7 <sup>d</sup>	
	<i>Dianthus orientalis</i> Adams.	Purple	1212,3	± 18,9 <sup>a</sup>	2375,1	± 26,1 <sup>a</sup>	2022,6	± 86,6 <sup>ab</sup>	
3000 m	<i>Anthemis cretica</i> L.	White	2866,0	± 33,6 <sup>c</sup>	5697,6	± 35,5 <sup>f</sup>	1886,6	± 112,4 <sup>b</sup>	3066,2 ± 123,2 <sup>a</sup>
	<i>Campanula tridentata</i> Schreber	Blue	1775,8	± 119,5 <sup>b</sup>	9632,8	± 344,5 <sup>e</sup>	1978,4	± 30,5 <sup>b</sup>	
	<i>Papaver fugax</i> Poiret	Pink	782,8	± 55,4 <sup>a</sup>	5245,6	± 408,2 <sup>ef</sup>	1513,4	± 61,0 <sup>a</sup>	
	<i>Hedysarum erythroleucum</i> Boiss.	Purple	1796,2	± 385,5 <sup>b</sup>	5054,1	± 45,5 <sup>ef</sup>	1450,1	± 27,6 <sup>a</sup>	
	<i>Pedicularis comosa</i> L.	White	2632,8	± 55,1 <sup>c</sup>	4702,9	± 378,8 <sup>de</sup>	1910,9	± 102,8 <sup>b</sup>	
	<i>Scorzonera sericea</i> DC.	Yellow	1761,5	± 65,5 <sup>b</sup>	3817,2	± 62,1 <sup>bc</sup>	2876,4	± 27,6 <sup>d</sup>	
	<i>Senecio hypoleucus</i> Benth	Yellow	1566,9	± 60,3 <sup>b</sup>	4210,9	± 14,9 <sup>cd</sup>	2472,6	± 186,6 <sup>c</sup>	
	<i>Astragalus nezaketiae</i> A.Duran & Aytac	Purple	1768,6	± 64,5 <sup>b</sup>	3312,2	± 13,4 <sup>b</sup>	2404,7	± 26,5 <sup>c</sup>	



**Table 3.** Al concentrations ( $\mu\text{g/g dw}$ ) of plants grown and soil in different altitude (\* $p<0.05$ ).

Altitude	Plant species	Flower Color	Flower		Leaf		Root		Soil	
1500 m	<i>Linum mucronatum</i> Bertol	Yellow	3703,0	$\pm$ 216,9 <sup>d</sup>	740,3	$\pm$ 53,8 <sup>a</sup>	1056,9	$\pm$ 34,1 <sup>a</sup>	29307,6	$\pm$ 1929,6 <sup>b</sup>
	<i>Genista aucheri</i> Boiss.	Yellow	790,4	$\pm$ 75,6 <sup>b</sup>	1807,6	$\pm$ 225,0 <sup>c</sup>	1925,4	$\pm$ 107,1 <sup>ab</sup>		
	<i>Anchusa leptophylla</i> Roem. & Schult	Blue	573,3	$\pm$ 59,2 <sup>b</sup>	737,8	$\pm$ 20,9 <sup>a</sup>	3614,3	$\pm$ 200,2 <sup>cd</sup>		
	<i>Euphorbia virgata</i> Waldst. & Kit.	Green	79,3	$\pm$ 10,9 <sup>a</sup>	448,5	$\pm$ 50,6 <sup>a</sup>	2383,1	$\pm$ 215,8 <sup>b</sup>		
	<i>Glaucium leiocarpum</i> Boiss.	Orange	1998,3	$\pm$ 120,6 <sup>c</sup>	545,0	$\pm$ 62,2 <sup>a</sup>	2690,5	$\pm$ 481,5 <sup>bc</sup>		
	<i>Astragalus ornithopodioides</i> Lam.	Purple	653,0	$\pm$ 63,0 <sup>b</sup>	1352,8	$\pm$ 193,6 <sup>b</sup>	6321,6	$\pm$ 654,7 <sup>c</sup>		
	<i>Alcea calvertii</i> (Boiss) Boiss.	White	557,8	$\pm$ 8,4 <sup>b</sup>	680,9	$\pm$ 38,4 <sup>a</sup>	4128,1	$\pm$ 441,5 <sup>d</sup>		
	<i>Genista aucheri</i> Boiss.	Yellow	394,3	$\pm$ 42,1 <sup>a</sup>	940,6	$\pm$ 169,6 <sup>a</sup>	1790,8	$\pm$ 296,3 <sup>a</sup>		
2000 m	<i>Euphorbia virgata</i> Waldst. & Kit.	Green	257,2	$\pm$ 41,0 <sup>a</sup>	1252,5	$\pm$ 105,9 <sup>a</sup>	5484,4	$\pm$ 388,9 <sup>a</sup>	43136,3	$\pm$ 2502,1 <sup>c</sup>
	<i>Tanacetum mucroniferum</i> Hub. Mor. Et Grierson	White	767,4	$\pm$ 47,4 <sup>a</sup>	1001,3	$\pm$ 165,5 <sup>a</sup>	10125,8	$\pm$ 547,4 <sup>b</sup>		
	<i>Inula oculus-christi</i> L.	Yellow	623,2	$\pm$ 48,0 <sup>a</sup>	1842,9	$\pm$ 41,3 <sup>a</sup>	10279,1	$\pm$ 752,2 <sup>b</sup>		
	<i>Hypericum scabrum</i> L.	Yellow	802,9	$\pm$ 33,2 <sup>a</sup>	507,7	$\pm$ 25,7 <sup>a</sup>	2972,0	$\pm$ 416,0 <sup>a</sup>		
	<i>Barbarea auriculata</i> Hausskn. ex Bornm	Yellow	731,1	$\pm$ 104,9 <sup>a</sup>	7375,8	$\pm$ 708,1 <sup>b</sup>	19970,7	$\pm$ 2617,3 <sup>c</sup>		
	<i>Globularia trichosantha</i> Fisch. & C.A.Mey	Purple	36029,0	$\pm$ 963,8 <sup>c</sup>	12859,0	$\pm$ 669,1 <sup>c</sup>	12893,3	$\pm$ 1439,0 <sup>b</sup>		
	<i>Onobrychis cornuta</i> (L.) Desv.	Purple	2374,2	$\pm$ 229,2 <sup>b</sup>	794,8	$\pm$ 36,9 <sup>a</sup>	11240,9	$\pm$ 1820,6 <sup>b</sup>		
	<i>Crepis armena</i> DC	Yellow	10240,0	$\pm$ 400,8 <sup>a</sup>	17934,6	$\pm$ 1203,2 <sup>c</sup>	6792,8	$\pm$ 277,0 <sup>c</sup>		
2500 m	<i>Anthemis cretica</i> L.	White	2818,4	$\pm$ 59,9 <sup>a</sup>	1239,0	$\pm$ 43,3 <sup>a</sup>	4078,1	$\pm$ 269,1 <sup>b</sup>	19918,7	$\pm$ 1105,3 <sup>a</sup>
	<i>Campanula tridentata</i> Schreber	Purple	1755,9	$\pm$ 245,7 <sup>a</sup>	871,6	$\pm$ 14,6 <sup>a</sup>	2991,5	$\pm$ 318,7 <sup>ab</sup>		
	<i>Euphorbia petrophila</i> C.A. Meyer	Green	4856,8	$\pm$ 328,8 <sup>a</sup>	757,4	$\pm$ 45,4 <sup>a</sup>	6887,4	$\pm$ 156,4 <sup>c</sup>		
	<i>Papaver fugax</i> Poiret	Pink	1864,6	$\pm$ 93,7 <sup>a</sup>	1513,3	$\pm$ 37,1 <sup>a</sup>	3596,4	$\pm$ 154,1 <sup>ab</sup>		
	<i>Aster alpinus</i> L.	Purple	2174,1	$\pm$ 470,0 <sup>a</sup>	1614,9	$\pm$ 210,7 <sup>a</sup>	6429,5	$\pm$ 621,1 <sup>c</sup>		
	<i>Scutellaria orientalis</i> L.	Yellow	8279,9	$\pm$ 689,4 <sup>a</sup>	4045,6	$\pm$ 868,3 <sup>b</sup>	6538,3	$\pm$ 639,2 <sup>c</sup>		
	<i>Coronilla orientalis</i> Miller	Yellow	308,7	$\pm$ 8,7 <sup>a</sup>	1059,4	$\pm$ 115,9 <sup>a</sup>	6713,8	$\pm$ 1058,5 <sup>c</sup>		
	<i>Lallemantia canescens</i> (L) Fisch. & Mey.	Purple	1000,6	$\pm$ 78,4 <sup>a</sup>	914,2	$\pm$ 62,5 <sup>a</sup>	2075,9	$\pm$ 195,4 <sup>a</sup>		
3000 m	<i>Dianthus orientalis</i> Adams.	Purple	399,7	$\pm$ 23,4 <sup>b</sup>	180,5	$\pm$ 6,2 <sup>a</sup>	2886,6	$\pm$ 171,0 <sup>ab</sup>	13810,8	$\pm$ 621,7 <sup>a</sup>
	<i>Anthemis cretica</i> L.	White	1660,7	$\pm$ 35,7 <sup>c</sup>	2390,6	$\pm$ 55,3 <sup>d</sup>	4320,9	$\pm$ 384,6 <sup>d</sup>		
	<i>Campanula tridentata</i> Schreber	Blue	818,4	$\pm$ 124,3 <sup>b</sup>	304,3	$\pm$ 9,8 <sup>a</sup>	869,1	$\pm$ 23,7 <sup>a</sup>		
	<i>Papaver fugax</i> Poiret	Pink	771,7	$\pm$ 64,5 <sup>b</sup>	1504,5	$\pm$ 68,3 <sup>bc</sup>	1069,6	$\pm$ 50,9 <sup>ab</sup>		
	<i>Hedysarum erythroleucum</i> Boiss.	Purple	813,3	$\pm$ 272,1 <sup>b</sup>	267,8	$\pm$ 4,6 <sup>a</sup>	1440,1	$\pm$ 90,2 <sup>ab</sup>		
	<i>Pedicularis comosa</i> L.	White	1450,6	$\pm$ 115,4 <sup>c</sup>	3420,9	$\pm$ 719,6 <sup>c</sup>	2307,3	$\pm$ 294,3 <sup>bc</sup>		
	<i>Scorzonera sericea</i> DC.	Yellow	271,3	$\pm$ 14,8 <sup>a</sup>	1751,1	$\pm$ 251,3 <sup>cd</sup>	2005,2	$\pm$ 366,0 <sup>abc</sup>		
	<i>Senecio hypoleucus</i> Benth	Yellow	259,5	$\pm$ 5,3 <sup>a</sup>	881,5	$\pm$ 53,5 <sup>ab</sup>	2983,8	$\pm$ 347,2 <sup>c</sup>		
<i>Astragalus nezaketiae</i> A.Duran & Aytac	Purple	724,3	$\pm$ 82,2 <sup>b</sup>	175,6	$\pm$ 5,5 <sup>a</sup>	2966,3	$\pm$ 74,8 <sup>c</sup>			

For a given metal, mean concentrations followed by the same letter are not significantly different ( $p<0.05$ ).

**Table 4.** K concentrations ( $\mu\text{g/g dw}$ ) of plants grown and soil in different altitude ( $*p<0.05$ ).

Altitude	Plant species	Flower Color	Flower	Leaf	Root	Soil
1500 m	<i>Linum mucronatum</i> Bertol	Yellow	16942,5 ± 549,3 <sup>b</sup>	30472,5 ± 5302,3 <sup>cd</sup>	4383,3 ± 66,3 <sup>b</sup>	2677,4 ± 341,3 <sup>b</sup>
	<i>Genista aucheri</i> Boiss.	Yellow	19020,6 ± 864,8 <sup>b</sup>	20763,6 ± 449,5 <sup>abc</sup>	2501,8 ± 58,8 <sup>a</sup>	
	<i>Anchusa leptophylla</i> Roem. & Schult	Blue	51864,8 ± 1812,5 <sup>e</sup>	61902,3 ± 5432,9 <sup>e</sup>	20945,7 ± 1284,3 <sup>e</sup>	
	<i>Euphorbia virgata</i> Waldst. & Kit.	Green	11223,8 ± 1679,0 <sup>a</sup>	38060,6 ± 803,0 <sup>d</sup>	4924,3 ± 309,0 <sup>b</sup>	
	<i>Glaucium leiocarpum</i> Boiss.	Orange	42516,5 ± 3160,3 <sup>d</sup>	27466,7 ± 352,6 <sup>bcd</sup>	17280,4 ± 175,8 <sup>d</sup>	
	<i>Astragalus ornithopodioides</i> Lam.	Purple	22065,1 ± 760,8 <sup>b</sup>	15515,2 ± 184,0 <sup>a</sup>	3633,7 ± 92,9 <sup>ab</sup>	
	<i>Alcea calvertii</i> (Boiss) Boiss.	White	32380,1 ± 564,0 <sup>c</sup>	17470,9 ± 134,3 <sup>ab</sup>	11634,3 ± 112,1 <sup>c</sup>	
2000 m	<i>Genista aucheri</i> Boiss.	Yellow	16871,9 ± 1270,1 <sup>c</sup>	18252,2 ± 194,8 <sup>c</sup>	8484,0 ± 2862,2 <sup>a</sup>	5506,6 ± 314,0 <sup>c</sup>
	<i>Euphorbia virgata</i> Waldst. & Kit.	Green	10489,0 ± 1352,8 <sup>b</sup>	23630,9 ± 426,6 <sup>de</sup>	6540,4 ± 123,6 <sup>a</sup>	
	<i>Tanacetum mucroniferum</i> Hub. Mor. Et Grierson	White	31930,2 ± 581,3 <sup>a</sup>	24900,4 ± 311,6 <sup>e</sup>	14489,3 ± 197,3 <sup>b</sup>	
	<i>Inula oculus-christi</i> L.	Yellow	22675,6 ± 126,8 <sup>a</sup>	20706,0 ± 1812,9 <sup>d</sup>	16001,1 ± 277,5 <sup>b</sup>	
	<i>Hypericum scabrum</i> L.	Yellow	18602,6 ± 234,4 <sup>a</sup>	9949,9 ± 98,7 <sup>a</sup>	9665,6 ± 293,3 <sup>a</sup>	
	<i>Barbarea auriculata</i> Hausskn. ex Bornm	Yellow	32607,4 ± 3899,1 <sup>a</sup>	30451,1 ± 403,2 <sup>f</sup>	16527,6 ± 443,7 <sup>b</sup>	
	<i>Globularia trichosantha</i> Fisch. & C.A.Mey	Purple	20718,0 ± 315,0 <sup>a</sup>	11811,1 ± 226,7 <sup>b</sup>	9074,3 ± 292,3 <sup>a</sup>	
<i>Onobrychis cornuta</i> (L.) Desv.	Purple	19982,0 ± 113,2 <sup>a</sup>	9696,9 ± 47,1 <sup>a</sup>	6011,3 ± 192,7 <sup>a</sup>		
2500 m	<i>Crepis armena</i> DC	Yellow	26735,5 ± 897,1 <sup>d</sup>	38421,8 ± 413,6 <sup>f</sup>	11186,4 ± 154,0 <sup>a</sup>	1746,9 ± 103,0 <sup>a</sup>
	<i>Anthemis cretica</i> L.	White	32629,2 ± 560,2 <sup>e</sup>	24563,7 ± 249,1 <sup>cd</sup>	7782,8 ± 126,4 <sup>a</sup>	
	<i>Campanula tridentata</i> Schreber	Purple	9590,8 ± 813,6 <sup>a</sup>	56571,9 ± 312,5 <sup>g</sup>	23634,0 ± 3075,7 <sup>b</sup>	
	<i>Euphorbia petrophila</i> C.A. Meyer	Green	15260,5 ± 789,1 <sup>b</sup>	31151,6 ± 321,0 <sup>e</sup>	10048,4 ± 3424,3 <sup>a</sup>	
	<i>Papaver fugax</i> Poiret	Pink	18095,6 ± 655,2 <sup>c</sup>	22753,1 ± 1077,0 <sup>c</sup>	7498,2 ± 99,7 <sup>a</sup>	
	<i>Aster alpinus</i> L.	Purple	13567,1 ± 740,6 <sup>b</sup>	25247,1 ± 992,1 <sup>d</sup>	7710,8 ± 249,2 <sup>a</sup>	
	<i>Scutellaria orientalis</i> L.	Yellow	22400,7 ± 373,4 <sup>cd</sup>	16648,4 ± 419,2 <sup>b</sup>	11145,5 ± 384,2 <sup>a</sup>	
	<i>Coronilla orientalis</i> Miller	Yellow	24686,4 ± 129,2 <sup>d</sup>	17886,0 ± 1443,7 <sup>b</sup>	21388,7 ± 537,3 <sup>b</sup>	
	<i>Lallemantia canescens</i> (L) Fisch. & Mey.	Purple	38407,5 ± 143,9 <sup>f</sup>	14688,3 ± 103,5 <sup>a</sup>	22979,6 ± 654,1 <sup>b</sup>	
	<i>Dianthus orientalis</i> Adams.	Purple	26387,2 ± 546,9 <sup>d</sup>	17488,8 ± 119,5 <sup>b</sup>	5692,1 ± 51,9 <sup>a</sup>	
3000 m	<i>Anthemis cretica</i> L.	White	32126,3 ± 328,7 <sup>f</sup>	36649,9 ± 226,3 <sup>g</sup>	11785,1 ± 188,6 <sup>d</sup>	1178,4 ± 64,6 <sup>a</sup>
	<i>Campanula tridentata</i> Schreber	Blue	24921,9 ± 1418,4 <sup>d</sup>	53764,7 ± 1861,8 <sup>h</sup>	5096,4 ± 41,3 <sup>ab</sup>	
	<i>Papaver fugax</i> Poiret	Pink	7056,7 ± 476,5 <sup>a</sup>	28818,8 ± 807,9 <sup>f</sup>	33224,4 ± 230,2 <sup>f</sup>	
	<i>Hedysarum erythroleucum</i> Boiss.	Purple	11740,2 ± 1091,2 <sup>b</sup>	17364,9 ± 256,9 <sup>d</sup>	3768,4 ± 57,4 <sup>a</sup>	
	<i>Pedicularis comosa</i> L.	White	27763,8 ± 72,7 <sup>e</sup>	14321,3 ± 122,7 <sup>c</sup>	7543,3 ± 388,0 <sup>bc</sup>	
	<i>Scorzonera sericea</i> DC.	Yellow	27989,4 ± 749,7 <sup>e</sup>	11557,2 ± 185,3 <sup>b</sup>	10766,3 ± 1451,6 <sup>d</sup>	
	<i>Senecio hypoleucus</i> Benth	Yellow	28384,7 ± 1032,8 <sup>e</sup>	27825,4 ± 884,0 <sup>f</sup>	19775,3 ± 1065,8 <sup>e</sup>	
	<i>Astragalus nezaketiae</i> A.Duran & Aytaç	Purple	26782,7 ± 448,7 <sup>dc</sup>	19713,7 ± 90,0 <sup>e</sup>	9058,1 ± 160,1 <sup>cd</sup>	

For a given metal, mean concentrations followed by the same letter are not significantly different ( $p<0.05$ ).

**Table 5.** Ca concentrations ( $\mu\text{g/g dw}$ ) of plants grown and soil in different altitude (\* $p<0.05$ ).

Altitude	Plant species	Flower Color	Flower	Leaf	Root	Soil
1500 m	<i>Linum mucronatum</i> Bertol	Yellow	613,4 ± 16,2 <sup>a</sup>	4192,2 ± 179,9 <sup>c</sup>	463,5 ± 12,2 <sup>a</sup>	4294,5 ± 496,6 <sup>c</sup>
	<i>Genista aucheri</i> Boiss.	Yellow	613,8 ± 31,1 <sup>a</sup>	3540,6 ± 30,4 <sup>b</sup>	1078,7 ± 22,6 <sup>b</sup>	
	<i>Anchusa leptophylla</i> Roem. & Schult	Blue	867,8 ± 31,2 <sup>b</sup>	4663,3 ± 137,8 <sup>d</sup>	2335,0 ± 122,9 <sup>c</sup>	
	<i>Euphorbia virgata</i> Waldst. & Kit.	Green	517,3 ± 78,8 <sup>a</sup>	2815,4 ± 84,2 <sup>a</sup>	899,9 ± 39,1 <sup>b</sup>	
	<i>Glaucium leiocarpum</i> Boiss.	Orange	1407,0 ± 109,2 <sup>c</sup>	10397,9 ± 334,3 <sup>f</sup>	5289,8 ± 268,7 <sup>e</sup>	
	<i>Astragalus ornithopodioides</i> Lam.	Purple	1494,1 ± 48,6 <sup>c</sup>	3309,7 ± 28,7 <sup>b</sup>	2755,9 ± 211,4 <sup>d</sup>	
	<i>Alcea calvertii</i> (Boiss) Boiss.	White	1916,8 ± 28,1 <sup>d</sup>	8134,4 ± 35,7 <sup>e</sup>	6981,0 ± 232,0 <sup>f</sup>	
2000 m	<i>Genista aucheri</i> Boiss.	Yellow	534,5 ± 23,1 <sup>a</sup>	3830,9 ± 101,8 <sup>b</sup>	867,9 ± 66,3 <sup>a</sup>	880,7 ± 56,2 <sup>a</sup>
	<i>Euphorbia virgata</i> Waldst. & Kit.	Green	599,5 ± 45,5 <sup>a</sup>	4135,3 ± 80,2 <sup>c</sup>	1193,8 ± 22,4 <sup>a</sup>	
	<i>Tanacetum mucroniferum</i> Hub. Mor. Et Grierson	White	1908,3 ± 78,9 <sup>e</sup>	5007,2 ± 67,4 <sup>a</sup>	11884,6 ± 510,5 <sup>d</sup>	
	<i>Inula oculus-christi</i> L.	Yellow	873,9 ± 11,2 <sup>b</sup>	5665,6 ± 184,4 <sup>a</sup>	1951,3 ± 39,2 <sup>b</sup>	
	<i>Hypericum scabrum</i> L.	Yellow	1351,9 ± 10,9 <sup>c</sup>	1877,3 ± 7,8 <sup>a</sup>	2307,9 ± 280,1 <sup>b</sup>	
	<i>Barbarea auriculata</i> Hausskn. ex Bornm	Yellow	1256,8 ± 156,6 <sup>c</sup>	4308,3 ± 18,3 <sup>a</sup>	2330,7 ± 90,9 <sup>b</sup>	
	<i>Globularia trichosantha</i> Fisch. & C.A.Mey	Purple	1654,6 ± 54,0 <sup>d</sup>	2666,1 ± 15,8 <sup>a</sup>	1032,5 ± 63,9 <sup>a</sup>	
<i>Onobrychis cornuta</i> (L.) Desv.	Purple	2421,1 ± 15,9 <sup>e</sup>	7132,3 ± 58,2 <sup>a</sup>	8468,5 ± 508,6 <sup>c</sup>		
2500 m	<i>Crepis armena</i> DC	Yellow	587,3 ± 22,1 <sup>a</sup>	4088,5 ± 28,3 <sup>bc</sup>	1236,3 ± 37,7 <sup>a</sup>	3333,6 ± 349,6 <sup>b</sup>
	<i>Anthemis cretica</i> L.	White	779,6 ± 15,2 <sup>b</sup>	2323,6 ± 22,4 <sup>a</sup>	864,1 ± 62,4 <sup>a</sup>	
	<i>Campanula tridentata</i> Schreber .	Purple	313,0 ± 43,4 <sup>a</sup>	4487,7 ± 18,9 <sup>c</sup>	1449,6 ± 134,0 <sup>a</sup>	
	<i>Euphorbia petrophila</i> C.A. Meyer	Green	2682,0 ± 201,5 <sup>e</sup>	3381,9 ± 48,3 <sup>b</sup>	1726,1 ± 84,7 <sup>a</sup>	
	<i>Papaver fugax</i> Poiret	Pink	1605,4 ± 54,3 <sup>d</sup>	2528,9 ± 144,6 <sup>a</sup>	1499,3 ± 23,5 <sup>a</sup>	
	<i>Aster alpinus</i> L.	Purple	389,0 ± 45,1 <sup>a</sup>	2313,7 ± 79,1 <sup>a</sup>	1492,8 ± 123,4 <sup>a</sup>	
	<i>Scutellaria orientalis</i> L.	Yellow	1235,2 ± 55,4 <sup>c</sup>	5918,6 ± 929,4 <sup>d</sup>	1273,1 ± 60,4 <sup>a</sup>	
	<i>Coronilla orientalis</i> Miller	Yellow	1520,7 ± 11,4 <sup>d</sup>	10126,8 ± 68,7 <sup>e</sup>	8562,3 ± 1089,5 <sup>c</sup>	
	<i>Lallemantia canescens</i> (L) Fisch. & Mey.	Purple	3943,4 ± 159,5 <sup>f</sup>	6170,0 ± 35,4 <sup>d</sup>	4136,4 ± 301,4 <sup>b</sup>	
	<i>Dianthus orientalis</i> Adams.	Purple	638,0 ± 27,4 <sup>a</sup>	5745,7 ± 31,9 <sup>d</sup>	4199,0 ± 130,5 <sup>b</sup>	
3000 m	<i>Anthemis cretica</i> L.	White	986,1 ± 20,4 <sup>cd</sup>	2762,9 ± 30,8 <sup>a</sup>	1611,9 ± 286,1 <sup>ab</sup>	4183,1 ± 176,4 <sup>c</sup>
	<i>Campanula tridentata</i> Schreber	Blue	475,9 ± 73,2 <sup>b</sup>	4922,0 ± 184,6 <sup>b</sup>	3576,9 ± 108,1 <sup>c</sup>	
	<i>Papaver fugax</i> Poiret	Pink	244,6 ± 18,8 <sup>a</sup>	3418,5 ± 106,9 <sup>a</sup>	1149,5 ± 22,3 <sup>a</sup>	
	<i>Hedysarum erythroleucum</i> Boiss.	Purple	532,5 ± 119,8 <sup>b</sup>	2690,6 ± 22,5 <sup>a</sup>	2257,6 ± 42,1 <sup>b</sup>	
	<i>Pedicularis comosa</i> L.	White	1712,6 ± 82,0 <sup>e</sup>	7093,6 ± 664,4 <sup>d</sup>	2133,3 ± 79,6 <sup>b</sup>	
	<i>Scorzonera sericea</i> DC.	Yellow	1039,6 ± 32,8 <sup>cd</sup>	3421,7 ± 85,1 <sup>a</sup>	4253,2 ± 255,7 <sup>c</sup>	
	<i>Senecio hypoleucus</i> Benth	Yellow	1126,1 ± 45,9 <sup>d</sup>	5922,6 ± 28,4 <sup>c</sup>	3615,7 ± 269,9 <sup>c</sup>	
	<i>Astragalus nezaketiae</i> A.Duran & Aytaç	Purple	1124,8 ± 38,1 <sup>d</sup>	5160,7 ± 36,8 <sup>b</sup>	5564,6 ± 174,5 <sup>d</sup>	

For a given metal, mean concentrations followed by the same letter are not significantly different ( $p<0.05$ ).

**Table 6.** Fe concentrations ( $\mu\text{g/g dw}$ ) of plants grown and soil in different altitude (\* $p<0.05$ ).

Altitude	Plant species	Flower Color	Flower		Leaf		Root		Soil
1500 m	<i>Linum mucronatum</i> Bertol	Yellow	5769,5	± 352,4 <sup>c</sup>	1267,8	± 85,1 <sup>b</sup>	1759,6	± 51,1 <sup>a</sup>	38363,5 ± 1411,5 <sup>c</sup>
	<i>Genista aucherii</i> Boiss.	Yellow	726,5	± 76,2 <sup>b</sup>	1874,6	± 284,5 <sup>c</sup>	1943,1	± 102,1 <sup>a</sup>	
	<i>Anchusa leptophylla</i> Roem. & Schult	Blue	609,9	± 48,4 <sup>ab</sup>	834,3	± 34,1 <sup>ab</sup>	4405,6	± 250,4 <sup>b</sup>	
	<i>Euphorbia virgata</i> Waldst. & Kit.	Green	89,9	± 12,5 <sup>a</sup>	463,5	± 45,7 <sup>a</sup>	2064,7	± 195,8 <sup>a</sup>	
	<i>Glaucium leiocarpum</i> Boiss.	Orange	1153,8	± 84,9 <sup>b</sup>	441,8	± 53,0 <sup>a</sup>	1953,4	± 345,7 <sup>a</sup>	
	<i>Astragalus ornithopodioides</i> Lam.	Purple	1090,2	± 149,4 <sup>b</sup>	2219,1	± 418,8 <sup>c</sup>	10870,6	± 1321,5 <sup>d</sup>	
	<i>Alcea calvertii</i> (Boiss) Boiss.	White	606,4	± 15,5 <sup>ab</sup>	774,0	± 43,8 <sup>ab</sup>	5995,6	± 659,7 <sup>c</sup>	
	2000 m	<i>Genista aucherii</i> Boiss.	Yellow	361,0	± 30,1 <sup>a</sup>	865,2	± 153,4 <sup>ab</sup>	1563,9	
<i>Euphorbia virgata</i> Waldst. & Kit.		Green	272,9	± 35,2 <sup>a</sup>	1159,5	± 87,2 <sup>ab</sup>	4483,4	± 311,5 <sup>ab</sup>	
<i>Tanacetum mucroniferum</i> Hub. Mor. Et Grierson		White	561,6	± 31,4 <sup>a</sup>	719,1	± 112,4 <sup>ab</sup>	6875,3	± 392,4 <sup>bc</sup>	
<i>Inula oculus-christi</i> L.		Yellow	505,6	± 37,8 <sup>a</sup>	1452,5	± 37,9 <sup>b</sup>	8024,4	± 612,9 <sup>c</sup>	
<i>Hypericum scabrum</i> L.		Yellow	635,5	± 21,9 <sup>a</sup>	372,2	± 18,5 <sup>a</sup>	2194,2	± 304,6 <sup>a</sup>	
<i>Barbarea auriculata</i> Hausskn. ex Bornm		Yellow	580,5	± 79,0 <sup>a</sup>	4845,5	± 429,6 <sup>c</sup>	14775,7	± 1995,6 <sup>d</sup>	
<i>Globularia trichosanthes</i> Fisch. & C.A.Mey		Purple	27497,6	± 572,9 <sup>c</sup>	9423,7	± 529,5 <sup>d</sup>	10038,8	± 1167,7 <sup>c</sup>	
<i>Onobrychis cornuta</i> (L.) Desv.		Purple	1862,9	± 177,5 <sup>b</sup>	647,6	± 26,2 <sup>ab</sup>	8838,8	± 1434,5 <sup>c</sup>	
2500 m	<i>Crepis armena</i> DC	Yellow	8460,8	± 344,1 <sup>a</sup>	15385,8	± 1082,2 <sup>c</sup>	6064,5	± 293,6 <sup>e</sup>	20497,7 ± 829,2 <sup>b</sup>
	<i>Anthemis cretica</i> L.	White	2225,9	± 51,4 <sup>a</sup>	1155,5	± 25,5 <sup>ab</sup>	3646,6	± 243,9 <sup>cd</sup>	
	<i>Campanula tridentata</i> Schreber	Purple	1438,7	± 202,5 <sup>a</sup>	839,0	± 14,3 <sup>a</sup>	2905,0	± 337,3 <sup>bc</sup>	
	<i>Euphorbia petrophila</i> C.A. Meyer	Green	4868,9	± 312,2 <sup>a</sup>	738,0	± 45,2 <sup>a</sup>	958,6	± 38,3 <sup>a</sup>	
	<i>Papaver fugax</i> Poirlet	Pink	1595,0	± 81,1 <sup>a</sup>	1320,2	± 43,4 <sup>ab</sup>	2822,6	± 115,2 <sup>bc</sup>	
	<i>Aster alpinus</i> L.	Purple	1866,0	± 402,9 <sup>a</sup>	1387,6	± 185,8 <sup>ab</sup>	5870,8	± 588,5 <sup>e</sup>	
	<i>Scutellaria orientalis</i> L.	Yellow	5575,9	± 522,4 <sup>a</sup>	2621,3	± 529,6 <sup>b</sup>	4739,4	± 463,6 <sup>de</sup>	
	<i>Coronilla orientalis</i> Miller	Yellow	268,2	± 6,5 <sup>a</sup>	787,6	± 87,1 <sup>a</sup>	4901,3	± 784,9 <sup>de</sup>	
	<i>Lallemantia canescens</i> (L) Fisch. & Mey.	Purple	851,5	± 70,5 <sup>a</sup>	713,4	± 41,3 <sup>a</sup>	1755,9	± 172,4 <sup>ab</sup>	
	<i>Dianthus orientalis</i> Adams.	Purple	333,7	± 14,4 <sup>b</sup>	154,0	± 4,5 <sup>a</sup>	2151,0	± 138,3 <sup>ab</sup>	
	<i>Anthemis cretica</i> L.	White	1378,4	± 19,4 <sup>d</sup>	2092,4	± 56,0 <sup>d</sup>	3846,2	± 294,1 <sup>d</sup>	
	<i>Campanula tridentata</i> Schreber	Blue	951,8	± 144,6 <sup>bc</sup>	413,9	± 13,9 <sup>ab</sup>	6933,5	± 213,9 <sup>e</sup>	
3000 m	<i>Papaver fugax</i> Poirlet	Pink	623,1	± 49,1 <sup>ab</sup>	1249,9	± 51,7 <sup>c</sup>	968,1	± 26,4 <sup>a</sup>	14330,5 ± 461,5 <sup>a</sup>
	<i>Hedysarum erythroleucum</i> Boiss.	Purple	721,6	± 233,0 <sup>b</sup>	289,5	± 3,7 <sup>ab</sup>	1150,7	± 54,3 <sup>a</sup>	
	<i>Pedicularis comosa</i> L.	White	1134,5	± 92,2 <sup>cd</sup>	2363,5	± 446,8 <sup>d</sup>	1787,8	± 222,6 <sup>abc</sup>	
	<i>Scorzonera sericea</i> DC.	Yellow	234,5	± 11,6 <sup>a</sup>	1287,1	± 180,2 <sup>c</sup>	1545,9	± 275,2 <sup>ab</sup>	
	<i>Senecio hypoleucus</i> Benth	Yellow	248,4	± 4,9 <sup>a</sup>	791,3	± 40,8 <sup>bc</sup>	2667,6	± 306,9 <sup>c</sup>	
	<i>Astragalus nezaketiae</i> A.Duran & Aytac	Purple	599,3	± 61,6 <sup>ab</sup>	192,8	± 4,1 <sup>a</sup>	2275,7	± 46,2 <sup>bc</sup>	

For a given metal, mean concentrations followed by the same letter are not significantly different ( $p<0.05$ ).

**Table 7.** Mn concentrations ( $\mu\text{g/g dw}$ ) of plants grown and soil in different altitude (\* $p < 0.05$ ).

Altitude	Plant species	Flower Color	Flower		Leaf		Root		Soil	
<b>1500 m</b>	<i>Linum mucronatum</i> Bertol	Yellow	123,9	$\pm 6,5^d$	113,9	$\pm 4,7^c$	118,1	$\pm 3,7^{ab}$	627,4	$\pm 28,5^e$
	<i>Genista aucheri</i> Boiss.	Yellow	70,5	$\pm 3,7^c$	141,5	$\pm 4,9^d$	84,2	$\pm 2,7^a$		
	<i>Anchusa leptophylla</i> Roem. & Schult	Blue	34,0	$\pm 1,6^{ab}$	132,3	$\pm 4,1^d$	185,6	$\pm 10,4^c$		
	<i>Euphorbia virgata</i> Waldst. & Kit.	Green	35,0	$\pm 3,9^{ab}$	86,3	$\pm 1,4^b$	140,0	$\pm 13,3^b$		
	<i>Glaucium leiocarpum</i> Boiss.	Orange	37,8	$\pm 2,7^{ab}$	86,0	$\pm 1,9^b$	83,2	$\pm 8,0^a$		
	<i>Astragalus ornithopodioides</i> Lam.	Purple	46,3	$\pm 2,6^b$	88,8	$\pm 6,6^b$	226,6	$\pm 21,9^d$		
	<i>Alcea calvertii</i> (Boiss) Boiss.	White	29,0	$\pm 0,2^a$	64,4	$\pm 0,8^a$	142,4	$\pm 12,3^b$		
<b>2000 m</b>	<i>Genista aucheri</i> Boiss.	Yellow	52,0	$\pm 1,2^b$	113,2	$\pm 7,4^c$	81,3	$\pm 12,9^a$	639,5	$\pm 35,6^e$
	<i>Euphorbia virgata</i> Waldst. & Kit.	Green	49,7	$\pm 4,3^b$	102,6	$\pm 1,7^{bc}$	143,0	$\pm 6,0^{ab}$		
	<i>Tanacetum mucroniferum</i> Hub. Mor. Et Grierson	White	51,3	$\pm 3,1^b$	115,3	$\pm 3,4^c$	165,3	$\pm 8,9^{bc}$		
	<i>Inula oculus-christi</i> L.	Yellow	28,3	$\pm 0,9^a$	87,2	$\pm 1,2^b$	213,6	$\pm 14,7^{bc}$		
	<i>Hypericum scabrum</i> L.	Yellow	35,8	$\pm 0,6^{ab}$	42,2	$\pm 0,5^a$	61,9	$\pm 6,9^a$		
	<i>Barbarea auriculata</i> Hausskn. ex Bornm	Yellow	36,2	$\pm 4,8^{ab}$	163,8	$\pm 11,8^e$	408,6	$\pm 53,4^d$		
	<i>Globularia trichosantha</i> Fisch. & C.A.Mey	Purple	538,8	$\pm 11,5^d$	201,2	$\pm 11,1^f$	212,0	$\pm 23,7^{bc}$		
<i>Onobrychis cornuta</i> (L.) Desv.	Purple	92,3	$\pm 4,2^c$	145,0	$\pm 2,0^d$	242,4	$\pm 35,9^c$			
<b>2500 m</b>	<i>Crepis armena</i> DC	Yellow	188,6	$\pm 8,2^a$	362,9	$\pm 22,1^d$	209,0	$\pm 9,2^d$	496,5	$\pm 23,4^b$
	<i>Anthemis cretica</i> L.	White	79,6	$\pm 1,6^a$	77,4	$\pm 0,9^b$	160,9	$\pm 9,4^c$		
	<i>Campanula tridentata</i> Schreber	Purple	43,5	$\pm 5,8^a$	61,1	$\pm 0,4^{ab}$	115,2	$\pm 12,9^b$		
	<i>Euphorbia petrophila</i> C.A. Meyer	Green	136,1	$\pm 9,6^a$	87,7	$\pm 3,5^b$	94,5	$\pm 6,5^{ab}$		
	<i>Papaver fugax</i> Poiret	Pink	83,8	$\pm 3,7^a$	77,0	$\pm 7,7^b$	77,4	$\pm 2,9^{ab}$		
	<i>Aster alpinus</i> L.	Purple	61,9	$\pm 10,6^a$	79,4	$\pm 4,9^b$	194,8	$\pm 18,6^{cd}$		
	<i>Scutellaria orientalis</i> L.	Yellow	166,0	$\pm 15,2^a$	141,3	$\pm 15,3^c$	391,0	$\pm 24,1^e$		
	<i>Coronilla orientalis</i> Miller	Yellow	23,5	$\pm 0,2^a$	76,3	$\pm 1,0^b$	121,7	$\pm 18,6^b$		
	<i>Lallemantia canescens</i> (L) Fisch. & Mey.	Purple	44,4	$\pm 2,0^a$	35,9	$\pm 1,1^a$	60,4	$\pm 5,0^a$		
	<i>Dianthus orientalis</i> Adams.	Purple	24,2	$\pm 0,5^b$	90,5	$\pm 2,1^b$	85,0	$\pm 3,4^{ab}$		
	<i>Anthemis cretica</i> L.	White	101,4	$\pm 1,6^e$	196,4	$\pm 2,7^e$	160,8	$\pm 10,0^{de}$		
<i>Campanula tridentata</i> Schreber	Blue	36,7	$\pm 3,9^{bc}$	34,9	$\pm 1,2^a$	185,1	$\pm 5,0^e$			
<i>Papaver fugax</i> Poiret	Pink	27,9	$\pm 2,1^{ab}$	124,7	$\pm 9,6^e$	51,4	$\pm 1,3^a$			
<i>Hedysarum erythroleucum</i> Boiss.	Purple	47,0	$\pm 7,7^c$	100,4	$\pm 1,0^d$	94,7	$\pm 2,6^b$			
<i>Pedicularis comosa</i> L.	White	60,8	$\pm 3,3^d$	157,0	$\pm 10,6^f$	92,0	$\pm 8,0^b$			
<i>Scorzonera sericea</i> DC.	Yellow	22,1	$\pm 0,8^a$	74,2	$\pm 5,1^c$	94,6	$\pm 9,5^b$			
<i>Senecio hypoleucus</i> Benth	Yellow	16,4	$\pm 0,4^a$	54,2	$\pm 1,6^b$	124,7	$\pm 14,0^{bc}$			
<b>3000 m</b>	<i>Astragalus nezaketiae</i> A.Duran & Aytaç	Purple	42,6	$\pm 2,1^c$	76,4	$\pm 0,5^c$	120,2	$\pm 1,7^{bc}$	342,6	13,9 <sup>a</sup>

For a given metal, mean concentrations followed by the same letter are not significantly different ( $p < 0.05$ ).

**Table 8.** Cu concentrations ( $\mu\text{g/g dw}$ ) of plants grown and soil in different altitude (\* $p<0.05$ ).

Altitude	Plant species	Flower Color	Flower		Leaf		Root		Soil	
1500 m	<i>Linum mucronatum</i> Bertol	Yellow	65,2	$\pm$ 9,3 <sup>a</sup>	15,4	$\pm$ 1,1 <sup>d</sup>	10,6	$\pm$ 0,2 <sup>ab</sup>	27,9	$\pm$ 1,0 <sup>c</sup>
	<i>Genista aucheri</i> Boiss.	Yellow	48,9	$\pm$ 4,6 <sup>a</sup>	10,8	$\pm$ 0,4 <sup>b</sup>	12,2	$\pm$ 0,3 <sup>b</sup>		
	<i>Anchusa leptophylla</i> Roem. & Schult	Blue	128,7	$\pm$ 44,7 <sup>b</sup>	12,9	$\pm$ 0,2 <sup>c</sup>	18,0	$\pm$ 0,9 <sup>c</sup>		
	<i>Euphorbia virgata</i> Waldst. & Kit.	Green	51,9	$\pm$ 15,8 <sup>a</sup>	15,4	$\pm$ 0,5 <sup>d</sup>	12,3	$\pm$ 0,2 <sup>b</sup>		
	<i>Glaucium leiocarpum</i> Boiss.	Orange	8,4	$\pm$ 0,5 <sup>a</sup>	5,9	$\pm$ 0,1 <sup>a</sup>	12,1	$\pm$ 0,7 <sup>b</sup>		
	<i>Astragalus ornithopodioides</i> Lam.	Purple	5,4	$\pm$ 0,4 <sup>a</sup>	6,5	$\pm$ 0,5 <sup>a</sup>	9,4	$\pm$ 0,6 <sup>a</sup>		
	<i>Alcea calvertii</i> (Boiss) Boiss.	White	7,0	$\pm$ 0,4 <sup>a</sup>	5,3	$\pm$ 0,0 <sup>a</sup>	9,6	$\pm$ 0,5 <sup>a</sup>		
2000 m	<i>Genista aucheri</i> Boiss.	Yellow	193,3	$\pm$ 78,1 <sup>b</sup>	15,5	$\pm$ 0,3 <sup>a</sup>	12,6	$\pm$ 1,2 <sup>a</sup>	25,2	$\pm$ 1,3 <sup>c</sup>
	<i>Euphorbia virgata</i> Waldst. & Kit.	Green	51,0	$\pm$ 4,2 <sup>a</sup>	35,3	$\pm$ 7,9 <sup>b</sup>	11,7	$\pm$ 0,2 <sup>a</sup>		
	<i>Tanacetum mucroniferum</i> Hub. Mor. Et Grierson	White	9,6	$\pm$ 1,0 <sup>a</sup>	8,7	$\pm$ 0,1 <sup>a</sup>	11,8	$\pm$ 0,2 <sup>a</sup>		
	<i>Inula oculus-christi</i> L.	Yellow	8,4	$\pm$ 0,2 <sup>a</sup>	10,7	$\pm$ 0,5 <sup>a</sup>	12,4	$\pm$ 0,4 <sup>a</sup>		
	<i>Hypericum scabrum</i> L.	Yellow	9,4	$\pm$ 0,1 <sup>a</sup>	5,6	$\pm$ 0,2 <sup>a</sup>	9,3	$\pm$ 0,2 <sup>a</sup>		
	<i>Barbarea auriculata</i> Hausskn. ex Bornm	Yellow	5,9	$\pm$ 0,8 <sup>a</sup>	8,7	$\pm$ 0,4 <sup>a</sup>	18,0	$\pm$ 1,6 <sup>b</sup>		
	<i>Globularia trichosantha</i> Fisch. & C.A.Mey	Purple	23,6	$\pm$ 0,3 <sup>a</sup>	10,7	$\pm$ 0,3 <sup>a</sup>	19,4	$\pm$ 0,4 <sup>b</sup>		
<i>Onobrychis cornuta</i> (L.) Desv.	Purple	8,0	$\pm$ 0,1 <sup>a</sup>	5,0	$\pm$ 0,1 <sup>a</sup>	9,8	$\pm$ 1,0 <sup>a</sup>			
2500 m	<i>Crepis armena</i> DC	Yellow	44,9	$\pm$ 4,8 <sup>a</sup>	17,2	$\pm$ 0,5 <sup>c</sup>	18,7	$\pm$ 0,5 <sup>e</sup>	14,9	$\pm$ 0,5 <sup>b</sup>
	<i>Anthemis cretica</i> L.	White	65,4	$\pm$ 8,6 <sup>a</sup>	22,0	$\pm$ 0,8 <sup>d</sup>	15,8	$\pm$ 0,7 <sup>d</sup>		
	<i>Campanula tridentata</i> Schreber	Purple	43,2	$\pm$ 8,4 <sup>a</sup>	15,4	$\pm$ 0,1 <sup>c</sup>	18,9	$\pm$ 1,4 <sup>e</sup>		
	<i>Euphorbia petrophila</i> C.A. Meyer	Green	24,4	$\pm$ 0,8 <sup>a</sup>	10,6	$\pm$ 0,5 <sup>b</sup>	11,9	$\pm$ 0,1 <sup>c</sup>		
	<i>Papaver fugax</i> Poiret	Pink	28,5	$\pm$ 5,6 <sup>a</sup>	8,5	$\pm$ 0,1 <sup>b</sup>	8,2	$\pm$ 0,3 <sup>b</sup>		
	<i>Aster alpinus</i> L.	Purple	47,3	$\pm$ 10,1 <sup>a</sup>	15,5	$\pm$ 0,6 <sup>c</sup>	13,4	$\pm$ 0,7 <sup>c</sup>		
	<i>Scutellaria orientalis</i> L.	Yellow	8,6	$\pm$ 0,3 <sup>a</sup>	11,1	$\pm$ 2,3 <sup>b</sup>	8,0	$\pm$ 0,4 <sup>b</sup>		
	<i>Coronilla orientalis</i> Miller	Yellow	8,4	$\pm$ 0,1 <sup>a</sup>	9,1	$\pm$ 0,7 <sup>b</sup>	9,6	$\pm$ 0,5 <sup>b</sup>		
	<i>Lallemantia canescens</i> (L) Fisch. & Mey.	Purple	3,8	$\pm$ 0,1 <sup>a</sup>	3,6	$\pm$ 0,1 <sup>a</sup>	7,4	$\pm$ 0,2 <sup>b</sup>		
	<i>Dianthus orientalis</i> Adams.	Purple	3,7	$\pm$ 0,1 <sup>b</sup>	3,5	$\pm$ 0,0 <sup>a</sup>	4,2	$\pm$ 0,1 <sup>a</sup>		
	<i>Anthemis cretica</i> L.	White	34,7	$\pm$ 2,1 <sup>a</sup>	12,0	$\pm$ 0,4 <sup>f</sup>	13,3	$\pm$ 0,2 <sup>d</sup>		
3000 m	<i>Campanula tridentata</i> Schreber	Blue	76,0	$\pm$ 20,5 <sup>b</sup>	11,1	$\pm$ 0,4 <sup>e</sup>	20,0	$\pm$ 0,2 <sup>e</sup>	10,9	0,5 <sup>a</sup>
	<i>Papaver fugax</i> Poiret	Pink	22,6	$\pm$ 2,7 <sup>a</sup>	7,8	$\pm$ 0,2 <sup>c</sup>	10,1	$\pm$ 1,4 <sup>c</sup>		
	<i>Hedysarum erythroleucum</i> Boiss.	Purple	33,2	$\pm$ 3,5 <sup>a</sup>	10,0	$\pm$ 0,2 <sup>d</sup>	10,1	$\pm$ 0,1 <sup>c</sup>		
	<i>Pedicularis comosa</i> L.	White	6,7	$\pm$ 0,2 <sup>a</sup>	5,1	$\pm$ 0,6 <sup>a</sup>	6,6	$\pm$ 0,1 <sup>b</sup>		
	<i>Scorzonera sericea</i> DC.	Yellow	6,9	$\pm$ 0,3 <sup>a</sup>	4,1	$\pm$ 0,2 <sup>a</sup>	4,5	$\pm$ 0,2 <sup>a</sup>		
	<i>Senecio hypoleucus</i> Benth	Yellow	9,8	$\pm$ 1,0 <sup>a</sup>	4,4	$\pm$ 0,1 <sup>a</sup>	8,5	$\pm$ 0,5 <sup>c</sup>		
	<i>Astragalus nezaketiae</i> A.Duran & Aytaç	Purple	4,4	$\pm$ 0,2 <sup>a</sup>	4,2	$\pm$ 0,0 <sup>a</sup>	4,6	$\pm$ 0,0 <sup>a</sup>		

For a given metal, mean concentrations followed by the same letter are not significantly different ( $p<0.05$ ).

**Table 9.** Zn concentrations ( $\mu\text{g/g dw}$ ) of plants grown and soil in different altitude (\* $p<0.05$ ).

Altitude	Plant species	Flower Color	Flower		Leaf		Root		Soil	
	<i>Linum mucronatum</i> Bertol	Yellow	58,8	$\pm$ 6,8 <sup>a</sup>	40,7	$\pm$ 0,8 <sup>c</sup>	49,0	$\pm$ 1,2 <sup>c</sup>	65,2	$\pm$ 2,8 <sup>a</sup>
	<i>Genista aucheri</i> Boiss.	Yellow	64,8	$\pm$ 5,3 <sup>a</sup>	42,7	$\pm$ 1,0 <sup>c</sup>	19,1	$\pm$ 1,2 <sup>ab</sup>		
	<i>Anchusa leptophylla</i> Roem. & Schult	Blue	117,4	$\pm$ 30,4 <sup>b</sup>	42,7	$\pm$ 1,4 <sup>c</sup>	100,8	$\pm$ 3,2 <sup>e</sup>		
	<i>Euphorbia virgata</i> Waldst. & Kit.	Green	73,2	$\pm$ 13,1 <sup>a</sup>	101,1	$\pm$ 5,4 <sup>d</sup>	61,6	$\pm$ 5,5 <sup>d</sup>		
	<i>Glaucium leiocarpum</i> Boiss.	Orange	16,1	$\pm$ 1,0 <sup>a</sup>	28,7	$\pm$ 0,7 <sup>b</sup>	13,6	$\pm$ 0,9 <sup>a</sup>		
	<i>Astragalus ornithopodioides</i> Lam.	Purple	22,1	$\pm$ 0,7 <sup>a</sup>	18,9	$\pm$ 0,7 <sup>a</sup>	24,4	$\pm$ 1,4 <sup>b</sup>		
	<i>Alcea calvertii</i> (Boiss) Boiss.	White	14,5	$\pm$ 0,4 <sup>a</sup>	12,2	$\pm$ 0,1 <sup>a</sup>	26,4	$\pm$ 1,3 <sup>b</sup>		
<b>1500 m</b>	<i>Genista aucheri</i> Boiss.	Yellow	201,7	$\pm$ 62,3 <sup>b</sup>	59,1	$\pm$ 1,0 <sup>c</sup>	45,3	$\pm$ 10,9 <sup>c</sup>	84,3	$\pm$ 3,8 <sup>b</sup>
	<i>Euphorbia virgata</i> Waldst. & Kit.	Green	104,0	$\pm$ 11,8 <sup>a</sup>	104,0	$\pm$ 3,2 <sup>e</sup>	84,0	$\pm$ 1,3 <sup>d</sup>		
	<i>Tanacetum mucroniferum</i> Hub. Mor. Et Grierson	White	19,9	$\pm$ 1,2 <sup>a</sup>	34,5	$\pm$ 0,4 <sup>b</sup>	30,5	$\pm$ 0,9 <sup>abc</sup>		
	<i>Inula oculus-christi</i> L.	Yellow	27,2	$\pm$ 0,4 <sup>a</sup>	34,9	$\pm$ 1,1 <sup>b</sup>	42,7	$\pm$ 1,5 <sup>bc</sup>		
	<i>Hypericum scabrum</i> L.	Yellow	26,7	$\pm$ 0,5 <sup>a</sup>	13,6	$\pm$ 0,1 <sup>a</sup>	15,3	$\pm$ 1,0 <sup>a</sup>		
	<i>Barbarea auriculata</i> Hausskn. ex Bornm	Yellow	40,7	$\pm$ 4,9 <sup>a</sup>	65,8	$\pm$ 2,2 <sup>d</sup>	83,1	$\pm$ 6,4 <sup>d</sup>		
	<i>Globularia trichosantha</i> Fisch. & C.A.Mey	Purple	69,4	$\pm$ 1,2 <sup>a</sup>	33,2	$\pm$ 1,1 <sup>b</sup>	41,3	$\pm$ 2,7 <sup>bc</sup>		
<i>Onobrychis cornuta</i> (L.) Desv.	Purple	27,3	$\pm$ 0,8 <sup>a</sup>	15,4	$\pm$ 0,5 <sup>a</sup>	23,7	$\pm$ 3,0 <sup>ab</sup>			
<b>2000 m</b>	<i>Crepis armena</i> DC	Yellow	114,8	$\pm$ 6,1 <sup>a</sup>	126,2	$\pm$ 4,7 <sup>f</sup>	115,8	$\pm$ 4,3 <sup>e</sup>	95,5	$\pm$ 6,4 <sup>c</sup>
	<i>Anthemis cretica</i> L.	White	93,9	$\pm$ 6,4 <sup>a</sup>	107,0	$\pm$ 2,2 <sup>d</sup>	70,2	$\pm$ 4,6 <sup>c</sup>		
	<i>Campanula tridentata</i> Schreber	Purple	68,7	$\pm$ 8,4 <sup>a</sup>	129,6	$\pm$ 0,6 <sup>f</sup>	88,8	$\pm$ 9,9 <sup>d</sup>		
	<i>Euphorbia petrophila</i> C.A. Meyer	Green	108,9	$\pm$ 4,6 <sup>a</sup>	115,1	$\pm$ 1,5 <sup>f</sup>	140,8	$\pm$ 1,5 <sup>f</sup>		
	<i>Papaver fugax</i> Poiret	Pink	55,3	$\pm$ 5,5 <sup>a</sup>	36,4	$\pm$ 2,4 <sup>b</sup>	27,2	$\pm$ 0,8 <sup>b</sup>		
	<i>Aster alpinus</i> L.	Purple	83,1	$\pm$ 12,9 <sup>a</sup>	66,8	$\pm$ 2,3 <sup>c</sup>	87,1	$\pm$ 3,8 <sup>d</sup>		
	<i>Scutellaria orientalis</i> L.	Yellow	47,9	$\pm$ 3,1 <sup>a</sup>	37,3	$\pm$ 4,2 <sup>b</sup>	40,2	$\pm$ 2,6 <sup>b</sup>		
	<i>Coronilla orientalis</i> Miller	Yellow	22,0	$\pm$ 0,1 <sup>a</sup>	40,8	$\pm$ 3,3 <sup>b</sup>	39,8	$\pm$ 2,3 <sup>b</sup>		
	<i>Lallemantia canescens</i> (L) Fisch. & Mey.	Purple	21,3	$\pm$ 0,7 <sup>a</sup>	38,0	$\pm$ 0,4 <sup>b</sup>	30,5	$\pm$ 1,3 <sup>b</sup>		
	<i>Dianthus orientalis</i> Adams.	Purple	26,4	$\pm$ 1,6 <sup>b</sup>	16,6	$\pm$ 0,4 <sup>a</sup>	13,4	$\pm$ 0,4 <sup>a</sup>		
<b>2500 m</b>	<i>Anthemis cretica</i> L.	White	77,6	$\pm$ 2,0 <sup>a</sup>	64,5	$\pm$ 1,2 <sup>d</sup>	54,9	$\pm$ 2,2 <sup>cd</sup>	62,2	$\pm$ 5,8 <sup>a</sup>
	<i>Campanula tridentata</i> Schreber	Blue	156,4	$\pm$ 41,0 <sup>b</sup>	149,8	$\pm$ 5,3 <sup>c</sup>	125,0	$\pm$ 2,2 <sup>e</sup>		
	<i>Papaver fugax</i> Poiret	Pink	37,7	$\pm$ 3,0 <sup>a</sup>	49,2	$\pm$ 2,0 <sup>c</sup>	63,8	$\pm$ 8,0 <sup>d</sup>		
	<i>Hedysarum erythroleucum</i> Boiss.	Purple	57,6	$\pm$ 4,2 <sup>a</sup>	62,4	$\pm$ 0,8 <sup>d</sup>	36,4	$\pm$ 0,9 <sup>ab</sup>		
	<i>Pedicularis comosa</i> L.	White	63,9	$\pm$ 0,9 <sup>a</sup>	70,5	$\pm$ 5,6 <sup>d</sup>	48,0	$\pm$ 1,6 <sup>c</sup>		
	<i>Scorzonera sericea</i> DC.	Yellow	27,3	$\pm$ 0,5 <sup>a</sup>	38,4	$\pm$ 0,9 <sup>b</sup>	53,7	$\pm$ 1,4 <sup>cd</sup>		
	<i>Senecio hypoleucus</i> Benth	Yellow	30,2	$\pm$ 1,0 <sup>a</sup>	33,5	$\pm$ 0,6 <sup>ab</sup>	43,0	$\pm$ 3,0 <sup>bc</sup>		
	<i>Astragalus nezaketiae</i> A.Duran & Aytac	Purple	22,9	$\pm$ 0,8 <sup>a</sup>	25,3	$\pm$ 0,3 <sup>a</sup>	29,5	$\pm$ 0,4 <sup>a</sup>		
<b>3000 m</b>										

For a given metal, mean concentrations followed by the same letter are not significantly different ( $p<0.05$ ).



**Table 10.** Ni concentrations ( $\mu\text{g/g dw}$ ) of plants grown and soil in different altitude (\* $p<0.05$ ).

Altitude	Plant species	Flower Color	Flower		Leaf		Root		Soil	
1500 m	<i>Linum mucronatum</i> Bertol	Yellow	169,6	$\pm$ 11,2 <sup>d</sup>	38,2	$\pm$ 4,0 <sup>c</sup>	46,9	$\pm$ 1,3 <sup>a</sup>	835,3	$\pm$ 79,0 <sup>d</sup>
	<i>Genista aucheri</i> Boiss.	Yellow	25,3	$\pm$ 2,2 <sup>abc</sup>	26,6	$\pm$ 3,9 <sup>bc</sup>	29,3	$\pm$ 1,7 <sup>a</sup>		
	<i>Anchusa leptophylla</i> Roem. & Schult	Blue	39,8	$\pm$ 9,1 <sup>bc</sup>	21,5	$\pm$ 1,4 <sup>ab</sup>	89,0	$\pm$ 10,1 <sup>b</sup>		
	<i>Euphorbia virgata</i> Waldst. & Kit.	Green	19,2	$\pm$ 3,7 <sup>ab</sup>	19,8	$\pm$ 0,9 <sup>ab</sup>	33,1	$\pm$ 2,8 <sup>a</sup>		
	<i>Glaucium leiocarpum</i> Boiss.	Orange	12,5	$\pm$ 0,9 <sup>a</sup>	4,8	$\pm$ 0,3 <sup>a</sup>	19,7	$\pm$ 3,0 <sup>a</sup>		
	<i>Astragalus ornithopodioides</i> Lam.	Purple	45,2	$\pm$ 4,6 <sup>c</sup>	60,8	$\pm$ 11,6 <sup>d</sup>	280,2	$\pm$ 33,9 <sup>d</sup>		
	<i>Alcea calvertii</i> (Boiss) Boiss.	White	12,9	$\pm$ 0,3 <sup>a</sup>	17,6	$\pm$ 0,9 <sup>ab</sup>	140,8	$\pm$ 16,4 <sup>c</sup>		
2000 m	<i>Genista aucheri</i> Boiss.	Yellow	73,1	$\pm$ 19,6 <sup>b</sup>	19,9	$\pm$ 1,6 <sup>c</sup>	16,1	$\pm$ 2,5 <sup>a</sup>	361,4	$\pm$ 17,3 <sup>c</sup>
	<i>Euphorbia virgata</i> Waldst. & Kit.	Green	25,5	$\pm$ 2,2 <sup>a</sup>	26,4	$\pm$ 1,3 <sup>d</sup>	49,1	$\pm$ 2,7 <sup>b</sup>		
	<i>Tanacetum mucroniferum</i> Hub. Mor. Et Grierson	White	7,3	$\pm$ 0,3 <sup>a</sup>	9,7	$\pm$ 0,7 <sup>ab</sup>	50,9	$\pm$ 2,6 <sup>b</sup>		
	<i>Inula oculus-christii</i> L.	Yellow	6,7	$\pm$ 0,3 <sup>a</sup>	13,5	$\pm$ 0,3 <sup>b</sup>	68,0	$\pm$ 5,0 <sup>bc</sup>		
	<i>Hypericum scabrum</i> L.	Yellow	7,5	$\pm$ 0,4 <sup>a</sup>	4,7	$\pm$ 0,5 <sup>a</sup>	17,6	$\pm$ 2,2 <sup>a</sup>		
	<i>Barbarea auriculata</i> Hausskn. ex Bornm	Yellow	6,8	$\pm$ 0,9 <sup>a</sup>	30,7	$\pm$ 2,5 <sup>d</sup>	90,7	$\pm$ 11,5 <sup>c</sup>		
	<i>Globularia trichosantha</i> Fisch. & C.A.Mey	Purple	206,1	$\pm$ 3,3 <sup>c</sup>	73,4	$\pm$ 4,0 <sup>e</sup>	79,0	$\pm$ 8,3 <sup>c</sup>		
<i>Onobrychis cornuta</i> (L.) Desv.	Purple	33,7	$\pm$ 1,5 <sup>a</sup>	7,1	$\pm$ 0,3 <sup>a</sup>	76,1	$\pm$ 12,0 <sup>c</sup>			
2500 m	<i>Crepis armena</i> DC	Yellow	60,8	$\pm$ 2,7 <sup>a</sup>	85,1	$\pm$ 6,2 <sup>e</sup>	38,4	$\pm$ 1,8 <sup>bc</sup>	152,6	$\pm$ 6,4 <sup>b</sup>
	<i>Anthemis cretica</i> L.	White	39,0	$\pm$ 3,2 <sup>a</sup>	13,5	$\pm$ 0,4 <sup>bc</sup>	26,0	$\pm$ 1,8 <sup>abc</sup>		
	<i>Campanula tridentata</i> Schreber	Purple	24,9	$\pm$ 2,7 <sup>a</sup>	7,5	$\pm$ 0,5 <sup>abc</sup>	34,7	$\pm$ 8,6 <sup>bc</sup>		
	<i>Euphorbia petrophila</i> C.A. Meyer	Green	40,2	$\pm$ 2,3 <sup>a</sup>	8,1	$\pm$ 0,2 <sup>abc</sup>	74,3	$\pm$ 12,4 <sup>d</sup>		
	<i>Papaver fugax</i> Poiret	Pink	34,8	$\pm$ 2,7 <sup>a</sup>	29,6	$\pm$ 2,7 <sup>d</sup>	35,8	$\pm$ 1,2 <sup>bc</sup>		
	<i>Aster alpinus</i> L.	Purple	32,0	$\pm$ 6,8 <sup>a</sup>	12,9	$\pm$ 1,6 <sup>bc</sup>	42,3	$\pm$ 3,7 <sup>c</sup>		
	<i>Scutellaria orientalis</i> L.	Yellow	32,8	$\pm$ 2,9 <sup>a</sup>	16,2	$\pm$ 2,7 <sup>c</sup>	27,6	$\pm$ 2,7 <sup>abc</sup>		
	<i>Coronilla orientalis</i> Miller	Yellow	6,4	$\pm$ 0,1 <sup>a</sup>	7,0	$\pm$ 0,6 <sup>abc</sup>	38,4	$\pm$ 5,7 <sup>bc</sup>		
	<i>Lallemantia canescens</i> (L) Fisch. & Mey.	Purple	6,3	$\pm$ 0,4 <sup>a</sup>	4,7	$\pm$ 0,2 <sup>ab</sup>	10,5	$\pm$ 1,0 <sup>a</sup>		
	<i>Dianthus orientalis</i> Adams.	Purple	3,4	$\pm$ 0,3 <sup>b</sup>	2,5	$\pm$ 0,1 <sup>a</sup>	14,8	$\pm$ 1,0 <sup>ab</sup>		
	<i>Anthemis cretica</i> L.	White	17,8	$\pm$ 0,8 <sup>ab</sup>	15,4	$\pm$ 0,5 <sup>b</sup>	29,9	$\pm$ 1,8 <sup>d</sup>		
3000 m	<i>Campanula tridentata</i> Schreber	Blue	45,0	$\pm$ 13,7 <sup>c</sup>	4,6	$\pm$ 0,2 <sup>a</sup>	11,6	$\pm$ 0,2 <sup>a</sup>	91,0	$\pm$ 2,4 <sup>a</sup>
	<i>Papaver fugax</i> Poiret	Pink	15,0	$\pm$ 1,4 <sup>ab</sup>	14,5	$\pm$ 2,1 <sup>b</sup>	11,5	$\pm$ 0,5 <sup>a</sup>		
	<i>Hedysarum erythroleucum</i> Boiss.	Purple	26,6	$\pm$ 2,7 <sup>b</sup>	13,3	$\pm$ 0,6 <sup>b</sup>	35,8	$\pm$ 0,6 <sup>e</sup>		
	<i>Pedicularis comosa</i> L.	White	8,0	$\pm$ 0,5 <sup>ab</sup>	13,7	$\pm$ 2,5 <sup>b</sup>	11,9	$\pm$ 0,9 <sup>a</sup>		
	<i>Scorzonera sericea</i> DC.	Yellow	3,0	$\pm$ 0,1 <sup>a</sup>	7,7	$\pm$ 0,8 <sup>a</sup>	7,3	$\pm$ 1,1 <sup>a</sup>		
	<i>Senecio hypoleucus</i> Benth	Yellow	4,0	$\pm$ 0,1 <sup>a</sup>	6,5	$\pm$ 0,2 <sup>a</sup>	17,7	$\pm$ 1,6 <sup>b</sup>		
	<i>Astragalus nezaketiae</i> A.Duran & Aytac	Purple	8,7	$\pm$ 0,4 <sup>ab</sup>	3,9	$\pm$ 0,0 <sup>a</sup>	12,0	$\pm$ 0,3 <sup>a</sup>		

For a given metal, mean concentrations followed by the same letter are not significantly different ( $p<0.05$ ).

**Table 11.** Statistical evaluation of plants with blue and violet flowers and their soil properties at different altitudes (\*p<0.05).

Altitude	Plant species	B	Na	Mg	Al	K	Ca	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn
1500 m	<i>Anchusa leptophylla</i> Roem. & Schult	a	b	d	a	d	c	a	a	a	a	a
	<i>Astragalus ornithopodioides</i> Lam.	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
2000 m	<i>Globularia trichosantha</i> Fisch. & C.A.Mey	a	a	a	c	a	a	a	c	b	a	a
	<i>Onobrychis cornuta</i> (L.) Desv.	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
2500 m	<i>Campanula tridentata</i> Schreber .	a	d	e	a	c	d	a	a	a	a	a
	<i>Aster alpinus</i> L.	a	c	c	a	c	b	a	a	a	a	a
	<i>Lallemantia canescens</i> (L) Fisch. & Mey.	a	a	a	b	a	a	a	a	a	a	a
	<i>Dianthus orientalis</i> Adams.	b	a	a	a	a	a	b	b	b	b	b
	<i>Campanula tridentata</i> Schreber	a	c	b	a	b	ab	a	a	a	a	a
3000 m	<i>Hedysarum erythroleucum</i> Boiss.	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
	<i>Astragalus nezaketiae</i> A.Duran & Aytac	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a

For blue-violet flowered plants, mean concentrations followed by the same letter are not significantly different (p<0.05).

**Table 12.** Statistical evaluation of plants with yellow flowers and their soil properties at different altitudes (\*p<0.05).

Altitude	Plant species	B	Na	Mg	Al	K	Ca	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn
1500 m	<i>Linum mucronatum</i> Bertol	c	b	e	b	b	c	d	b	c	a	a
	<i>Genista aucheri</i> Boiss.	e	b	c	a	b	c	c	a	a	a	a
2000 m	<i>Genista aucheri</i> Boiss.	d	c	b	a	b	b	b	a	b	b	b
	<i>Inula oculus-christi</i> L.	c	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
	<i>Hypericum scabrum</i> L.	bc	a	a	a	a	a	ab	a	a	a	a
	<i>Barbarea auriculata</i> Hausskn. ex Bornm	b	a	a	a	a	a	ab	a	a	a	a
	<i>Crepis armena</i> DC	e	b	d	d	c	c	f	c	b	a	a
2500 m	<i>Scutellaria orientalis</i> L.	a	a	a	c	a	a	e	b	a	a	a
	<i>Coronilla orientalis</i> Miller	c	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
3000 m	<i>Scorzonera sericea</i> DC.	d	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
	<i>Senecio hypoleucus</i> Benth	bc	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a

## CONCLUSION

As a result, in this study, it was observed that mineral element concentrations changed in both plant parts and soil at different elevations. In general, it was determined that the amount of elements in the soil decreased significantly as the elevation increased. We think that the fact that the highest elevation of 3000 m in the study area is poor in nutrients may be due to the coarse particles of stony soils and low absorption level. It was observed that the amount of element accumulation of the plants studied at different elevations differed from each other depending on the type, structure, formation and elevation at which they grew. If the mineral element concentration is very low, some plants alter their metabolic processes to improve their accumulation capacity. On the other hand, if the mineral element concentration is too high, species develop metabolic modifications where they store elements in vacuoles to prevent cellular damage or develop a tendency to get rid of these elements (Özyiğit et al. 2015). Furthermore, although macro- and micronutrients differed between elevation zones, this relationship was not always linear and varied by nutrient.

## ACKNOWLEDGMENTS

This study was supported by TÜBİTAK 1001 (Project No: 120Z388).

## REFERENCES

- [1] Brady NC, Weil RR, Weil RR (2008) The nature and properties of soils. 13:662-710. Upper Saddle River NJ: Prentice Hall.
- [2] Maathuis FJM, Diatloff E (2013) Roles and functions of plant mineral nutrients. *Methods Mol Biol* 953:1-21.
- [3] Elveren M, Osma E, Karakoyun G (2015) Accumulation of Mineral Elements in The Component of The Scots Pine (*Pinus sylvestris* L. var. *hamata* Steven) Trees and Grown in The Soil in Different Area of Erzincan. *Celal Bayar Univ J Sci* 11(2): 119-126.
- [4] Kaur H, Kaur H, Kaur H, Srivastava S (2022) The beneficial roles of trace and ultratrace elements in plants. *Plant Growth Regula* 100:219-236.
- [5] Jones C, Jacobsen J (2001) Plant nutrition and soil fertility. Nutrient management module 2. Montana State University Extension Service. Publication 4449-2.
- [6] Karahan F (2023) Evaluation of Trace Element and Heavy Metal Levels of Some Ethnobotanically Important Medicinal Plants Used as Remedies in Southern Turkey in Terms of Human Health Risk. *Bio Trace Element Res* 201(1): 493-513.
- [7] Mondal S. ve Bose B (2019) Impact of micronutrient seed priming on germination, growth, development, nutritional status and yield aspects of plants. *J Plant Nutr* 42 (19):2577-2599.
- [8] Jing J, Zhang F, Rengel Z, Shen J (2012) Localized fertilization with P plus N elicits an ammonium-dependent enhancement of maize root growth and nutrient uptake. *Field Crops Res* 133:176-185.
- [9] López-Bucio J, Hernández-Madrigril F, Cervantes, Ortiz-Castro R, Carreón-Abud Y, Martínez-Trujillo M (2014) Phosphate relieves chromium toxicity in *Arabidopsis thaliana* plants by interfering with chromate uptake. *BioMetals* 27:363-370.
- [10] Alloway BJ (2007) Heavy metals in soils blackie academic & professional: london, UK. Salonen, V; Korkka-Niemi Kinfluence of parent sediments on the concentration of heavy metals in urban and suburban soils in turku, Finland. *App Geoche* 22:906-918.
- [11] Salonen, V.P. and Korkka-Niemi, K. (2007) Influence of Parent Sediments on the Concentration of Heavy Metals in Urban and Suburban Soils in Turku, Finland. *Applied Geochemistry*, 22, 906-918.
- [12] Sundqvist M. K, Giesler R, Graae B. J, Wallander H, Fogelberg E, Wardle D. A (2010) Interactive effects of vegetation type and elevation on aboveground and below ground properties in a subarctic tundra. *Oikos* 120:128-142.
- [13] Haider F, Kumar N, Banerjee S, Naqvi AA, Bagchi GD (2009) Effect of altitude on the essential oil constituents of *Artemisia roxburghiana* Besser var. *purpurascens* (Jacq.) Hook. *Jour. Essent. Oil Res* 21:302-303.
- [14] Ebrahimi M, Ranjbar S (2016) Some Autecological Properties of Medicinal Plant of *Salvia hydrangea* L. in Mazandaran, Iran. *Journal of Rangeland Science* 6(3):253-263.
- [15] Kumar S, Suyal DC, Yadav A, Shouche Y, Goel R (2019) Microbial diversity and soil physicochemical characteristic of higher altitude. *PLoS ONE* 14(3): e0213844.
- [16] Esen F, Avcı V (2020) Effect of Lithological and Geomorphological Factors on Distribution of Vegetation in Berit Mountains (Kahramanmaraş). *Gaziantep Univ J Soc Sci* 19(3):664-685.
- [17] Özhatay, N., (2006). Türkiye'nin BTC Boru Hattı Boyunca Önemli Bitki Alanları s. 125-127, BTC şirketi, İstanbul. Pils, G. *Flowers of Turkey; a Photo Guide*. Friedrich VDV, Linz.
- [18] Korkmaz M, Turgut N (2014) Flora of Ergan Mountain (Erzincan/Turkey). *Biol Diversity and Cons* 7(3):195-216.
- [19] Boz D, Yılmaz A (2020) An Approach to the Planning and Environmental Geology of Erzincan Plain and its Surroundings. *J Geo Eng* 44:225-254.
- [20] Davis, PH. 1965-1985. *Flora of Turkey and The East Aegean Islands*. Vol. 1-9, Edinburgh University Press.
- [21] Osma E, Kandemir A (2016) Analysing the effect of elements upon some endemic plants spreading over different habitats. *Feb-Frese Environ Bull* 25(7):2454-2460.
- [22] Yavuzer H, Osma E (2018) Evaluation of *Salix fragilis* L.as a biomonitor in heavy metal pollution.



- Eskisehir Technical University J Sci Techno C- Life Sci and Biotechno 7(2):122-129.
- [23] Roomi I, Hussain A, Khan SW, Nafees MA, Naqvi AUN, Akram W (2023) Mineral Evaluation of Fodder Tree Leaves and Shrubs Consumed by Livestock in The Mountain Region of Pakistan. Pak J Bot 55(2):635-642.
- [24] Dogan Y, Baslar S, Ugulu IA (2014) Study on Detecting Heavy Metal Accumulation Through Biomonitoring: Content of Trace Elements in Plants at Mount Kazdağı in Turkey. Applied Ecology and Environmental Research 12(3):627-636.
- [25] Gerdol R, Bragazza L (2006) Effects of altitude on element accumulation in alpine moss. Chemosphere 64(5):810-816.
- [26] Ugulu I Dogan Y, Baslar S, Varol O (2012) Biomonitoring of trace element accumulation in plants growing at Murat Mountain. Int. J. Environ. Sci. Technol 9:527-534.
- [27] Başlar S, Kula I, Doğan Y, Yıldız D, Ay G (2009) A study of trace element contents in plants growing at Honaz Dagi-Denizli, Turkey. Ekoloji 18(72):1-7.
- [28] Ozyigit I. I, Severoglu Z, Vatansever R, Öztürk M. (2015) Soil-Plant Interactions in the High-Altitude Ecosystems: A Case Study from Kaz Dağı (Mount Ida), Turkey. Climate Change Impacts on High-Altitude Ecosystems 343-360.
- [29] Sahin I, Akcicek E, Guner O, Dogan Y, Ugulu I (2016) An investigation on determining heavy metal accumulation in plants growing at Kumalar Mountain in Turkey. Eurasia J Biosci 10:22-29.
- [30] Al-Robai SA, Mohamed HA, Ahmed AA, Al-Khulaidi AWA (2019) Effects of elevation gradients and soil components on the vegetation density and species diversity of Alabna escarpment, southwestern Saudi Arabia. Acta Eco Sinica 39(3):202-211.
- [31] Zhao N, He N, Wang Q, Zhang X, Wang R, Xu Z, Yu G (2014) The Altitudinal Patterns of Leaf C:N Stoichiometry Are Regulated by Plant Growth Form, Climate and Soil on Changbai Mountain, China. J Plant Ecol 7(3), 231-240.
- [32] Köhler L, Gieger T, Leuschner C (2013) Altitudinal change in soil and foliar nutrient concentrations and in microclimate across the tree line on the subtropical island mountain Mt. Teide (Canary Islands). J Veg Sci 24(6), 1044-1054.

## Evrişimsel Sinir Ağlarında Duygu Tanıma Algoritmalarının Hiperparametreler ile Kapsamlı Analizi

Suha GÖKALP<sup>1</sup>, İlhan AYDIN<sup>2</sup>,

<sup>1</sup> Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Pasinler Meslek Yüksek Okulu, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye

<sup>2</sup> Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elâzığ, Türkiye

✉: [suha.gokalp@atauni.edu.tr](mailto:suha.gokalp@atauni.edu.tr)  <sup>1</sup> 0000-0002-9705-1466.  <sup>2</sup> 0000-0001-6880-4935

Geliş (Received): 07.05.2024

Düzeltilme (Revision): 20.06.2024

Kabul (Accepted): 10.07.2024

### ÖZ

İnsanlar, davranışsal özelliklerini duygular aracılığıyla ifade ederler. Bir diğer deyişle ifadeler, insan davranış özelliklerinin duygusal dışavurumudur. Yüz ise bu ifadeleri insan-insan etkileşiminde en temel noktaya taşır. Bu etkileşimler sayesinde insanlardan geri tepkiler alınır, fakat makinelerin bu etkileşimi algılayabilmesi için üzerinde çalışılmalıdır. Karikatürize insan görünüşleriyle yalnızca duygulara odaklanılmasına olanak sağlayan FERG veri setinde daha yüksek performans elde edilmesi, gerçek görüntülerdeki başarı oranını da arttıracaktır. Bu amaçla, bu çalışmada, insan yüzündeki duyguların yapay zekâ yardımıyla daha hızlı ve isabetli tahmin edilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Bu bağlamda 7 duygu ifadesi olan Şaşkın, Üzgün, Normal, Mutlu, Korku, İğrenme, Kızgın isabetli bir şekilde tahmin edilmeye çalışılmıştır. FERG veri seti ile çalıştırılan ResNet 50, ResNet 50 32x4d, Vit\_b\_16, Vit\_b32, EfficientNet B0, EfficientNet B1, EfficientNet B2 modellerinde %100 başarı elde edilmiştir. Modellerin performans metrikleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. FERG veri seti ile yapılan literatürdeki diğer çalışmalarla sonuçlar kıyas edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Derin Öğrenme Yöntemleri, Yüz Duygu Tanıma, Evrişimsel Sinir Ağları, FERG, ResNet, EfficientNet

## Comprehensive Analysis of Emotion Recognition Algorithms in Convolutional Neural Networks with Hyperparameters

### ABSTRACT

People express their behavioral characteristics through emotions. In other words, expressions are emotional expressions of human behavioral characteristics. The face carries these expressions to the most fundamental point in human-human interaction. Thanks to these interactions, feedback is received from people, but it must be studied so that machines can perceive this interaction. Achieving higher performance on the FERG dataset, which allows focusing only on emotions with cartoonish human appearances, will also increase the performance rate in real images. For this purpose, this study focused on faster and more accurate prediction of emotions on the human face with the help of artificial intelligence. In this context, 7 emotion expressions, Confused, Sad, Normal, Happy, Fear, Disgust and Angry, were tried to be predicted accurately. 100% performance was achieved in ResNet 50, ResNet 50 32x4d, Vit\_b\_16, Vit\_b32, EfficientNet B0, EfficientNet B1, EfficientNet B2 models run with the FERG dataset. Performance metrics of the models are presented comparatively. The results were compared with other studies in the literature using the FERG dataset.

**Keywords:** Deep Learning Methods, Facial Emotion Recognition, Convolutional Neural Networks, FERG, ResNet, EfficientNet

### GİRİŞ

Gerek hız, depolama ve hesaplama olanakları anlamında gelişen bilgisayar teknolojisi, gerek gelişen diğer imkânlar sayesinde insanlar yeni keşif alanlarına yönelmiştir. Duygu, davranış yoluyla ve birçok ifade yöntemiyle dışı doğru belirli bir uyaran, olay veya duruma verilen bir psikolojik ve fizyolojik tepkidir. Yüz duygu tanıma alanı da son birkaç yıldır araştırmacılar

arasında popüler olsa da keşfedilmeye muhtaç alt alanları barındıran bir konsepttir. Yüz duygu tanıma işleminin makinelerce hesaplanarak yapılması birçok güvenlik ve ticari faydalarını da beraberinde getirmektedir. İnsan yüzlerinden gelen yüz duygularını yorumlayabilen algoritmik çözümler tasarlamak ve geliştirmek, robotik, oyun, dijital pazarlama, akıllı öğretmen sistemleri ve diğerleri gibi insan-bilgisayar

etkileşimi bağlamında yeni olasılıklar penceresi açmaktadır [1].

Yapay zeka ile de otomatik yüz ifadesi tanıma (Facial Emotion Recognition – FER) sürekli gelişme göstererek duygusal zekanın önemli bir araştırma alanı olarak araştırmacıların artan ilgisini gördü [2]. Yüz görüntülerinden insan ifadesi tanıma için analitik modeller sağlamak amacıyla mühendisler, matematikçiler ve bilgisayar bilimcileri, verimli algoritmaları etkili bir şekilde uygulayabilen yaklaşımları yeniden üretmenin farklı yollarını araştırmaktadırlar. Bu konu üzerine çalışan araştırmacılar görüntü işleme, bilgisayarla görme, örüntü tanıma ve yapay zeka alanları arasında güçlü korelasyonlara ulaşmaktadır ve literatür üzerinden daha başka ilginç yaklaşımlara göz atılabilir [3]. Genel olarak, özellikle hesaplamalı işlem gücündeki son başarılar ve yüksek performanslı bilgi işlem için yeni mimariler nedeniyle, daha önce yukarıda belirtilen alanlarda hesaplama sınırlamaları ile kısıtlanmış olan araştırmacılar, yeni imkânlarla uygulamaları çözümlerine kavuşturmuşlardır [4].

### Yüz Tanıma ve Duygusal Yüz Tanıma

Derin öğrenme tekniklerinden CNN, yüz tanıma uygulamalarında oldukça popülerdir. Bu teknik, birçok farklı yüz verisini öğrenerek, yeni yüzlerin benzersiz özelliklerini tanımlayabilir. Bu sayede, yüz tanıma doğruluğu artırılmış olur [3].

Yüz tanıma uygulamaları genellikle 2D görüntüler üzerinden gerçekleştirilirken, 3D yüz tanıma çalışmaları

da yapılır. Bu yaklaşım, yüzün daha fazla detayının yakalanmasına olanak sağlar ve yüz tanıma doğruluğunu artırır [5].

COVID-19 pandemisi döneminde yüz maskesi takmak yaygın hale geldi. Bu nedenle, yüz maskesi takılıken bile yüz tanıma uygulamalarının çalışabilmesi için özel teknikler geliştirildi. Bu teknikler, yüz maskesi takılıken bile yüz özelliklerinin tanınabilmesini sağlar [6].

Yüz tanıma uygulamalarında, yüz özellikleri çıkarımı için farklı teknikler kullanılır. Bu teknikler arasında özellikle PCA (Principal Component Analysis) ve LDA (Linear Discriminant Analysis) sık kullanılır. Bu teknikler, yüz özelliklerini daha doğru bir şekilde çıkarmayı ve tanımlamayı sağlar [7].

Yüz ifadeleri, insanların duygularını ifade etmek için önemli bir araçtır. Duygusal yüz tanıma, yüz ifadelerini analiz ederek, insanların duygusal durumlarını belirleme amacıyla kullanılır. Bu teknik, özellikle psikoloji ve tıp alanlarında kullanılır [3].

Yukarıda belirtilen örneklerin yanı sıra, yüz tanıma alanında birçok farklı çalışma ve geliştirme yapılmaktadır [3]. Özellikle, derin öğrenme tekniklerinin kullanımı ile yüz tanıma doğruluğu artırılmış ve bu teknolojinin birçok farklı alanda kullanımı yaygınlaşmıştır.

Duygusal yüz tanıma alanında kullanılmak üzere üretilmiş FER veri seti üzerinden en iyi isabeti yapabilen modellerin eğitim ve tahmin zamanı olarak en performanslısını seçmek üzere yapılmış olan bu çalışmada, literatürde bu alanda yapılmış çalışmalarla kıyas yapılmış, sonuçlar analiz edilmiştir.

**Tablo 1.** Kullanım amacı bakımından derin öğrenme ile yapılan duygusal yüz tanıma çalışmaları.

Makale	Veri Seti	Özellik Çıkarımı	Yöntem	Başarım
[8]	KDEF, GENK, CK+, SFEW	Ağaç Yapısı Parça Modeli, CNN	Deep-CNN	%82.63 (KDEF), %96.75 (GENKI), %96.81(CK+), %36.79 (SFEW)
[9]	10000 resim (154 kişi)	İfade Vektörü (EV)	İki Parçalı CNN	%96
[10]	FER13, JAFFE, CK+	HOG	CNN	%87.05 (FER13), %99 (JAFFE), %98.79% (CK+)
[11]	JAFFE, CK+	CNN	CNN	%95.65 (JAFFE), %99.36 (CK+)
[12]	JAFFE, CK+	Viola-Jones Algoritması	Geliştirilmiş Özellik Haritası ile CNN	%92.66 (karışık veri seti), %94.94 (çapraz veri seti)
[13]	AffectNet (420.299 resim)	HOG	CNN	%69.3 (Veri setindeki resimlerde insanların yüzünde maske vardır)
[14]	RAVDESS	SSL	Hadamard, IMA, Transofmer temelli füzyon	%86.4

**Tablo 2.** FER2013 Veri Seti ile farklı parametrelerle daha önceden yapılan araştırmalar.

Makale	Yıl	Veri Seti	Özellik Çıkarımı	Yöntem	Başarım
[15]	2017	Geliştirilmiş CK+, DISFA, KDEF, MMI, FER2013	CNN ve Transfer Öğrenme	CNN	%85.27 (İnsan Yüzü), %89.02 (Stilize Karakter)
[16]	2022	FER2013, CK+, FER2013	CNN, VGG16, ResNet50	Logistic Regression, Decision Tree, Bayes	%76.2 FER, %99.4 CK+, %99.6 FER2013
[17]	2023	CK+, FER2013, FER2013	Ayrık Derin Öğrenme – SDL	CNN Temelli STN	%74.92 FER, %99.47 CK+, %98.5 FER2013
[18]	2022	SFEW, CK+, JAFFE, FER2013	CNN temelli OFELBW metodu	OFELBW metodu İkili Balina Alg.	%64.98, %98.35, %96.6, %99.42
[19]	2023	FER2013, CK+, KDEF, RaF-DB, FER-2013H, FER-2013C	DCNN	DCNN	99.98%, 99.25%, 88.17%, 84.09%, 69.87% ve 69.16%
[20]	2021	JAFFE, CK, FEI ve FER2013	LGC-HD operator	SVM	%84.2, %92.3, %98.2 ve 97.9%
[21]	2023	Aff-Wild2, RAF-DB, JAFFE, FER+, FER2013	window-based cross-attention ViT	MLP	%72.48, %92.47, %96.67, %93.09, %98.18
[22]	2022	FER2013, FER2013, JAFFE	RCNN, DenseNet121	IFER-DTFL Derin Transfer Öğrenme, WKELM	92.6% FER2013, 99.86% FER2013, 99.18% JAFFE

## Literatür Taraması

Tablo 1’de yer alan araştırmalar, farklı yüz ifadeleri tanıma yöntemlerini ele almaktadır ve sonuçları, derin öğrenme algoritmalarının kullanımının artması ile daha yüksek doğruluk oranları elde edildiğini göstermektedir. Tablo 2’den çıkan bir sonuç da son yıllarda özellikle FER2013 veri seti ile başarımların artmış olmasıdır. Fakat FER2013 veri setinin animasyon karakterleri ile yapıldığı unutulmamalı, animasyon karakterlerinden gerçek insan yüzlerine nasıl geçileceğine dair araştırmalar yapılmalıdır.

## MATERYAL ve METOT

Bu bölümde kullanılan veri seti, temel derin öğrenme işlemi ve kullanılan birçok algoritmanın başarımları yer almaktadır.

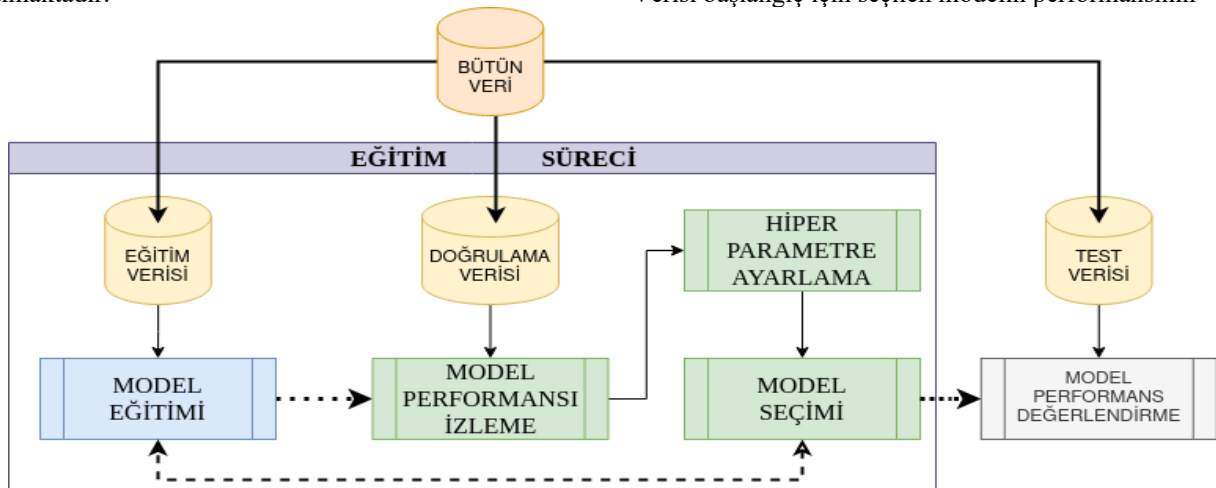
## Veri Seti

Çalışmada FER2013 Veri Seti [15] kullanılmıştır. FER2013 veri setinde toplam 55768 resim dosyası (Kızgın 9170, İğrenme 8571, Korku 7419, Eğlenme 7330, Nötr 6939, Üzgün 7627, Şaşkın 8712 dosya ile temsil edilmek üzere) bulunmaktadır.

Şekil 2’de veri setinden bir kesit verilmiştir. Veri seti kurgu karakterler üzerinden modelleri eğitmeyi ve uygun modeli bulmayı amaçlamaktadır.

## Metodoloji

FER2013 Veri Seti kaynağından edinildikten sonra Eğitim Verisi, Doğrulama Verisi, Test Verisi başlıklarına bölünerek farklı yerlere alınmıştır. Eğitim Verisi başlangıç için seçilen modelin eğitiminde, Doğrulama Verisi başlangıç için seçilen modelin performansını



**Şekil 1.** Veri setinin bölünmesi ve modelle kullanım tercihleri



izlenmesinde ve eğer başarısız ise hiper parametrelerin ayarlanması ve gerekiyorsa modelin tekrar seçilmesinde, Test Verisi ise model performansı değerlendirmesinde kullanılmıştır. Aşağıda Şekil 1’de veri setinin bölünmesi ve modelle kullanım tercihleri yer almaktadır.

Test Verisi bütün veri setinden %20 olarak ayrıştırıldıktan sonra kalan veri setinin %30’u Doğrulama Verisi olarak, geriye kalan veriler de Eğitim Verisi olarak alınmıştır.



Şekil 2. FER2013 Veri Setinden Bir Kesit [15]

FER2013 Veri Seti, veri setini üreten araştırmacılardan talep edildikten sonra verilen bağlantı üzerinden indirilmiştir. Veri setinde “Mutlu” yerine “Eğlenme” sınıfı bulunduğu için sınıflandırma da bu durum dikkate alınarak yapılmıştır. Bunlar her bir model için aynı şekilde kullanılacağı için parametrik bir fonksiyona verilmek üzere değişkenlere alınmıştır. Modellerin ve model skorlarının kaydedilmesi için dosyalar oluşturulmuştur.

Modellerin parametreleri için ön tanımlı değerler aşağıdaki gibi belirlenmiştir;

- Öğrenme Oranı:  $1e^{-7}$
- Optimizer: ADAM
- Kriter: Cross Entropy Loss
- Erken Durdurma: 10
- Yığın Miktarı: 5-50

Model tanımları içerisinde belirtilen farklı değerler o modele özgü olarak çalıştırılmış, deneysel sonuçlar not edilmiştir.

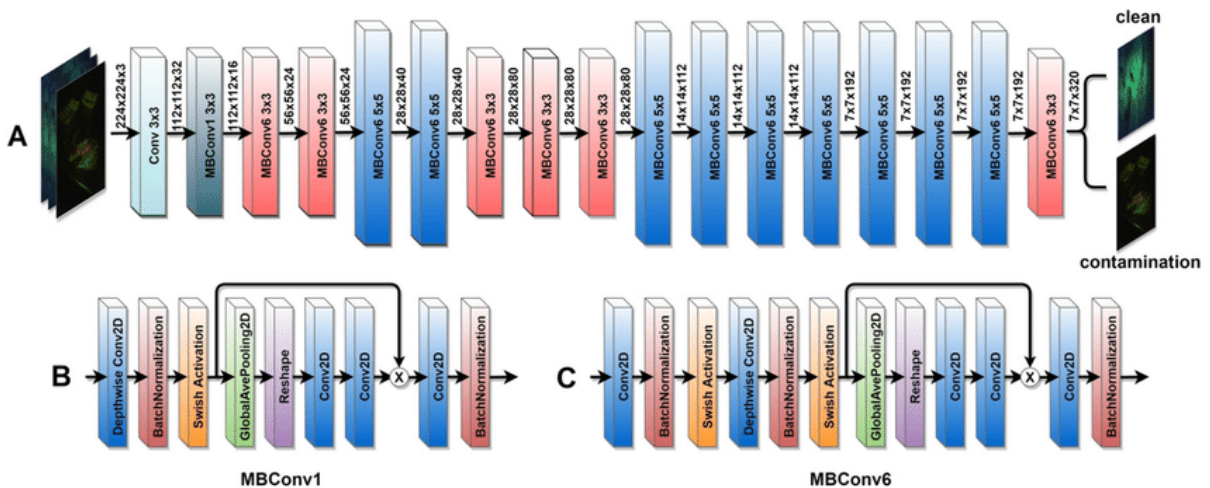
Bütün modeller için eğitim (*train*), doğrulama (*validation*) ve deneme (*test*) verileri için isabet (*accuracy*) grafiği ve kayıp fonksiyonu (*loss function*) çıktıların grafiği çizdirilmiştir.

### EfficientNet Modeli

EfficientNet modeli [23] yedi eğitim basamağı üzerinden tanımlanan yedi duygu durumunu sınıflandırmak üzere kullanılmıştır. EfficientNet B0, B1 ve B2 basamakları her basamak bir öncekinde üretilen ağırlıkları kullanacak şekilde ayarlanmıştır. Yığın miktarı, girdi boyutu ve veri dizinleri her adımda yeniden tanımlanmaktadır. Modelin yapısı Şekil 3’te verilmiştir. Buna göre üstteki yapı taşlarının izahı alt kısımda verilmiştir.

EfficientNet modelinin yapı taşı MBConv bloklarıdır. MBConv aslında MobileNetV2’nin temel yapı taşı olan Bottleneck Block’un kendisidir. MBConv’ların bir diğer benzeşim noktası ise ResNet’lerin tam tersi olmasıdır.

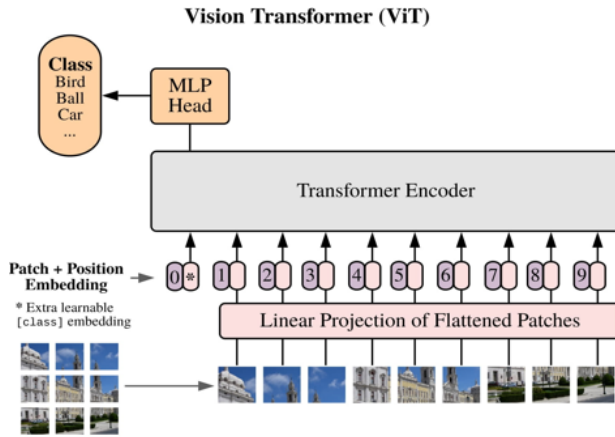
EfficientNet temelde 7 bloktan oluşur. En baştaki  $3 \times 3$ ’lük Evrimsel Blok yalnızca girdi resmini modele hazırlamak için kullanılır. MBConv’lar belirli bir metodolojiye göre sıralanmıştır. Birinci blokta bir adet  $3 \times 3$ ’lük MBConv, ikinci blokta iki adet  $3 \times 3$ ’lük MBConv, üçüncü blokta iki adet  $5 \times 5$ ’lik MBConv, dördüncü blokta üç adet  $3 \times 3$ ’lük MBConv, beşinci blokta üç adet  $5 \times 5$ ’lik MBConv, altıncı blokta dört adet  $5 \times 5$ ’lük MBConv ve yedinci blokta bir adet MBConv bloğu bulunmaktadır. MBConv yapı taşı ile EfficientNet modeli etkili bir evrimsel sinir ağı mimari çerçevesi sunmaktadır.



Şekil 3. Veri setinin bölünmesi ve EfficientNet modeli [23] ile kullanım tercihleri

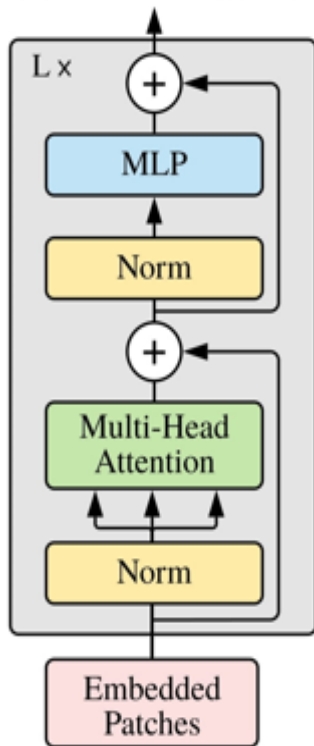
## Vision Transformer (ViT)

Hugging Face topluluğunun bünyesindeki ViT, Google'ın araştırma ve beyin takımı tarafından 2021'de [24], 2017'de Vaswani ve diğerleri [26] tarafından geliştirilen Transformers mimarisi üzerine temellenmiş, yeni bir görsel işleme modeli olarak ortaya konmuştur. Aşağıda Şekil 4'te ViT mimarisi yer almaktadır.



Şekil 4. Orijinal makaleden [24] alınan ViT mimarisi.

ViT model parametreleri üzerinde çalışılan platformun kapasiteleri ve veri setinin yapısı dikkate alınarak belirlenmiştir.



Şekil 5. ViT mimarisinde bulunan Transformer Encoder yapısı [24]

Şekil 5'te ViT mimarisinde bulunan Transformer Encoder yapısı yer almaktadır. Resim boyutları eğitim, doğrulama ve test verileri için PyTorch modülünün transforms metodu ile ayarlanmıştır.

Modelin inşasında ViTForImageClassification sınıfı (class) kullanılmış, büyük ölçüde ilk makale yazarlarının metoduna bağlı kalmıştır.

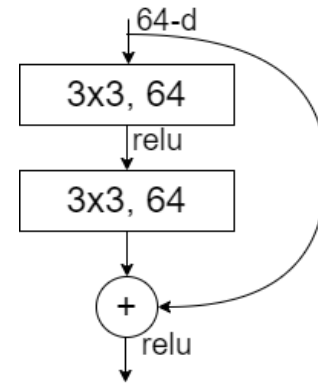
## ResNet 50 Modeli

ResNet 50 [27], 34 katmanlı ağdaki her 2 katmanlı bloğu 3 katmanlı darboğaz bloğuyla değiştirilerek elde edilir. Her artık fonksiyon  $F$  için 2 yerine 3 katmandan oluşan bir yığın kullanılır. Bu üç katman,  $1 \times 1$ ,  $3 \times 3$  ve  $1 \times 1$ 'lik boyutlara sahiptirler; burada  $1 \times 1$  katmanı boyutları azaltmaktan ve ardından artırmaktan (geri yüklemekten) sorumludur.  $3 \times 3$  katmanı ise daha küçük girdi/çıkış boyutlarına sahip bir darboğaz bırakır.

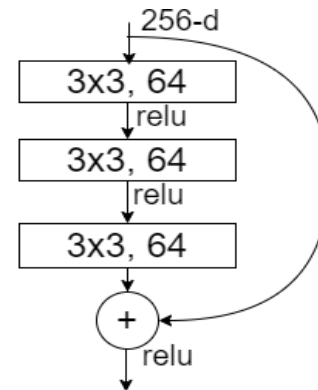
ResNet 50 için belirlenen model parametrelerinin  $([64,128,256,512],[3,4,6,3],4, True)$  açılımı şöyledir;

- Her ara blok için kanal adedini  $[64,128,256,512]$  kısmı göstermektedir.
- Her blok için darboğazları  $[3,4,6,3]$  kısmı göstermektedir.
- Genişleme faktörü 4 olarak verilmiştir. Yani 64, 256'ya, 128, 512'ye dönmektedir. Bütün ResNet katmanları aynı faktörü kullanmaktadır.
- "True" ifadesi ise darboğaz katmanının durumunu deklare eder.

ResNet 50'deki dar boğaz yapı taşını verebilmek amacıyla Şekil 6 ve Şekil 7 eklenmiştir.



Şekil 6. ResNet-34 için bir yapı taşı [27]



Şekil 7. ResNet-50/101/152 için bir "darboğaz" (bottleneck) yapı taşı [27]

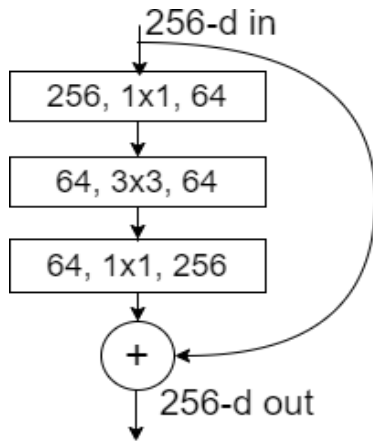
Tablo 3'te ResNet mimarileri yer almaktadır.

**Tablo 3.** ResNet dokümanından [27] ResNet mimarileri

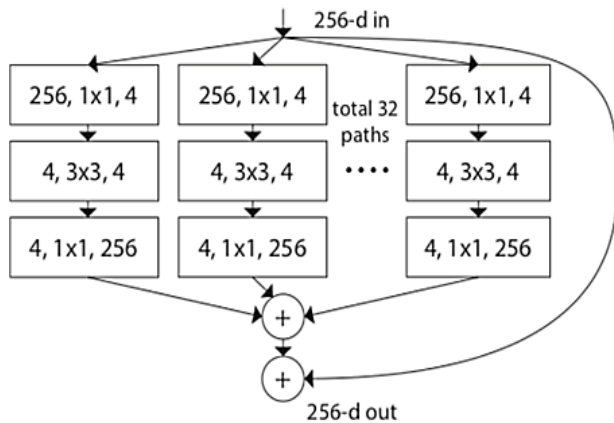
Katman Adı	Çıktı Ebatı	18-katman	34-katman	50-katman	101-katman	152-katman
Conv1	112x112			7x7, 64, stride 2 3x3 max pool, stride 2		
Conv2.x	56x56	$\begin{bmatrix} 3x3, 64 \\ 3x3, 64 \end{bmatrix} \times 2$	$\begin{bmatrix} 3x3, 64 \\ 3x3, 64 \end{bmatrix} \times 3$	$\begin{bmatrix} 1x1, 64 \\ 3x3, 64 \\ 1x1, 256 \end{bmatrix} \times 3$	$\begin{bmatrix} 1x1, 64 \\ 3x3, 64 \\ 1x1, 256 \end{bmatrix} \times 3$	$\begin{bmatrix} 1x1, 64 \\ 3x3, 64 \\ 1x1, 256 \end{bmatrix} \times 3$
Conv3.x	28x28	$\begin{bmatrix} 3x3, 128 \\ 3x3, 128 \end{bmatrix} \times 2$	$\begin{bmatrix} 3x3, 128 \\ 3x3, 128 \end{bmatrix} \times 4$	$\begin{bmatrix} 1x1, 64 \\ 3x3, 64 \\ 1x1, 256 \end{bmatrix} \times 4$	$\begin{bmatrix} 1x1, 64 \\ 3x3, 64 \\ 1x1, 256 \end{bmatrix} \times 4$	$\begin{bmatrix} 1x1, 64 \\ 3x3, 64 \\ 1x1, 256 \end{bmatrix} \times 8$
Conv4.x	14x14	$\begin{bmatrix} 3x3, 256 \\ 3x3, 256 \end{bmatrix} \times 2$	$\begin{bmatrix} 3x3, 256 \\ 3x3, 256 \end{bmatrix} \times 6$	$\begin{bmatrix} 1x1, 64 \\ 3x3, 64 \\ 1x1, 256 \end{bmatrix} \times 6$	$\begin{bmatrix} 1x1, 64 \\ 3x3, 64 \\ 1x1, 256 \end{bmatrix} \times 23$	$\begin{bmatrix} 1x1, 64 \\ 3x3, 64 \\ 1x1, 256 \end{bmatrix} \times 36$
Conv5.x	7x7	$\begin{bmatrix} 3x3, 512 \\ 3x3, 512 \end{bmatrix} \times 2$	$\begin{bmatrix} 3x3, 512 \\ 3x3, 512 \end{bmatrix} \times 3$	$\begin{bmatrix} 1x1, 64 \\ 3x3, 64 \\ 1x1, 256 \end{bmatrix} \times 3$	$\begin{bmatrix} 1x1, 64 \\ 3x3, 64 \\ 1x1, 256 \end{bmatrix} \times 3$	$\begin{bmatrix} 1x1, 64 \\ 3x3, 64 \\ 1x1, 256 \end{bmatrix} \times 3$
	1x1			Average pool, 1000-d fc, softmax		
FLOPs		$1,8 \times 10^9$	$3,6 \times 10^9$	$3,8 \times 10^9$	$7,6 \times 10^9$	$11,3 \times 10^9$

### Resnext 32x4d Modeli

Darboğaz bloğu (Şekil 9) içindeki 3x3 gruplu evrişimlerin yerine 3x3 evrişimleri koyan normal ResNet modelini temel alır [28].



**Şekil 8.** ResNet-34 için bir yapı taşı [28]



**Şekil 9.** Önem Derecesi (Cardinality) 32 olarak belirtilmiş ResNext bloğu [28]

ResNext 32x4d ifadesi ResNet üzerine Şekil 9'daki yapı gelmekte ve Önem Derecesi 32, darboğaz genişliği de 4 olarak belirlenmektedir.

### MODELLERİN UYGULANMASI ve BULGULAR

EfficientNet B0 – B2, Vision Transformer (ViT), ResNet 50, ResNext50\_32x4d modellerinin uygulaması anlatılmaktadır.

FERG için kullanılan veri adetlerinin ayrıntıları Tablo 4'te verilmiştir.

### EfficientNet B0 – B2

B0 için veri dizini, girdi boyutu ayarlanmış, yığın ebatı 32 olarak belirlenmiştir. Eğer daha önceden B0 modeli çalıştırılmışsa ağırlıkları hazır olarak tekrar eğitim yapılmıştır.

Model 50 çevrim için uygulanmıştır. Optimizer modeli Stokastik Dağılım Azaltımı (Stochastic Gradient Descent – SGD) olarak belirlenmiş, öğrenme oranı  $10^{-3}$  ve momentum değeri  $9 \cdot 10^{-1}$  olarak alınmıştır. Metrik kriteri ise Cross Entropy Loss seçilmiştir.

Veri seti eğitim, doğrulama ve test olarak alt gruplara ayrılmış ve eğitim ve doğrulama verileriyle modelin eğitilme işlemleri yapılmıştır. Modelde kullanılan "device" parametresi ile var ise GPU kullanımı direktifi verilmiştir.

B0 – B2 arası modeller birbirlerine eğitilmiş parametre vererek çalıştırılmıştır. Çalıştırılmadan önce gc.collect() metodu çalıştırılarak sonraki modellerde kullanılmayacak olan parametreler temizlenmiştir (Garbage Collector – GC). PyTorch kütüphanesindeki GPU çalıştırmak için kullanılan CUDA kütüphanesinden de empty\_cache metodu çalıştırılarak kullanılmayacak CUDA parametreleri temizlenmiştir. En son test fazına geçilmiştir.

**Tablo 4.** FERG Veri Seti Eğitim, Doğrulama ve Test verileri adetleri.

Verilerin kullanım yerleri	Kızgın	İğrenme	Korku	Eğlenme	Nötr	Üzgün	Şaşırmiş
TEST	1867	1710	1462	1486	1350	1542	1737
EĞİTİM	5826	5553	4797	4608	4470	4849	5586
DOĞRULAMA	1476	1308	1160	1236	1119	1236	1388

Test fazında eğitim aşamasında kaydedilen modeller B0'dan başlanarak tekrar yüklenerek işlem yapılmıştır. 32'li yığınlar tahminler ve etiketler kullanılarak İsbet, Hassasiyet, Özgüllük ve F1-Skoru metrikleri hesaplanmıştır.

### Vision Transform (ViT)

ViT önceden 16-224 ebatlarıyla ve önceden eğitilmiş olarak doğrudan alınmıştır. Ayrıca sınıflandırıcı olarak Linear ve Dropout katmanı 10-1 parametresiyle seçilmiştir. Optimizasyon fonksiyonu ADAM'dır. Kayıp fonksiyonu ise Cross Entropy Loss olarak seçilmiştir. Model uygulanırken varsa CUDA yoksa CPU kullanacak şekilde sistem kontrol edilmiştir.

Torch ile yapılan bu çalışma bir parçalı öğrenme metodudur. Eğitim, Doğrulama ve Test verileri 32 olarak belirlenen yığın parçalarına bölünüp bir döngüye sokularak öğrenme işlemi gerçekleştirilmiş, eğitim kaybı, doğrulama ve test isabet oranları her yığınla birlikte takip edilmiştir.

Parametrelerin belirlenmesinde platform kısıtları ve veri seti gereklilikleri gözetildiği belirtilmiştir. Buna göre;

- Çevrim adedi 50,

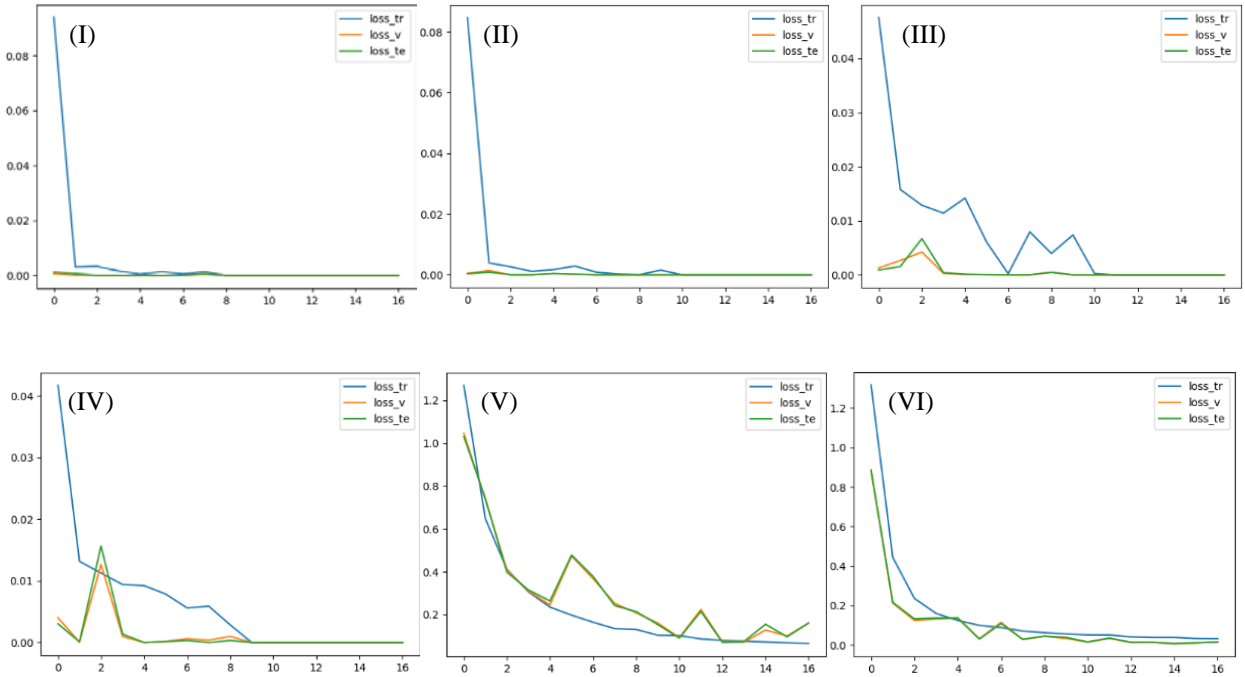
- Yığın boyutu 21,
  - Öğrenme oranı (LR)  $2.e^{-5}$ ,
  - Metriklerin bozulmaya başladığında öğrenmenin durdurulabileceği ilk çevrim 10,
  - Resim boyutu 48x48,
- parametreleriyle çalışılmıştır.

### ResNet 50 ve ResNext50\_32x4d Modelleri

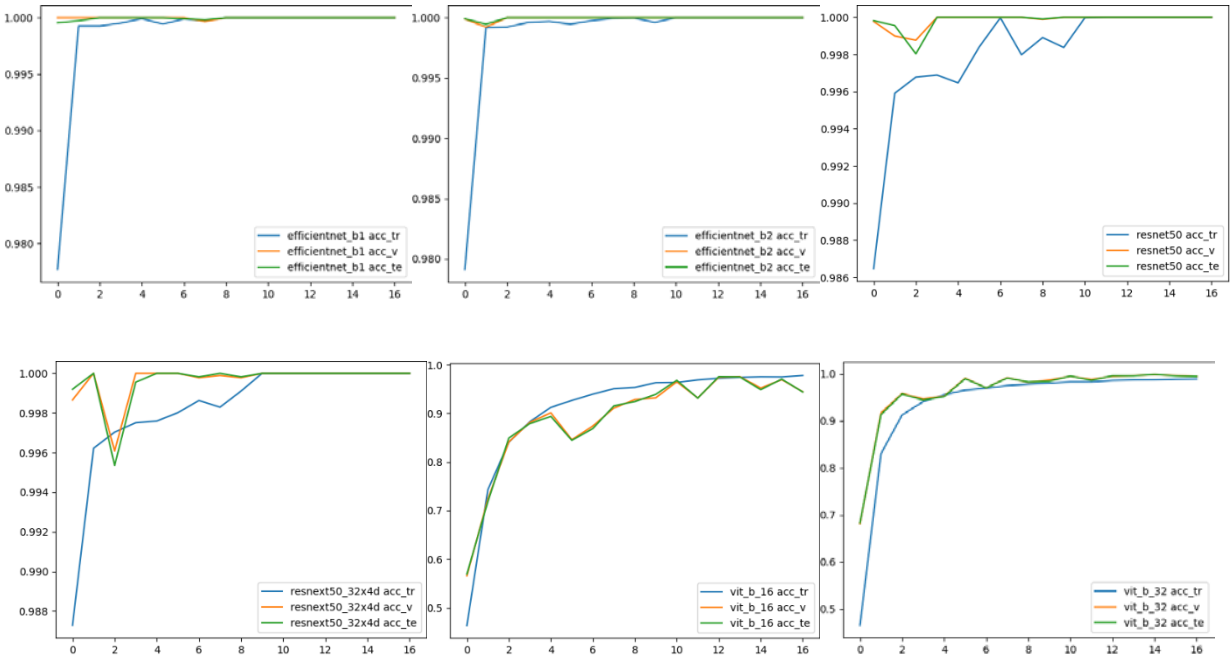
Çevrim adedi 50, yığın boyutu 70 olarak seçilmiştir. Platform performans kısıtları da göz önünde bulundurulmuştur. Metriklerin bozulmaya başladığında öğrenmenin durdurulabileceği ilk çevrim 5 olarak belirlenmiştir.

Döngüsel öğrenme metoduyla her yığının eşit sayıda eğitim, doğrulama, test verisi aynı anda modelde denenmiş, bütün metrikler anlık olarak alınmış ve çevrim zamanı not edilmiştir.

Pretrain\_utils kütüphanesinden loaderdef, modeldef, showimages, evaluate, megatrain, printaccm, get\_predictions, plot\_confusion\_matrix metodları kullanılmıştır. Eğitimler Megatrain metodu ile, metrik hesaplamaları evaluate, printaccm ve plot\_confusion\_matrix ile yapılmıştır.



**Şekil 10.** Loss fonksiyonu grafikleri: I) Efficient Net B1, II) Efficient Net B2, III) ResNet 50, IV) ResNext 50 32x4d, V) Vit\_b\_16, VI) Vit\_b\_32



Şekil 11. İsalet oranları eğitim, doğrulama ve test grafikleri: Efficient Net B1, Efficient Net B2, ResNet 50, ResNext 50 32x4d, Vit\_b\_16, Vit\_b\_32

Tablo 5. Çalıştırılan modellerin sonuçları

Model	Çevrim Süresi (Saniye)	Çevrim Adedi	Performans		
			Eğitim	Doğrulama	Test
ResNet50	318,27680	27	99,20%	100,00%	100,00%
ResNext50_32x4d	480,9140	31	99,71%	100,00%	100,00%
ViT_b_16	1522,0624	49	98,75%	99,74%	99,67%
ViT_b_32	500,11860	37	91,59%	96,57%	96,84%
EfficientNet B0	287,02220	27	99,85%	100,00%	100,00%
EfficientNet B1	369,86960	26	97,62%	100,00%	100,00%
EfficientNet B2	360,95280	27	99,85%	100,00%	100,00%

Tablo 6. Önerilen modellerin literatür ile karşılaştırılması

Çalışma	Yılı	Modeller	Ferg Performansı
Soman vd. [16]	2022	CNN, VGG16 + ResNet 50	%99.6
Khan vd. [17]	2023	DCNN, SVM	%98.5
Muthamilselvan vd. [18]	2022	CNN Temelli OFELBW Metodu	%99.42
Kalsum ve Mehmood [19]	2023	DCNN	%99.98
Kola ve Samayantula [20]	2021	LGC-HD	%97.9
Wasi vd. [21]	2023	MLP	%98.18
Albraikan vd. [22]	2022	RCNN, DenseNet121, IFER-DTFL	%99.86
<b>Önerilen Model - 1</b>	<b>2024</b>	ViT_b_16	%99.67
<b>Önerilen Model - 2</b>	<b>2024</b>	ResNet ve EfficientNet	%100



## TARTIŞMA ve SONUÇ

Geniş kullanım alanı olan görüntüden, sestem veya yazıdan duygu tanıma konsepti çok canlıdır ve sürekli gelişmektedir. Mevcut çalışmada bilinen bir veri seti üzerinde başka alanlarda başarısını ispatlamış pek çok sinir ağı modeli hiperparametrelere dikkat edilerek imkânlar ölçüsünde uygulanmıştır. Elde edilen sonuçların ileride yapılacak olan çalışmalara motivasyon olması ve desteklemesi beklenmektedir. Yukarıda Tablo 5'te çalıştırılan modellerin sonuçları, Tablo 6'da ise önerilen modellerin literatür karşılaştırılması verilmiştir.

Çalıştırılan ResNet50 ve ResNext50\_32x4d modelinde %100 başarımlar, ViT\_b\_16 modelinde %99.67 ve ViT\_b\_32 modelinde ise %96,84 başarımlar elde edilmiştir. Somon ve ark. 2022 yılında yaptıkları çalışmada %99,6 sonucuna ulaşmışlardır [16]. Literatürde duygu tanıma ile ilgili farklı modellerle yapılan diğer çalışmalarda ise başarımlar %97,9 ile %99,98 arasında değişmektedir [17-22].

Şekil 10'da çalıştırılan modellerin her çevriminde kayıp fonksiyonundan elde edilen çıktıları verilmiştir. Lejantta verilen *loss\_tr* çizgisi eğitim verisinden gelen kaybı, *loss\_v* çizgisi doğrulama verisinden gelen kaybı, *loss\_te* çizgisi test verisinden gelen kaybı göstermektedir.

Şekil 11'de çalıştırılan modellerin her çevriminde elde edilen isabet oranları verilmiştir. Lejantta model isminden sonra verilen *acc\_tr* çizgisi eğitim verisinde elde edilen isabeti, *acc\_v* çizgisi doğrulama verisinde elde edilen isabeti, *acc\_te* çizgisi test verisinde elde edilen isabeti göstermektedir.

Çalıştırılan modellerin başarımlar oranları yönüyle literatürdeki diğer çalışmalarla kıyası yapılmış, modellerin çevrim adedi, hiper parametreleri ve geçen süreler kıyas yapılabilmesi amacıyla tablolaştırılarak verilmiştir. Başarımlar oranından kayıp vermeden modellerin nasıl optimize edildiğine dair ayrıntılar çalışmanın ortaya koyduğu sonuçlardan en önemlisidir. FERG Veri Seti, EfficientNet (B0 – B2), ViT Hugging, ResNet 50 ve ResNext\_32x4d modelde derin öğrenme algoritmalarına tabi tutulmuş ve sonuçları not edilmiştir. Elde edilen bulgulara göre veri setindeki verilerin arttırılması veya görsellerin sadeleştirilmesi gerektiği yorumu yapılmıştır. Çalışma buradan itibaren aynı modellerle fakat veri setinde veri zenginleştirilmesi veya veri setinin değiştirilerek tekrar denemesi yolu ile devam ettirilmiştir.

Makine öğrenimi ve yapay zekâ alanının gelişmesi ile yeni yüz tanıma teknolojileri ortaya çıkmıştır [4,13,29]. Derin öğrenmenin ilerlemesi şüphesiz insanların yaşamlarını iyileştirecek ve işleri kolaylaştıracaktır. İnsan-bilgisayar etkileşiminde, en önemli durumlardan biri yüz duygu tanımadır. Günümüzde yüz duygu tanıma, Google ve Facebook gibi büyük şirketlerin de dikkatini çekiyor. Bu yüzden yüz duygu tanıma gibi alanlar parlak bir geleceğe sahiptir. Derin öğrenme alanının daha da çok ilerlemesi birçok alanda (akıl hastası bir kişinin ruh halini belirleme vb. araştırma-inceleme alanları) üretkenliği arttırmaya ve ürün kalitesini

geliştirmeye de yardımcı olacağı görülmektedir. Bu bol örnekli karşılaştırmalı çalışmanın gelecekte yapılacak diğer çalışmalar için ışık tutacağı ön görülmektedir.

Aynı modellerin veri zenginleştirme ve veri setinin değiştirilmesiyle başarımlar oranlarının değişmesi bu problemin ön işlem fazının iyileştirilmesi ve daha dengeli bir veri setiyle daha yüksek başarımlar oranıyla çözülebileceğine işaret etmektedir.

## Etik Hususlar

## Etik kurallara uyum

Yazarlar, çalışmalarının etik kurallara uygun olduğunu beyan ederler.

## Finansman

Yazarlar, fon kuruluşlarından özel bir hibe almamıştır.

## Çıkar çatışması

Makalemiz ile ilgili herhangi bir kurum, kuruluş, kişi ile mali çıkar çatışması yoktur ve yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

## KAYNAKÇA

- [1] Liu, M., Raj, A. N. J., Rajangam, V., Ma, K., Zhuang, Z., Zhuang, S. 2024. Multiscale-multichannel feature extraction and classification through one-dimensional convolutional neural network for Speech emotion recognition. *Speech Communication*, 156, 103010.
- [2] Gong, W., Qian, Y., Zhou, W., Leng, H. 2024. Enhanced spatial-temporal learning network for dynamic facial expression recognition. *Biomedical Signal Processing and Control*, 88, 105316.
- [3] Canal, F. Z., Müller, T. R., Matias, J. C., Scotton, G. G., de Sa Junior, A. R., Pozzebon, E., Sobieranski, A. C. 2022. A survey on facial emotion recognition techniques: A state-of-the-art literature review. *Information Sciences*, 582, 593-617.
- [4] Cheng, J., Deng, Y., Meng, H., Wang, Z. 2013. A facial expression based continuous emotional state monitoring system with gpu acceleration, in. 10th IEEE International Conference And Workshops On Automatic Face And Gesture Recognition (FG), IEEE, 22-26 Nisan, Shanghai, China, 1-6.
- [5] Lucey, P., Cohn, J.F., Kanade, T., Saragih, J., Ambadar, Z., Matthews, I. 2010. The extended cohn-kanade dataset (ck+): A complete dataset for action unit and emotion-specified expression, in. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition-Workshops, IEEE, 13-18 Haziran, San Francisco, USA, 94-101.

- [6] Akgül, İ., Kaya, V., Baran, A. 2021. Examination of facial mask detection using deep learning methods against coronavirus. 4. Uluslararası İpek Yolu Akademik Çalışmalar Sempozyumu, 17-18 Aralık, Nevşehir, Türkiye, 149-154.
- [7] Hasimah, A., Hariharan, M., Yaacob, S., Adom, A.H. 2015. Facial emotion recognition using empirical mode decomposition, *Expert Systems with Applications*, 42, 1261–1277.
- [8] Hossain, S., Umer, S., Asari, V., Rout, R. K. 2021. A unified framework of deep learning-based facial expression recognition system for diversified applications. *Applied Sciences*, 11(19), 9174.
- [9] Mehendale, N. 2020. Facial emotion recognition using convolutional neural networks (FERC). *SN Applied Sciences*, 2(3), 446.
- [10] Fakhar, S., Baber, J., Bazai, S. U., Marjan, S., Jasinski, M., Jasinska, E., ... Hussain, S. (2022). Smart classroom monitoring using novel real-time facial expression recognition system. *Applied Sciences*, 12(23), 12134.
- [11] Khattak, A., Asghar, M. Z., Ali, M., Batool, U. 2022. An efficient deep learning technique for facial emotion recognition. *Multimedia Tools and Applications*, 81(2), 1649-1683.
- [12] Qazi, A. S., Farooq, M. S., Rustam, F., Villar, M. G., Rodríguez, C. L., Ashraf, I. 2022. Emotion Detection Using Facial Expression Involving Occlusions and Tilt. *Applied Sciences*, 12(22), 11797.
- [13] Mukhiddinov, M., Djuraev, O., Akhmedov, F., Mukhamadiyev, A., Cho, J. 2023. Masked face emotion recognition based on facial landmarks and deep learning approaches for visually impaired people. *Sensors*, 23(3), 1080.
- [14] Chaudhari, A., Bhatt, C., Krishna, A., Travieso-González, C. M. 2023. Facial emotion recognition with inter-modality-attention-transformer-based self-supervised learning. *Electronics*, 12(2), 288.
- [15] Aneja, D., Colburn, A., Faigin, G., Shapiro, L., Mones, B. 2016. Modeling stylized character expressions via deep learning. In *Computer Vision—ACCV 2016: 13th Asian Conference on Computer Vision*, 20-24 Kasım, Taipei, Taiwan, 136-153.
- [16] Soman, G., Vivek, M. V., Judy, M. V., Papageorgiou, E., Gerogiannis, V. C. 2022. Precision-based weighted blending distributed ensemble model for emotion classification. *Algorithms*, 15(2), 55.
- [17] Khan, N., Singh, A. V., Agrawal, R. 2023. Enhancing feature extraction technique through spatial deep learning model for facial emotion detection. *Annals of Emerging Technologies in Computing (AETiC)*, 7(2), 9-22.
- [18] Muthamilselvan, T., Brindha, K., Senthilkumar, S., Saransh, Chatterjee, J. M., Hu, Y. C. 2023. Optimized face-emotion learning using convolutional neural network and binary whale optimization. *Multimedia Tools and Applications*, 82(13), 19945-19968.
- [19] Kalsum, T., Mehmood, Z. 2023. A novel lightweight deep convolutional neural network model for human emotions recognition in diverse environments. *Journal of Sensors*.
- [20] Kola, D. G. R., Samayamantula, S. K. 2021. Facial expression recognition using singular values and wavelet-based LGC-HD operator. *IET Biometrics*, 10(2), 207-218.
- [21] Wasi, A. T., Šerbetar, K., Islam, R., Rafi, T. H., Chae, D. K. 2023. ARBEx: Attentive feature extraction with reliability balancing for robust facial expression learning. *Arxiv Preprint Arxiv*, 2305.01486.
- [22] Albraikan, A. A., Alzahrani, J. S., Alshahrani, R., Yafoz, A., Alsini, R., Hilal, A. M., ... Gupta, D. 2022. Intelligent facial expression recognition and classification using optimal deep transfer learning model. *Image and Vision Computing*, 128, 104583.
- [23] Tan, M., Le, Q. 2019, May. Efficientnet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks. In *International conference on machine learning* (pp. 6105-6114). PMLR.
- [24] Dosovitskiy, A., Beyer, L., Kolesnikov, A., Weissenborn, D., Zhai, X., Unterthiner, T., ... Houlsby, N. 2020. An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale. *arXiv preprint arXiv:2010.11929*.
- [25] Wolf, T., Debut, L., Sanh, V., Chaumond, J., Delangue, C., Moi, A., ... Rush, A. M. 2019. Huggingface's transformers: State-of-the-art natural language processing. *arXiv preprint arXiv:1910.03771*.
- [26] Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., ... Polosukhin, I. 2017. Attention is all you need. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30.
- [27] He, K., Zhang, X., Ren, S., Sun, J. 2016. Deep residual learning for image recognition. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 770-778).
- [28] Xie, S., Girshick, R., Dollár, P., Tu, Z., He, K. 2017. Aggregated residual transformations for deep neural networks. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 1492-1500).
- [29] Utku, A., Akcayol, M. A. 2024. Neural network based a comparative analysis for customer churn prediction. *Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(1), 137-148.



## Kolankaya (Eşme/Uşak) Andezitik Bazaltlarının Konvansiyonel Demiryolu Hatlarında Demiryolu Balastı Olarak Kullanılabilirliği

Mehmet KOZAK<sup>1</sup>

<sup>1</sup> TCDD 7. Bölge Demiryolu Bakım Servis Müdürlüğü, Afyonkarahisar, Türkiye

✉: [mehmetkozak@tcdd.gov.tr](mailto:mehmetkozak@tcdd.gov.tr)  0000-0001-5306-3089

Geliş (Received): 19.07.2024

Düzeltilme (Revision): 11.10.2024

Kabul (Accepted): 22.10.2024

### ÖZ

Bu çalışma ile Kolankaya (Eşme/Uşak) andezitik bazaltlarının konvansiyonel demiryolu hatlarında demiryolu balastı olarak kullanılabilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında; söz konusu andezitik bazalt ocağında gözlem yapılarak deneylerde kullanılmak üzere kayaç numuneleri alınmıştır. Alınan kayaç numuneleri üzerinde kayacın fiziksel özelliklerin tespiti için Balast Teknik Şartnamesinde istenilen Los Angeles, tane yoğunluğu, su emme oranı, dona dayanıklılık, Mikro-Deval deneyleri yapılmıştır. Kayacın isim ve köken tespiti için petrografik analiz yapılmış ve polarizan mikroskop incelemesi sonucunda kayacın; magmatik kökenli yüzey kayacı olduğu ve Kayaçların Modal Minerolojik Sınıflamasına göre kayaç andezitik bazalt olarak tanımlanmıştır. Los Angeles aşınma direnci % 12, tane yoğunluğu 2,59 Mg/m<sup>3</sup>, dona dayanıklılık değeri % 1, aşınmaya karşı direnç (Mikro-Deval) % 8, su emme oranı ise % 1,2 olduğu belirlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar Kolankaya (Eşme/Uşak) andezitik bazaltlarının konvansiyonel demiryolu hatlarında demiryolu balastı olarak kullanılabilirliğini göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Andezitik Bazalt, Balast, Demiryolu Balastı, Dona Dayanıklılık, Kolankaya Eşme

## Usability Of Kolankaya (Eşme/Uşak) Andesitic Basalts As Railway Ballast On Conventional Railway Lines

### ABSTRACT

This study aimed to investigate the usability of Kolankaya (Eşme/Uşak) andesitic basalts as railway ballast on conventional railway lines. Scope of work; Observations were made in the andesitic basalt quarry in question and rock samples were taken to be used in the experiments. Los Angeles, grain density, water absorption rate, frost resistance and Micro-Deval tests required in the Ballast Technical Specification were carried out on the rock samples taken to determine the physical properties of the rock. Petrographic analysis was performed to determine the name and origin of the rock, and as a result of polarizing microscope examination, the rock was; It is a surface rock of magmatic origin and according to the Modal Mineralogical Classification of Rocks, the rock is defined as andesitic basalt. Los Angeles abrasion resistance was determined as 12%, grain density as 2.59 Mg/m<sup>3</sup>, frost resistance value as 1%, abrasion resistance (Micro-Deval) as 8% and water absorption rate as 1.2%. Experimental studies have shown that Kolankaya (Eşme/Uşak) andesitic basalts can be used as railway ballast in conventional railway lines.

**Keywords:** Andesitic Basalt, Ballast, Railway Ballast, Frost Resistance, Kolankaya Eşme

### GİRİŞ

Hat olarak isimlendirilen özel bir yol üzerinde, mekanik olarak hareket eden araçlarla çekilen yolcu ve yük taşıma sistemine demiryolu denir [1]. Demiryolu üstyapı ve altyapı olarak iki ana kısımdan oluşmaktadır [2].

Demiryolu araçlarının istenilen hızlarda emniyetli ve konforlu şekilde hareket edebilmesine olanak sağlamak için belirli kriterler dikkate alınarak inşa edilmiş, demiryolu araçlarının yol ile temasının gerçekleştiği yol bölümüne üstyapı denilir. Üstyapı; ray, travers, bağlantı malzemeleri ile balasttan oluşmaktadır [3].

Demiryolu balastı; platformun üzerine döşenen, traverslerin aralarını doldurarak ve traversler tarafından

üzerine iletilen tüm etkileri kalıcı çökmeye uğramadan ve taneleri arasındaki sürtünme ile yayarak platforma ileten, ayrıca traverse elastik bir yatak oluşturan demiryolu üst yapı elemanıdır. 63 mm açıklıklı kare gözlü elekten % 100 geçen, 22,4 mm açıklıklı kare gözlü elek üzerinde en az % 97'si kalan ve TCDD Balast Teknik Şartnamesinde istenilmekte olan gradasyonu sağlayacak şekilde kırılmış olan keskin kenarlı ve köşeli, sağlam ve sert kayaçlardan üretilmektedirler [4-7].

Bazalt, gabro, diyabaz, granit, granodiyorit, diyorit, riyolit, siyenit, porfir, gnays, andezit, silttaş, kuvarsit, kumtaş, kireçtaş (kalker) ve dolomit gibi kayaçlar demiryollarında demiryolu balastı olarak kullanılmaktadır [7-12].

Demiryolu üstyapı elemanı olan balastın görevleri maddeler halinde aşağıda belirtilmiştir;

- Yolu zeminini yüksek gerilmelerden koruyabilmek için traverslerden gelen yükleri daha geniş bir alana homojen bir şekilde yayarak, yolu kalıcı oturmalarına karşı korumak ve kalıcı oturmaları sınırlandırmak,
- Yolu istenen ekseninde tutabilmek için traverslere uygulanan yanıl, düşey ve boyuna kuvvetlere karşı koymak,
- Yolu hat işleme ve yüzey bakımına olanak sağlamak,
- Demiryolu araçlarından gelen boyuna, yatay ve düşey kuvvetlere karşı traverslerin hareketlerini sınırlandırarak traversleri yerinde tutarak traverslere yataklık etmek,
- Yola gelen yağmur ve kar sularını sürerek dışarı atmak ve yolu ottan korumak,
- Dinamik yüklerin tesirini azaltmak için gerekli olan esnekliği yola vererek platforma elastik bir yatak oluşturmak,
- Demir ve ahşap traverslerin toprakla olan ilişkisini keserek çürümelerini engellemek,
- Kar ve yağmur sularının drenajını sağlayarak platformu donma çözülme etkisinden kurtarmak,
- Demiryolunda meydana gelecek gürültüyü azaltmak,
- Platformu buzlanmaya karşı korumak,
- Meydana gelecek gerilmeleri, altındaki malzemeler için kabul edilebilir seviyelere düşürmek [3, 11, 13-16].

Balast için uygun olan malzeme ocaklarının seçimi ve demiryolu balast olarak kullanılacak kayaların istenilen fiziksel özelliklerde olup olmadığının araştırılması demiryolu projeleri için büyük önem arz etmektedir. Bu çalışma ile Kolankaya (Eşme/Uşak) andezitik bazaltlarının konvansiyonel demiryolu hatlarında demiryolu balastı olarak kullanılabilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır.

## MATERYAL ve YÖNTEM

Çalışma alanı Uşak ili, Eşme ilçesi, Kolankaya Köyü sınırları içerisinde bulunmaktadır. Uşak iline 50 km ve Eşme ilçesine 8 km, Ahmetler köyüne ise 2,7 km uzaklıkta yer almakta olup ulaşım Uşak-Eşme karayolu ile sağlanmaktadır. Şekil 1'de Kolankaya (Eşme/Uşak) andezitik bazalt ocağının yer buldur haritası verilmiştir. Bazalt ocağında yapılan saha çalışmalarında (Şekil 2); ocağın homojen bir yapı sergilediği ve malzeme üretimine uygun olduğu gözlenmiştir. Ocaktaki bazalt oluşumları, orta açık gri renklidir. Malzemenin çok fazla süreksizlik içermesinden dolayı sahadan blok halinde bazalt alımı mümkün değildir. Bu sebeple sahada var olanı bazaltı kırmataş üretimi için kullanmak daha avantajlıdır

Balast olarak kullanılacak kayacın petrografik özellikleri açısından ismi ve kökenin belirlenmesi için petrografik analiz yapılmıştır. Balastın TCDD Balast Teknik Şartnamesinde istenilen geometrik özellikleri ise, balastın üretiminde kullanılacak olan üretim prosedürleri sayesinde sağlanabilecektir.

Malzeme ocağından alınan kayaç örnekleri çeneli kırıcı yardımı ile balast boyutuna getirilmiştir. Balast Teknik

Şartnamesine göre balastın fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için; su emme oranı, Los Angeles parçalanma direnci, Mikro-Deval aşınma dayanımı, tane yoğunluğu, dona dayanıklılık deneylerinin yapılması zorunludur. Kayacın fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için yapılan deneylerde kullanılan standartlar Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Kolankaya (Eşme/Uşak) andezitik bazalt ocağının yer buldur haritası



Şekil 2. Kolankaya (Eşme/Uşak) andezitik bazalt ocağı (bakış yönü kuzeydoğu)

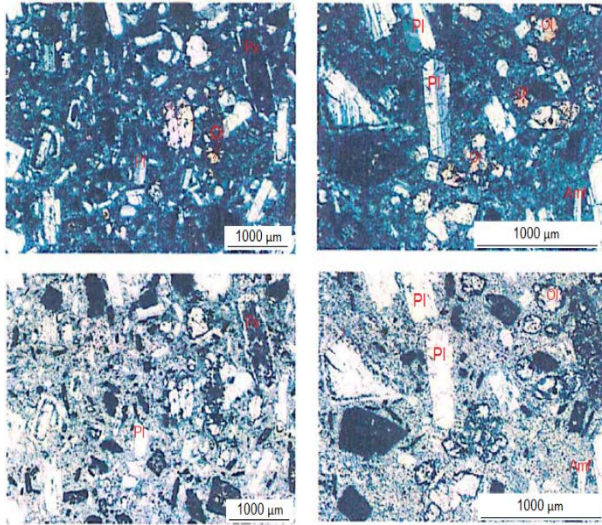


**Tablo 1:** Kayacın fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için yapılan deneylerde kullanılan standartlar [7, 13].

Deney	Standart	Numune Tane Boyutu
Parçalanma direnci tayini	TS EN 1097-2 [17]	31,5-50 mm
Su emme oranı	TS EN 1097-6 [18]	40-63 mm
Tane yoğunluğu	TS EN 1097-6 [18]	40-63 mm
Termal ve bozunma özelliği için MgSO <sub>4</sub> deneyi	TS EN 1367-2 [19]	31,5-50 mm
Aşınmaya karşı direncin tayini	TS EN 1097-1 [20]	31,5-50 mm

### BULGULAR ve TARTIŞMA

Polarizan mikroskop ile mineralojik ve petrografik özelliklerin incelenmesinde; yarı kristalli porfirik dokuya sahip kayacın, piroksen (% 15), plajiyoklaz (% 25), amfibol (% 10), olivin (% 5), mikrolit ve volkan camından (% 45), opak ve tali mineraller (% 1'den az) oluşan magmatik kökenli yüzey kayacı olduğu tespit edilmiştir. Kayaçların Modal Mineralojik Sınıflamasına göre kayacın andezitik bazalt olarak tanımlanmıştır.



**Şekil 3.** Kolankaya (Eşme/Uşak) andezitik bazaltına ait örneklerin ince kesit polarizan mikroskop görüntüleri (Pl: Plajiyoklaz, Px: Piroksen, Amf: Amfibol, Ol: Olivin)

Los Angeles (parçalanma direnci tayini) aşınma deneyi, demiryolu balastlarının parçalanmaya karşı direncini tespit etmek için etkili olan deneylerden birisidir. Demiryolu balastının servis ömrü boyunca demiryolu araçlarının yüklerinden nasıl etkilendiğini belirlemek için yapılan pratik ve etkili bir deneydir [21]. Çalışmada kullanılan Kolankaya (Eşme/Uşak) andezitik bazaltın parçalanma direnci (Los Angeles) % 12 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuca göre; andezitik bazalt numunesinin konvansiyonel ( $\leq$  %20) demiryolu hatları için uygun olduğu görülmüştür.

Demiryolu balastı olarak kullanılacak kayacın içerisindeki gözeneklerin varlığı, balastın mekanik ve fiziksel özelliklerini olumsuz yönde etkiler. Bu boşluk ve gözeneklerin çok küçük miktarda varlığı bile demiryolu balastın deformasyonu üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [22]. Demiryolu balastında bulunan boşluk ya da gözeneklerde biriken suyun donması-çözülmesi ile kayacın mekanik özellikleri azalır ve bu olay aynı zamanda malzemede yeni çatlaklara ve ayrışmalara neden olur [23]. Bu sebeple balast olarak kullanılacak kayacın seçiminde, kayacın su emme oranı çok etkilidir. Çalışmada kullanılan Kolankaya (Eşme/Uşak) andezitik bazaltın su emme oranı % 1,2 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuca göre; andezitik bazalt numunesinin konvansiyonel ( $\leq$  %2) demiryolu hatları için uygun olduğu görülmüştür.

Demiryolu balastının tane yoğunluğu, balastın fiziksel özellikleri ve dayanımı hakkında fikir vermektedir. Tane yoğunluğu yüksek olan balastlar, genellikle düşük poroziteli ve düşük su emme oranına sahip kayaçlardan elde edilmektedir [24]. Bu sebeple balast olarak kullanılacak kayacın seçiminde, kayacın tane yoğunluğu çok etkilidir. Çalışmada kullanılan Kolankaya (Eşme/Uşak) andezitik bazaltın tane yoğunluğu 2,59 Mg/m<sup>3</sup> olarak tespit edilmiştir. Bu sonuca göre; andezitik bazalt numunesinin konvansiyonel ( $\geq$  2,50 Mg/m<sup>3</sup>) demiryolu hatları için uygun olduğu görülmüştür. Tane yoğunluğu bazalta göre düşük çıkmış olup ocakta geniş çaplı bir alanda ve bazı bölgelerde karot yardımı ile örnekler alınarak tane yoğunluğunun sonraki çalışmalarda araştırılması önerilebilir.

Isı farkları, demiryolu balastın stabilitesini olumsuz yönde etkilemekte ayrıca, fiziksel ayrışmalar neden olmaktadır. Atmosferik şartlara direk maruz kalan demiryolu balastları donma-çözünme etkisiyle mekanik olarak deformasyon meydana gelmektedir [25]. Bu nedenle demiryolu balastında don kaybının tespiti önemli bir parametredir. Çalışmada kullanılan Kolankaya (Eşme/Uşak) andezitik bazaltın termal ve bozunma özelliği için MgSO<sub>4</sub> deneyi (dona dayanıklılık) sonucu % 1'dir. Bu sonuca göre; andezitik bazalt numunesinin konvansiyonel ( $\leq$  %5) demiryolu hatları için uygun olduğu görülmüştür.

Mikro-Deval deneyi demiryolu balastının aşınmaya karşı direncini tespitinde yaygın olarak kullanılır [26]. Mikro-Deval deneyi, demiryolu balastının servis ömrü boyunca demiryolu araçlarının yüklerinden nasıl etkilendiğini belirlemek için yapılan pratik ve etkili bir deneydir. Çalışmada kullanılan Kolankaya (Eşme/Uşak) andezitik bazaltın aşınmaya karşı direnci (Mikro - Deval) % 8 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuca göre; andezitik bazalt numunesinin konvansiyonel ( $\leq$  %14) demiryolu hatları için uygun olduğu görülmüştür.

Kolankaya (Eşme/Uşak) andezitik bazaltlarının konvansiyonel demiryolu hatlarında demiryolu balastı olarak kullanılabilirliğinin tespiti için yapılan fiziksel deneylerden elde edilen sonuçlar ve konvansiyonel demiryolu hattı sınır değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Kolankaya (Eşme/Uşak) andezitik bazaltının deney sonuçları ve konvansiyonel demiryolu hattı sınır değerleri

Deney	Kolankaya (Eşme/Uşak) Andezitik Bazaltı Deney Sonuçları	Konvansiyonel Demiryolu Hattı Sınır Değerleri [13]
Parçalanma direnci tayini	%12	≤ %20
Su emme oranı	%1,2	≤ %2
Tane yoğunluğu	2,59 Mg/m <sup>3</sup>	≥ 2,50 Mg/m <sup>3</sup>
Termal ve bozunma özelliği için MgSO <sub>4</sub> deneyi	%1	≤ %5
Aşınmaya karşı direncin tayini	%8	≤ %14

## SONUÇ

Çalışma kapsamında; TCDD Balast Teknik Şartnamesinde istenilen sınır değerlere uygunluğu açısından Kolankaya (Eşme/Uşak) andezitik bazaltlarının; konvansiyonel demiryolu hatlarında demiryolu balastı olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışma kapsamında TCDD Balast Teknik Şartnamesinde istenilen; kayacın petrografik özellikleri açısından ismi ve kökenin belirlenmesi için petrografik analiz yapılmıştır. Aynı şartnameye göre balastın fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için ise; su emme oranı, parçalanma direnci (Los Angeles aşınma dayanımı), aşınmaya karşı direncin tayini (Mikro -Deval), tane yoğunluğu, termal ve bozunma özelliği için MgSO<sub>4</sub> deneyleri (Dona Dayanıklılık) yapılmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalar; konvansiyonel demiryolu hatlarında, Kolankaya (Eşme/Uşak) andezitik bazaltlarının demiryolu balastı olarak kullanılabilirliğini göstermiştir. Demiryolu balastı olarak kullanılacak kayaların türlerinin belirlenmesi için farklı kayalar üzerinde ve aynı kaya türü olsa da farklı agrega ocaklardan alınan kayalar ile yeni çalışmaların yapılmasının demiryolu balastı olarak kullanılabilirlik kayaların çeşitlenmesinde faydalı olacağı düşünülmektedir. Aynı zamanda balast olarak kullanılacak kayaların çeşitlenmesinin, nakliye mesafelerinin azalması ile balast fiyatlarına olumlu yönde yansıtacağı düşünülmektedir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmaya katkılarından dolayı TCDD 7. Bölge Müdürlüğü ile Öztaşlar İnşaat Taah. ve Petrol Ürünleri San. Tic. A. Ş. yetkililerine teşekkürlerimi sunarım.

## KAYNAKÇA

[1] Kozak M. Beton traversin gelişimi ve üretim aşamasının araştırılması. Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 6(2), 73-81, 2010.

[2] Kozak M. 2011. Demiryolunda rayların birleşim noktaları ve özelliklerinin araştırılması. Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 7(2), 40-49, 2011.

[3] Anonim. Yol mühendisleri kursu yol üstyapı ders notları. TCDD Eğitim ve Öğretim Dairesi Başkanlığı Yayınları, Ankara, 2016.

[4] Kozak M. Hemzemin geçitlerdeki kaplama çeşitleri ve güvenliğe etkisinin araştırılması. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 2(1), 1-11, 2012.

[5] Oğul K., Topal İ., Poşluk E. Ankara - İstanbul yüksek hızlı tren demiryolunda balast hammaddesi olarak granit ve bazaltın birlikte kullanılabilirliğinin araştırılması ve aşınma dayanımlarına etkisi. MT Bilimsel, 1, 81-89, 2012.

[6] Nålsund R. Railway ballast characteristics, selection criteria and performance. Doctoral Thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2014.

[7] Kozak M. Demiryolu balastının ve özelliklerinin araştırılması. Demiryolu Mühendisliği, 13, 86-96, 2021.

[8] Raymond G.P. Research on railroad ballast specification and evaluation. Transportation Research Record, 1006, 1-8, 1985.

[9] Okonta F.N., Magagula S.G. Railway foundation properties of some south african quarry stones. Electronic Journal of Geotechnical Engineering EJGE, 179-197, 2011.

[10] Yılmaz A. Demiryolu üstyapısında balast kirliliği. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 6(1), 11-17, 2015.

[11] Bayrak M.Ç. Altyapı özelliklerinin demiryolu üstyapısının performansına etkisi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 176s, Isparta, 2018.

[12] Bassey D., Ngene B., Akinwumi I., Akpan V., Bamigboye G. Ballast contamination mechanisms: a criterial review of characterisation and performance indicators. Infrastructures, 5(11), 94, 2020.

[13] Anonim. TCDD Balast teknik şartnamesi. TCDD Araştırma ve Geliştirme Dairesi Başkanlığı, Ankara, 2020.

[14] Yüzbaşı İ.B. Göksun ofiyoliti kabuksal kayaların demiryolu balast malzemesi olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi. T. C. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü., Yüksek Lisans Tezi, 83s, Kahramanmaraş, 2019.

[15] Kumru F.M. Demiryolunda balastsız (slab track) ve balastlı üstyapı uygulamalarının maliyet analizi. Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 78s, Karabük, 2019.

[16] Ağbaba B. Balastlı demiryolu ve balastsız demiryolunun ansys programı yardımıyla analizinin yapılması ve karşılaştırılması. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 118s, Ankara, 2019.

[17] TS EN 1097-2. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 2: parçalanma direncinin tayini için metotlar. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2020.

[18] TS EN 1097-6. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler-bölüm 6: tane yoğunluğunun ve su emme oranının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2013.

[19] TS EN 1367-2. Agregaların termal ve bozunma özellikleri için deneyler-bölüm 2: magnezyum sülfat deneyi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2011.

[20] TS EN 1097-1. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler-bölüm 1: aşınmaya karşı direncin tayini (Mikro- Deval). Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2011.

[21] Apaydın Ö.F., Yılmaz M. Bazaltik kayaların balast kirlenmesi yönünden karşılaştırılması. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8(1), 296-311, 2019.

[22] Teymen A. Bazı kayaların petrografik, fiziksel ve mekanik özellikleri arasındaki ilişkilerin incelenmesi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 134s, Adana, 2005.

- [23] Güleç K. Kayaçların fiziksel ve mekanik özelliklerinin su muhtevası ile değişimi. Bilimsel Madencilik Dergisi, 13(3), 13-16, 1974.
- [24] Kozak M. İncehisar (Afyonkarahisar) mermerlerinin jeolojik ve jeomekanik özelliklerinin araştırılması. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Lisans Tezi, 121s, Afyonkarahisar, 2016.
- [25] Işlak H. Evciler (Gölbaşı/Ankara) bazaltının petrografik ve petrokimyasal özelliklerinin demiryolu balast ve balastlı malzemesi olarak kullanılabilirliği üzerine etkisi. Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 97s, Konya, 2019.
- [26] Arsoy Z., Çiftçi H., Ersoy B., Uygunoğlu T., Arslan B. Afyonkarahisar bölgesi mermer parça atıklarının beton agregası olarak değerlendirilebilirliğinin araştırılması. El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi, 6(3), 503-516, 2019.

## Çelik Yüzeylerdeki Kusurların Tespiti için Topluluk Öğrenme Tabanlı Gelişmiş Segmentasyon Yöntemi

Emre GÜÇLÜ<sup>1</sup>, İlhan AYDIN<sup>2</sup>, Erhan AKIN<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>2</sup> Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

<sup>3</sup> Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

✉: [eguclu@firat.edu.tr](mailto:eguclu@firat.edu.tr) <sup>1</sup> 0000-0002-4566-7517 <sup>2</sup> 0000-0001-6880-4935 <sup>3</sup> 0000-0001-6476-9255

Geliş (Received): 23.05.2024

Düzeltilme (Revision): 10.07.2024

Kabul (Accepted): 02.08.2024

### ÖZ

Bu çalışmada, çelik yüzeylerdeki kusurların tespiti için topluluk öğrenme tabanlı bir gelişmiş segmentasyon yöntemi sunulmuştur. Günümüzde, çelik üretim süreçlerinde kalite kontrolün önemi artmakta ve kusur tespiti teknolojilerine olan ihtiyaç hızla büyümektedir. Bu bağlamda, çeşitli çelik yüzey kusurlarını doğru bir şekilde tespit edebilen ve bölütleme yapabilen güçlü bir modele ihtiyaç vardır. Önerilen sistem, derin öğrenme tabanlı çoklu model yaklaşımlarını topluluk öğrenme ile birleştirerek, segmentasyon doğruluğunu önemli ölçüde artırmaktadır. Kullanılan topluluk öğrenme stratejisi, farklı mimarilere sahip birden fazla derin öğrenme modelinin güçlü yönlerini bir araya getirerek, sistemimizin genel performansını iyileştirmekte ve çeşitli kusur türlerine karşı daha duyarlı hale getirmektedir. Bu yaklaşım, geniş bir veri seti üzerinde test edilmiş ve %77,98 mIoU oranı elde ederek mevcut tekil model tabanlı yöntemlere kıyasla önemli bir performans artışı göstermiştir. Sonuçlar, önerilen topluluk öğrenme tabanlı segmentasyon yönteminin, çelik yüzeylerdeki kusurların tespiti konusunda etkili bir çözüm sunduğunu ve endüstriyel kalite kontrol süreçlerinde potansiyel uygulamalara sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Çelik Yüzey Kusur Tespiti, Topluluk Öğrenme, Gelişmiş Segmentasyon Yöntemleri.

## Ensemble Learning Based Advanced Segmentation Method for Detecting Defects on Steel Surfaces

### ABSTRACT

In this study, an ensemble learning-based advanced segmentation method is presented for the detection of defects on steel surfaces. Nowadays, the importance of quality control in steel production processes is increasing and the need for defect detection technologies is growing rapidly. In this context, a powerful model that can accurately detect and segment various steel surface defects is needed. The proposed system significantly increases segmentation accuracy by combining deep learning-based multi-model approaches with ensemble learning. The ensemble learning strategy used combines the strengths of multiple deep learning models with different architectures, improving the overall performance of our system and making it more susceptible to various types of defects. This approach has been tested on a large dataset and achieved a mIoU rate of 77.98%, demonstrating a significant performance improvement over existing single model-based methods. The results reveal that the proposed ensemble learning-based segmentation method offers an effective solution for detecting defects on steel surfaces and has potential applications in industrial quality control processes.

**Keywords:** Steel Surface Defect Detection, Ensemble Learning, Advanced Segmentation Methods.

### GİRİŞ

Çelik sektörünün kritik bileşenlerinden biri olan çelik filmaşınlar, genelde ince ve esnek, şerit ya da bant formunda bir çelik türüdür. Bu filmaşınların kalınlığı, kullanım alanına ve amaca göre değişiklik gösterebilir. Esnek ve dayanıklı yapılarıyla çelik filmaşınlar, otomotivden inşaat ve yapı malzemelerine, endüstriyel uygulamalara kadar geniş bir yelpazede tercih edilir. Özellikle yüksek dayanıklılık gerektiren uygulamalarda popüler olan çelik filmaşın, sağlam ve uzun ömürlü bir

ürün olmasını zorunlu kılar. Bununla birlikte, üretim aşamasında meydana gelebilecek çeşitli kusurlar, bu malzemelerin performansını ve güvenilirliğini olumsuz etkileyebilir.

Sıcak haddelenmiş çelik şeritlerin üretiminde, mekanik gerilimler, yüksek sıcaklıklar ve hızlı üretim koşulları nedeniyle filmaşın yüzeylerinde kusurlar oluşabilir. Bu durum, ürünün dayanıklılığını ve kalitesini tehlikeye sokabilir. Bu sebeple, endüstride çelik filmaşın yüzey kusurlarının tespiti büyük önem taşır. Yaygın olarak karşılaşılan kusurlar arasında yüzey çizikleri,

çatlaklar, delinmeler ve pürüzler bulunur. Bu tür kusurları önlemek için üretim sürecinde etkin bir kalite kontrol sisteminin uygulanması şarttır. Bu kapsamda, üretim sırasında malzemenin yüzey kalitesinin sürekli izlenmesi ve herhangi bir sorun tespit edildiğinde hızlıca müdahale edilmesi önem taşır. Ayrıca, işleme ve ısıl işlem süreçlerinin doğru şekilde gerçekleştirilmesi, üretim ekipmanlarının düzenli bakımı ve kaliteli malzeme seçiminin yapılması, çelik filmaşın üretimindeki kusurları minimize etmek için kritik öneme sahiptir. Bu yaklaşımlar, çelik filmaşınların daha güvenilir ve dayanıklı olmasını sağlayarak, endüstriyel uygulamalarda verimliliği ve güvenliği artırır.

Teknolojik ilerlemelerle, çelik üretiminde hata tespiti ve denetiminin otomasyonunu giderek daha önemli hale getirmiştir. Geçmişte manuel yöntemlerle gerçekleştirilen görsel kalite kontrol süreçleri, günümüzde gelişen makine görüşü teknolojileri sayesinde otomatize edilmektedir. Bu modern yaklaşımlarda, endüstriyel kameralar aracılığıyla incelenen yüzeyler detaylı bir şekilde taranır ve elde edilen görüntüler, kusurları tespit etmek için geliştirilen algoritmalara aktarılır. Bu otomatik kusur tespit sistemleri, endüstriyel ürünlerin çeşitli yüzeylerindeki deforme bölgelerin doğru bir şekilde tespit edilmesini hedefler ve ürün kalitesi ile güvenliğinin sağlanmasında önemli bir rol oynar. Ancak, endüstriyel kusur tespiti sürecinde karşılaşılan bazı zorluklar vardır. Bunlar arasında, yetersiz numunelerden dolayı veri toplamanın zorluğu önemli yer tutar. Ayrıca, kusurlar genellikle düşük kontrasta, benzer dokulara ve yüksek görsel karmaşıklığa sahip küçük alanlarda bulunur, bu da tespitlerini zorlaştırır. Bu zorluklar, endüstriyel ürünlerin doğasından kaynaklanmaktadır. Özetle, gerçek endüstriyel veri setlerinin bulunmaması da bu zorlukları daha da artırır.

Geleneksel yapay görme sistemleri, görüntü analizinde kenarlar, köşeler, dokular gibi özelliklere dayalı teknikler kullanır. Bu teknikler arasında yerel ikili desenler (Local Binary Patterns - LBP), Gabor filtreleri ve Ölçekten Bağımsız Özellik Dönüşümü (Scale-Invariant Feature Transform - SIFT) bulunur. Ancak, bu yöntemler görüntüdeki özellikleri manuel olarak belirlemek için bir dizi parametreyi ayarlamayı gerektirir, bu da uzmanlık ve zaman gerektirir ve bazen hesaplama açısından verimsiz sonuçlar doğurabilir. Buna ek olarak, Geleneksel yöntemlerin bir diğer sınırlılığı, değişken koşullara ve karmaşık senaryolara adaptasyon yeteneklerinin sınırlı olmasıdır. Örneğin, farklı ışık koşulları, gölgeleme veya gürültü seviyeleri, bu yöntemlerin doğruluğunu ve güvenilirliğini önemli ölçüde etkileyebilir. Bu tür durumlarda, yöntemlerin ekstra ince ayar gerektirmesi ve ek parametre ayarlamaları yapılması gerekir.

Geleneksel yöntemler, sınırlı genelleştirme yetenekleri ve düşük doğruluk oranları nedeniyle yerlerini daha etkili olan derin öğrenme tabanlı sistemlere bırakmıştır. Derin öğrenme tabanlı sistemlerin otomatik kusur tespit süreçlerinde tercih edilmesinin başlıca nedenleri arasında yüksek doğruluk oranları ve

güvenilirlik bulunmaktadır. Bu modeller, karmaşık veri setlerinden çıkarılan özellikleri kullanarak, görüntülerdeki hassas detayları ve desenleri etkin bir şekilde tanıyabilir ve bu sayede kusur tespitinde yüksek başarı oranlarına ulaşır. Evrişimli Sinir Ağları (Convolutional Neural Networks - CNN) gibi derin öğrenme modelleri, çeşitli ışıklandırma, gölgeleme ve gürültü koşullarında bile etkili bir şekilde çalışabilir ve daha geniş uygulama senaryolarına uyum sağlayabilir. Ayrıca, derin öğrenme modellerinin esnekliği de önemli bir avantajdır. Farklı türdeki ve karmaşıklıkta veri setlerine uyum sağlayabilen bu modeller, çeşitli endüstriyel üretim ortamlarında ve farklı kusur türlerinin tespitinde etkili olarak kullanılabilir. Geleneksel yöntemlere kıyasla daha hızlı, maliyet etkin ve güvenilir sonuçlar sunan derin öğrenme modelleri, otomatik denetim, görüntü bazında sınıflandırma, kusur tespiti ve görüntü segmentasyonu gibi farklı alanlarda başarıyla kullanılabilir.

Sonuç olarak, derin öğrenme tabanlı sistemlerin otomasyon süreçlerindeki bu rolü, çelik üretiminde kalite kontrol ve güvenliğin artırılmasına büyük katkı sağlamaktadır. Bu teknolojiler, geleneksel manuel yöntemlerin yerini alarak, üretim süreçlerinin verimliliğini ve ürün kalitesini önemli ölçüde iyileştirmektedir.

Günümüzde, üretim süreçlerindeki hata tespitinin otomatikleştirilmesi, giderek daha fazla önem kazanan bir unsur olmuştur [1-3]. Endüstriyel çelik sektöründe, yüzey hatalarını belirlemek için kullanılan teknikler arasında manyetik akı kaçağı, kızılötesi algılama ve görüntü işleme yöntemleri yer almaktadır. Manyetik akı sızıntısı tespiti, çelik şerit yüzeyi üzerine manyetik alan uygulayarak çalışır. Herhangi bir yüzey kusuru, sızıntı yoluyla algılanabilecek manyetik alanın bozulmasına neden olur. Bu yöntem kullanılarak büyük kusurlar tespit edilebilir. Ancak bu yöntem, aşırı ince çatlaklar gibi küçük kusurların tespiti konusunda sınırlı bir kapasiteye sahiptir [4]. Yüzey kusurlarının tespitinde kullanılan bir diğer yöntem ise kızılötesi tabanlı tespit yöntemleridir [5]. Bu yöntem, çelik yüzeylerindeki kusurları sıcaklık dalgalanmaları üzerinden algılar. Kusurlar, çelik şeridin yüzeyinde ısı dağılımını etkileyerek, kızılötesi kameralar tarafından algılanabilir sıcaklık farklılıkları oluşturur. Ancak bu yöntemin bir dezavantajı, çelik şeridin kızılötesi ışık emilimi değişkenliğinin tespit doğruluğunu etkileyebilmesidir. Son yıllarda kullanımı önemli ölçüde artan bir diğer yöntem ise makine görmesine dayalı yöntemdir. Makine görmesi algoritmaları, ışığa duyarlı sensörler ve gelişmiş bilgisayar algoritmaları kullanarak çelik yüzeylerindeki kusurları tespit eder. Bu yöntem, yüzey kusurlarının yüksek çözünürlüklü görüntüleri kullanılarak, ince çatlaklar ve diğer küçük kusurlar dahil olmak üzere geniş bir kusur yelpazesinin tespit edilmesini mümkün kılar. Bu sistemler, basit yapıları, genişletilebilirlikleri ve yüksek doğruluk oranları nedeniyle son yıllarda birçok araştırmanın konusu olmuştur. Özellikle, derin öğrenme yöntemlerinin görsel tanıma alanında gösterdiği başarının artışıyla birlikte



kusur tespit sistemlerinde derin öğrenme tabanlı tespit yöntemleri geniş bir kullanım alanı bulmuştur [6-7].

Derin öğrenme tabanlı kusur tespit sistemleri, temel olarak sınıflandırma, nesne tespiti ve nesne segmentasyonu olmak üzere üç temel kategoriye ayrılır [8]. Bu sistemler, malzemelerin yüzeyindeki hataları doğru bir şekilde belirlemek için görüntüler üzerinden karmaşık analizler gerçekleştirir. Sınıflandırma, hataların türlerine göre sıralanmasını sağlarken [9]; nesne tespiti, hataların yerlerini belirler [10]. Nesne segmentasyonu ise, hataların sınırlarını daha detaylı bir şekilde çıkararak, boyut ve şekil gibi özelliklerinin incelenmesine olanak tanır [11]. Bu üçlü yaklaşım, kusur tespit süreçlerinin etkinliğini ve doğruluğunu artırarak endüstriyel kalite kontrol çalışmalarını önemli ölçüde iyileştirir.

Segmentasyon tabanlı yöntemler, diğer kusur tespit tekniklerine göre, görüntülerdeki nesnelere veya kusurları çok daha detaylı bir şekilde analiz etme avantajına sahiptir. Bu yöntemler, bir görüntüdeki ilgili nesnelere veya kusurların sınırlarını belirleyerek, onları arka plandan ayırt eder. Bu ayrıştırma sayesinde, nesnelere veya kusurların boyutu, şekli ve diğer özellikleri üzerinde daha kesin ölçümler yapılabilir. Bu durum, özellikle karmaşık yüzeylerdeki ince kusurların belirlenmesinde ve analiz edilmesinde büyük bir fark yaratır, böylece daha doğru ve güvenilir tespitler yapılmasına olanak tanır. Segmentasyon tabanlı yöntem için birçok model önerilmiştir. Yang vd. [12], piksel düzeyinde hassas derin bölümlenme sağlamak amacıyla, bir kodlayıcı-kod çözücü mimarisi kullanarak otomatik bir kusur segmentasyon ağı önermiştir. Bu model, kusurları tespit etmek ve uçtan uca bir segmentasyon modeli oluşturmak üzere tasarlanmıştır. Zhou vd. [13], U-Net mimarisinden ilham alarak yeni bir ağ tasarımı geliştirmiştir. PSD U-Net modeli, resim detaylarını maksimum düzeyde korumak için orijinal evrişim yerine delikli evrişim ve HDC tasarımını benimsemektedir. Çalışmada, U-Net, Mask R-CNN ve yeniden tasarlanmış PSD U-Net olmak üzere üç farklı model üzerinden deneysel bir karşılaştırma sunulmuştur. Aydın vd. [14], eğitim sürecinde sadece sağlıklı görüntü örneklerinden yararlanarak, hatalı bölgeleri belirlemiştir. Omurga olarak Resnet18 ve EfficientNet modelleri tercih edilip piksel düzeyinde hata tespitinde %98,7 gibi yüksek bir başarı oranına ulaşılmıştır. Xu vd. [15], kendi kendini denetleyen öğrenme stratejisi kullanarak yüksek verimlilik sunan Kendi Kendini Denetleyen Verimli Hata Dedektörü (SEDD) adında bir kusur tespit yöntemi sunmuştur. Önerilen bu yöntem, üretim hattında kusurlu örnekler için ek açıklamalara gerek kalmadan kusur tespiti gerçekleştirebilmektedir.

Bu çalışmanın amacı, topluluk öğrenme yaklaşımının tek başına kullanılan modellere kıyasla daha yüksek doğruluk oranı sağlayıp sağlamadığını araştırmaktır. Ayrıca, farklı derin öğrenme modellerinin bir araya getirilmesiyle elde edilen tahminlerin ağırlıklı ortalamasının kusur tespitinde daha güvenilir sonuçlar sunup sunmadığını incelemektir.

Bu çalışma, çelik yüzey kusurlarının tespiti için topluluk öğrenme stratejisini benimseyen bir yaklaşımı

sunmaktadır. Topluluk öğrenme, segmentasyon tabanlı kusur tespit yöntemlerinde Intersection over Union (IoU) metriğini artırmada etkili bir yaklaşımdır. Bu yöntem, birden fazla modelin bir araya gelerek ortak bir karar verdiği bir süreçtir. Her model, farklı özellikleri ve hataları algılayarak toplam doğruluğu artırır. Bu sayede, kusurların daha doğru bir şekilde tespit edilmesi sağlanır. IoU, tahmin edilen segmentasyon alanı ile gerçek segmentasyon alanının kesişiminin, bu iki alanın birleşimine bölünmesiyle elde edilir. Topluluk öğrenme, bu metriği artırarak daha güvenilir ve hassas kusur tespiti sağlar, böylece üretim süreçlerinin kalitesini yükseltir. Çalışmada önerilen yöntem, endüstriyel görüntüler üzerinde segmentasyon doğruluğunu artırmak için bu topluluk öğrenme prensibini uygular. Her bir model, farklı birer derin öğrenme mimarisi kullanılarak eğitilir ve ardından elde edilen tahminlerin ağırlıklı ortalaması alınarak nihai tahminleme yapılır. Bu yaklaşım, çelik kusur tespiti için etkili bir çözüm sunar ve endüstriyel kalite kontrol süreçlerinde önemli uygulama potansiyeline sahiptir. Piksel Düzeyinde İkili Rehberlik (PBG), sırasıyla ön plan ve arka plan özellik haritalarının birbirine ve kendine bağımlılığını modellemek için iki tamamlayıcı dal (ön plan ve arka plan) içeren etkileşimli bir özellik yeniden ağırlıklandırma şemasını benimser.

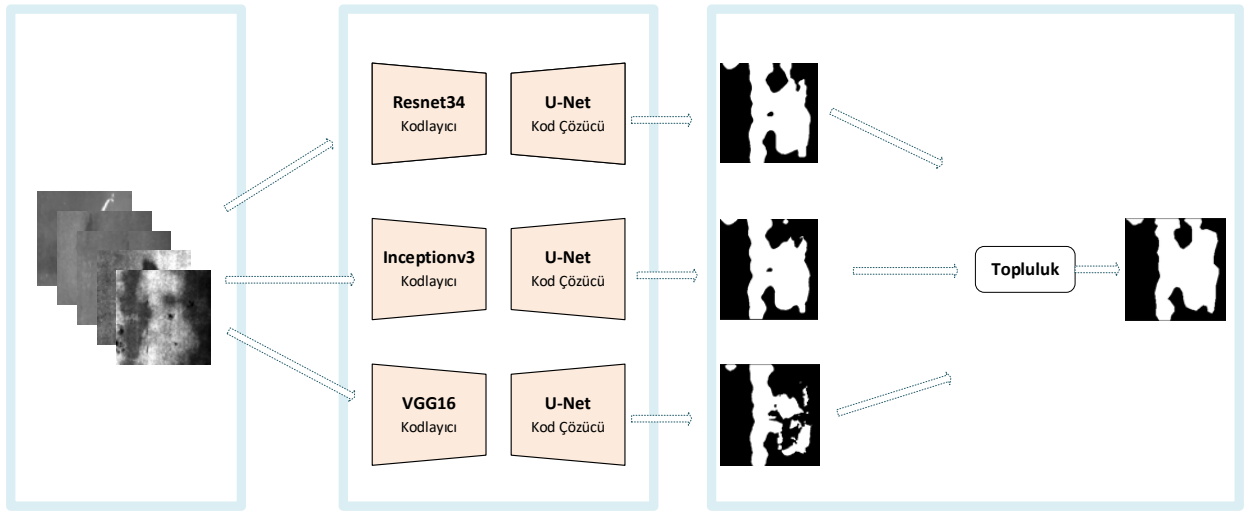
Çalışmamızın katkıları şu şekilde özetlenmektedir:

- Topluluk öğrenme, çelik yüzey kusurlarının segmentasyon görevinde başarıyla kullanılmıştır. Bu yöntem, farklı derin öğrenme modellerinin bir araya getirilerek çelik tel yüzeylerindeki kusurların doğru bir şekilde tespit edilmesini sağlamıştır.
- Literatürde yaygın olarak kullanılan SD-Saliency 900 veri kümesi üzerinde, çeşitli kusur segmentasyon algoritmaları deneyerek kapsamlı deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler, önerilen yöntemin diğer segmentasyon algoritmalarına kıyasla üstün performans sergilediğini göstermiştir.

## MATERYAL ve YÖNTEM

Topluluk öğrenme, birden fazla modelin bir araya getirilerek bir problem üzerinde çalışmasını içeren bir yaklaşımdır. Bu yöntem, bireysel modellerin hatalarını dengeler ve genel performansı artırır. Bu çalışmada, segmentasyon için topluluk öğrenme temelli bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem, farklı CNN modellerinin güçlü yönlerinden yararlanarak, veri temsili öğreniminde daha etkili bir yol sunar.

Önerilen segmentasyon yöntemi, çeşitlilik ve kapsamlılık açısından zengin bir veri seti üzerinde eğitilen bir dizi CNN modelinden oluşur. Bu modeller, her biri veri setinin farklı özelliklerini yakalayabilecek şekilde tasarlanmıştır. Ardından, topluluk öğrenme mekanizması, bu modellerin çıktılarını birleştirerek, her bir modelin zayıflıklarını birbirinin güçlü yönleriyle dengeleyerek nihai segmentasyon sonucunu elde eder. Bu yaklaşım hem veri temsili kalitesini artırır hem de eğitim sürecinde gereken hesaplama kaynaklarının miktarını azaltır.



Şekil 1. Önerilen derin öğrenme mimarisinin genel yapısı

Bu, özellikle karmaşık ve heterojen veri setlerinde, segmentasyon performansının önemli ölçüde iyileştirilmesini sağlar.

Sonuç olarak, önerilen topluluk öğrenme tabanlı segmentasyon yöntemi, kaynak kısıtlı ortamlarda bile yüksek kaliteli segmentasyon sonuçları elde etmeyi mümkün kılar. Bu yöntem, özellikle tıbbi görüntüleme, uzaktan algılama ve sanayi otomasyonu gibi alanlarda, etkili ve verimli bir çözüm sunar. Bu çalışma, segmentasyon problemlerine yönelik yeni ve kaynak dostu bir yaklaşımın kapılarını aralar ve derin öğrenmenin potansiyelini daha geniş bir kullanıcı kitlesine açar.

Bu çalışmada, çelik yüzeylerindeki kusurları ayırtmak ve bunları detaylı bir şekilde segmentasyonu için, UNet [16] mimarisi temel alınarak üç ayrı özelleştirilmiş bir derin sinir ağı modeli oluşturulmuştur. Bu modellerde kodlayıcı olarak ResNet34, Inceptionv3 ve VGG16 kullanılırken kod çözücü olarak U-net yapısı kullanılmıştır. Veri ön-işleme adımları kapsamında, tüm görüntüler ve maskeler 256x256 boyutlarına yeniden boyutlandırılmış, maskelerdeki kusur etiketleri sayısal değerlere dönüştürülmüş ve veri seti %80 eğitim, %20 test olacak şekilde bölünmüştür. Modeller, 256x256x3 ölçülerindeki bir çelik yüzey görüntüsünden başlayarak, 256x256x2 boyutlarında, kusurlu ve kusursuz bölgeleri tanımlayan bir segmentasyon haritası üretir. Bu harita, her sınıf için piksel bazında olasılıklar sunar, kusur varlığını ve yokluğunu belirten iki matristen oluşur. Softmax aktivasyon fonksiyonunun kullanımı ile, kusurlu bölgelerin olasılıkları, 256x256 boyutunda tek bir matris formunda sunulur. Bu metodoloji, çelik yüzeylerdeki kusurların doğru ve etkili bir şekilde tespiti ve sınıflandırılması için tasarlanmıştır, böylece endüstriyel kalite kontrol süreçlerinde önemli bir gelişme sağlamayı hedefler.

Şekil 1'de, sunulan modelin genel mimarisi verilmiştir. İlk adımda, çeşitli endüstriyel çelik yüzey veri kümelerinden kusur içeren görüntüleri topluyoruz. Ardından, bu orijinal çelik yüzey görüntülerine, görüntü

kırpma ve renk kanalı ayıklama gibi ön işleme adımlarını uyguluyoruz. Görüntü çevirme ve ölçeklendirme gibi yaygın artırma tekniklerini de entegre ederek veri setimizin çeşitliliğini artırıyoruz.

Daha sonraki aşamada, bağımsız temel modelin çelik yüzey kusurlarını tahmin etmesi için üç adet evrişimli görüntü transformatörü tabanlı ağ kullanıyoruz. Bu bağımsız temel ağların, kusur segmentasyonu için bir piramit görüş transformatörü ile birleştirildiğini belirtmek önemlidir. Bu işlemten sonra, üç farklı temel modelden elde edilen özellik haritalarını, kusur segmentasyon sonuçlarını elde etmek için kullanılan son sınıflandırıcı olarak birleştiren birkaç evrişim katmanını kullanıyoruz.

Bu metodoloji, çeşitli model mimarilerini bir araya getirerek ve topluluk öğrenme stratejisini kullanarak temel modelin segmentasyon kabiliyetini geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bireysel segmentasyon modellerinin kısıtlamaları, diğer temel modeller tarafından telafi edilir, bu da tek bir temel modele kıyasla daha ileri düzeyde bir segmentasyon başarısı sağlar. Geliştirdiğimiz model yapısı, topluluk sınıflandırıcısının detayları, kullanılan veri kümeleri, değerlendirme ölçütleri ve uygulama yöntemi sonraki bölümlerde detaylı bir şekilde açıklanacaktır. Bu yaklaşım, çelik yüzey kusur tespiti ve segmentasyonu alanında, yüksek doğruluk ve güvenilirlik sunan, yenilikçi bir metodolojinin kapılarını aralamaktadır.

### Kodlayıcı (Encoder)

ResNet34, derin residual ağların bir örneğidir ve derin öğrenme modellerindeki eğitim zorluğunu aşmak için tasarlanmıştır. Residual bloklar, modelin daha derin katmanlarda bile öğrenme yeteneğini korumasını sağlar. Kodlayıcı olarak ResNet34'ü kullanmak, modelimize, segmentasyon için gerekli olan zengin özelliklerin derinlemesine çıkarılmasında büyük bir avantaj sağlar.

InceptionV3, çok çeşitli ölçeklerdeki özellikleri etkili bir şekilde yakalayabilen bir yapıya sahiptir. Bu model, farklı boyutlardaki filtrelerin paralel olarak

kullanılmasıyla karakterize edilir. InceptionV3'ü kodlayıcı olarak kullanmak, modelimizin farklı çözünürlüklerdeki özellikleri algılama kapasitesini artırır, bu da çeşitli boyutlardaki kusurların daha doğru bir şekilde tespit edilmesine olanak tanır.

VGG16, basit ve derin bir mimariye sahiptir. Model, tekrar eden evrişim katmanları ve max pooling katmanlarından oluşur. Kodlayıcı olarak VGG16'nın kullanılması, modelimize güçlü bir özellik çıkarma ve görsel temsil yeteneği kazandırır. Bu, özellikle yüzey kusurlarının tespiti gibi görevlerde önemli bir avantajdır.

### Kod Çözücü (Decoder)

Kodlayıcı kısmı, kodlanmış özellikleri kullanarak bir son segmentasyon haritası üretmeyi hedefleyen bir yapıdadır. Kodlayıcı ile eşit sayıda bloğa sahip bu yapı, her bir kod çözücü bloğu ile özellik kanallarının sayısını azaltırken mekansal çözünürlüğü artırır. Bu süreç, çift doğrusal yukarı örnekleme yöntemiyle gerçekleştirilir ve elde edilen çıktı, kodlayıcının karşılık gelen bloğundan gelen çıktı ile birleştirilerek zengin detayların korunmasını sağlar. kodlayıcı blokları arasındaki atlama bağlantıları, kodlayıcıdan alınan özelliklerin doğrudan kod çözücü katmanlarına iletilmesini sağlar. Bu yaklaşım, özellikle detayların korunması ve yüksek çözünürlüklü segmentasyon haritalarının üretilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

### Ölçüm Mertikleri

Bu çalışmada kullanılan değerlendirme metrikleri, doğruluk, duyarlılık, özgünlük ve ortalama Birlikte Bölüşümün Kesişimi (mIoU) olarak belirlenmiştir. Doğruluk, modelin doğru tahmin ettiği pozitif ve negatif örneklerin toplam tahmin sayısına oranıdır ve modelin genel performansını ölçer. Duyarlılık, doğru pozitif tahminlerin toplam gerçek pozitif örneklere oranıdır ve modelin pozitif sınıfları ne kadar iyi tespit ettiğini gösterir. Özgünlük, doğru negatif tahminlerin toplam gerçek negatif örneklere oranıdır ve modelin negatif sınıfları ne kadar iyi tespit ettiğini gösterir. mIoU, her bir sınıf için Birlikte Bölüşümün Kesişimi (Intersection over Union, IoU) değerlerinin ortalamasıdır ve modelin segmentasyon performansını değerlendirir

$$\text{Doğruluk} = \frac{DP + DN}{DP + YN + YP + DN} \quad (1)$$

$$\text{Duyarlılık} = \frac{DP}{DP + YN} \quad (2)$$

$$\text{Özgünlük} = \frac{DP}{DP + YP} \quad (3)$$

$$mIoU = \frac{1}{k+1} \sum_{a=0}^k \frac{p_{aa}}{\sum_a p_{ab} + \sum_b p_{ba} - p_{aa}} \quad (4)$$

### TARTIŞMA

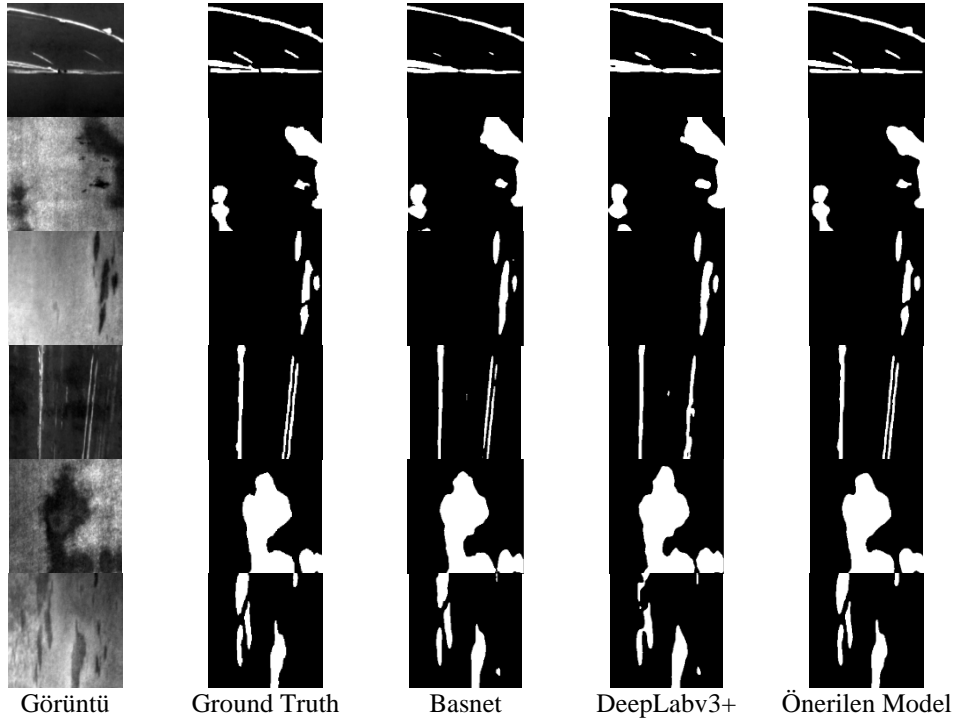
Bu çalışmada, segmentasyon amaçlı üç farklı modelin karşılaştırılmasına yönelik deneysel sonuçlar sunulmaktadır. Çalışmada, semantik segmentasyon için bir U-Net modelini kullanarak çeşitli model ve parametre ayarlarıyla bir topluluk öğrenme yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemde ResNet34, InceptionV3 ve VGG16 omurgalarına sahip U-Net modelleri kullanılır. Modellerin performansı ağırlıklı ortalama yöntemiyle birleştirilir ve en iyi performansı sağlayan ağırlıklar belirlenir. Tablo 1'de, bu çalışmada kullanılan bazı önemli parametre ayarları sunulmuştur. Giriş görüntü boyutları, segmentasyon işlemi için gerekli detayı sunarken hesaplama maliyetlerini dengede tutacak şekilde 256x256 piksel olarak belirlenmiştir. Mini-yığın boyutu (batch size) olarak 8 değeri tercih edilmiş, bu seçim, eğitim sürecinin verimliliğini ve modelin genelleme kabiliyetini optimize etme amacı taşır. Model optimizasyonu için, adaptif öğrenme oranları sayesinde hızlı ve etkili yakınsama sunan Adam optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma, derin öğrenme alanında yaygın olarak tercih edilir ve eğitim sürecini iyileştirir. Toplamda 50 eğitim döngüsü (epoch) gerçekleştirilmiş, bu sayede modellerin eğitim veri seti üzerinde yeterli öğrenmeyi gerçekleştirmesi sağlanmıştır. Öğrenme oranı olarak seçilen 0.001 değeri, modelin ağırlık güncellemelerinde dengeli bir yaklaşım sunar. Topluluk öğrenme yönteminde ağırlıklar şu şekilde belirlenmiştir: ResNet34 için 0.3, InceptionV3 için 0.5 ve VGG16 için 0.2.

Tablo 1. Model için parametreler

Parametre	Değer
Resim Boyutu (X, Y)	256, 256
Sınıf Sayısı	2
Öğrenme Oranı (LR)	0.0001
Optimizatör	Adam
Kayıp Fonksiyonu	DiceLoss +CategoricalFocalLoss
Eğitim Seti Boyutu	80%
Test Seti Boyutu	20%
Eğitim Epoch Sayısı	100
Batch Boyutu	8

Model geliştirme süreçleri, Keras kütüphanesinin sunduğu araçlar kullanılarak, PyCharm geliştirme

**Tablo 2.** Sd-Saliency-900 veri kümesinde görselleştirme sonuçları

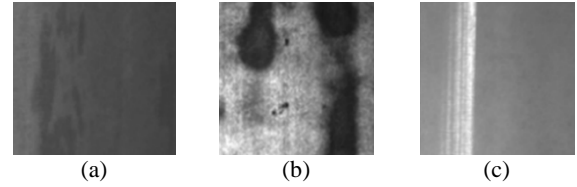


ortamında yürütülmüştür. Eğitim işlemleri, güçlü bir ekran kartı olan NVIDIA RTX3060 ile donatılmış ve Windows işletim sistemi altında çalışan bir bilgisayar üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Modellerin segmentasyon performansının değerlendirilmesinde, model kalitesi ve etkinliği hakkında kapsamlı bilgi sağlayan bir dizi performans metriği kullanılmıştır. Bu metrikler arasında ortalama kesişim üzeri birleşme oranı (mIoU), doğruluk (accuracy), hatırlama oranı (recall), kesinlik (precision) ve F1 skoru bulunmaktadır. Bu metrikler, modellerin segmentasyon kabiliyetlerinin detaylı bir şekilde analiz edilmesine ve karşılaştırılmasına olanak tanır.

Modelin geliştirilmesi sürecinde, performansının doğru bir şekilde ölçülmesi için kullanılan veri setinin kalitesi ve uygunluğu büyük önem taşır. Bu açıdan bakıldığında, SD Saliency-900 veri seti, çelik yüzeylerdeki kusurların tespit edilmesinde model performansını değerlendirmek için iyi bir kaynaktır. Bu veri seti, kalıntılar, yamalar ve çizikler olmak üzere üç ana kusur sınıfını içermekte ve bu kusurların farklı şekil, boyut ve görünümelerini sergilemektedir.

SD Saliency-900, çelik yüzeylerdeki kusurların derinlemesine analizi için özel olarak hazırlanmıştır. Veri setindeki her bir kusur sınıfı, endüstriyel üretim süreçlerinde karşılaşılan gerçek dünya senaryolarını yansıtmakta ve bu kusurların otomatik tespiti için zorluklar sunmaktadır. Örneğin, kalıntılar genellikle yüzeyde düzensiz birikintiler şeklinde görülürken, yamalar yüzeydeki lokalize renk değişikliklerini, çizikler ise ince ve uzun yüzey bozulmalarını temsil eder.



**Şekil 2.** SD-Saliency-900 veri kümesinin örnek görüntüleri sırasıyla (a) inclusion (b) patches ve (c) scratches

Veri setindeki kusurların çeşitliliği, Şekil 2'de görselleştirilmiştir. Bu görselleştirme, kusur tespitinde karşılaşılan zorlukları ve çeşitli kusur türlerinin doğru bir şekilde sınıflandırılması ve segmentasyonu için gereken detay düzeyini vurgular. SD Saliency-900, bu kusurların derin öğrenme modelleriyle nasıl etkili bir şekilde tespit edilebileceğine dair değerli içgörüler sunar.

Tablo 2'de gösterilen performans metriklerine göre, önerilen topluluk öğrenmesi tabanlı model, Basnet ve Deeplabv3+ modellerinden daha yüksek sonuçlar elde etmiştir.

**Tablo 2.** Karşılaştırma sonuçları

Model	Doğruluk (%)	Özgünlük (%)	Duyarlılık (%)	mIoU (%)
BasNet [17]	84,66	96,99	97,09	68,39
DeepLab v3+(Xception) [18]	85,86	96,51	<b>98,38</b>	64,77
<b>Önerilen Model</b>	<b>97,47</b>	<b>98,01</b>	97,65	<b>77,98</b>

### Çalışmanın Avantajları ve Dezavantajları

Bu çalışmanın avantajları arasında topluluk öğrenme yaklaşımının kullanılması sayesinde daha yüksek doğruluk oranları elde edilmesi ve modelin genel performansının artması yer almaktadır. Farklı derin öğrenme modellerinin bir araya getirilmesi, her modelin güçlü yönlerinin birleşmesini sağlayarak kusur tespitinde daha güvenilir sonuçlar sunar. Ayrıca, ağırlıklı ortalama yöntemi ile model kombinasyonlarının optimize edilmesi, segmentasyon performansını en üst düzeye çıkarır. Ancak, çalışmanın dezavantajları arasında, topluluk öğrenme yaklaşımının hesaplama maliyetinin yüksek olması ve model eğitim sürecinin uzun sürmesi bulunmaktadır. Ayrıca, farklı modellerin entegrasyonu ve ağırlık optimizasyonu karmaşık bir süreç olup, uzmanlık gerektirir. Bu faktörler, özellikle kaynakları sınırlı olan ortamlarda uygulamayı zorlaştırabilir.

### SONUÇ

Bu çalışmada, çelik yüzey kusurlarının segmentasyon işlemi için özel olarak eğitilmiş, son teknoloji görüntü bölümlenme ağlarının karşılaştırmalı bir analizi sunulmaktadır. Derin öğrenme tabanlı çeşitli görüntü bölümlenme yöntemlerinin mevcut olduğu bilinmesine rağmen, bu yöntemlerin çelik yüzey kusurlarını bölümlenme görevi üzerindeki performansları, segmentasyon doğruluğu, işlem hızı ve hesaplama karmaşıklığı açısından detaylı bir şekilde değerlendirilmemiştir. Bu boşluğu doldurmak amacıyla, çeşitli segmentasyon ağlarının ve çoklu özellik çıkarım omurgalarının performansını kapsamlı bir şekilde inceledik ve segmentasyon performansını artırmak için topluluk öğrenme tabanlı bir yöntem önerilmiştir.

Tablo 1’de gösterilen deneysel sonuçlar, analiz edilen çeşitli segmentasyon yöntemlerinin segmentasyon doğruluğu açısından (ortalama Kesişim üzeri Birleşim - mIoU) karşılaştırılabilir performans sergilediğini göstermiştir. Ancak, topluluk öğrenme tabanlı yöntem, BasNet ve DeepLabv3+ modelleri dahil olmak üzere diğer tüm yöntemlerden daha üstün sonuçlar elde etmiştir. Bu yöntem, değişken ölçeklerde, farklı şekillerde ve düşük kontrastlı kusurları bölümlenmekte özellikle etkili bulunmuştur. Sınıf bazında bölümlenme performansının detaylı analizi, belirli kusur türlerini bölümlenmenin, özellikle düşük kontrast ve karmaşık şekiller söz konusu olduğunda, zor olabileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma, çelik yüzey kusurlarını tespit etmek ve bölümlenmek için derin öğrenmeye dayalı yöntemlerin kapsamlı bir karşılaştırmasını sunmaktadır. Topluluk öğrenme tabanlı yöntemin, özellikle zorlu bölümlenme görevlerinde, mevcut en gelişmiş modellerden daha iyi performans sergilediği gözlemlenmiştir. Bu bulgular, endüstrideki uygulamalar için önemli iyileştirmeler sunmakta ve gelecekteki araştırmalar için yeni yollar açmaktadır.

### TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TUBITAK) tarafından 5210082 numaralı proje ile desteklenmiştir.

### KAYNAKÇA

- [1] Sime, D. M., Wang, G., Zeng, Z., & Peng, B. (2024). Deep learning-based automated steel surface defect segmentation: a comparative experimental study. *Multimedia Tools and Applications*, 83(1), 2995-3018.
- [2] Wang, G. Q., Zhang, C. Z., Chen, M. S., Lin, Y. C., Tan, X. H., Kang, Y. X., ... & Zhao, W. W. (2024). A high-accuracy and lightweight detector based on a graph convolution network for strip surface defect detection. *Advanced Engineering Informatics*, 59, 102280.
- [3] Tang, B., Chen, L., Sun, W., & Lin, Z. K. (2023). Review of surface defect detection of steel products based on machine vision. *IET Image Processing*, 17(2), 303-322.
- [4] Long, Y., Zhang, J., Huang, S., Peng, L., Wang, W., Wang, S., & Zhao, W. (2022). A novel crack quantification method for ultra-high-definition magnetic flux leakage detection in pipeline inspection. *IEEE Sensors Journal*, 22(16), 16402-16413.
- [5] Santoro, L., Sesana, R., Molica Nardo, R., & Curá, F. (2023). Infrared in-line monitoring of flaws in steel welded joints: a preliminary approach with SMAW and GMAW processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 128(5), 2655-2670.
- [6] Akhyar, F., Lin, C. Y., Mughtar, K., Wu, T. Y., & Ng, H. F. (2019, September). High efficient single-stage steel surface defect detection. In 2019 16th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS) (pp. 1-4). IEEE.
- [7] Qu, Y., Wan, B., Wang, C., Ju, H., Yu, J., Kong, Y., & Chen, X. (2023). Optimization algorithm for steel surface defect detection based on PP-YOLOE. *Electronics*, 12(19), 4161.
- [8] Akhyar, F., Liu, Y., Hsu, C. Y., Shih, T. K., & Lin, C. Y. (2023). FDD: a deep learning-based steel defect detectors. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 126(3-4), 1093-1107.
- [9] Shao, Y., Fan, S., Sun, H., Tan, Z., Cai, Y., Zhang, C., & Zhang, L. (2023). Multi-Scale Lightweight Neural Network for Steel Surface Defect Detection. *Coatings*, 13(7), 1202.
- [10] Hussain, M. (2023). YOLO-v1 to YOLO-v8, the Rise of YOLO and Its Complementary Nature toward Digital Manufacturing and Industrial Defect Detection. *Machines*, 11(7), 677.
- [11] Üzen, H., Turkoglu, M., Aslan, M., & Hanbay, D. (2023). Depth-wise Squeeze and Excitation Block-based Efficient-Unet model for surface defect detection. *The Visual Computer*, 39(5), 1745-1764.
- [12] Yang, L., Xu, S., Fan, J., Li, E., & Liu, Y. (2023). A pixel-level deep segmentation network for automatic defect detection. *Expert Systems with Applications*, 215, 119388.
- [13] Zhou, G., & Sun, H. (2020, June). Defect detection method for steel based on semantic segmentation. In 2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC) (pp. 975-979). IEEE.
- [14] Aydın, I., Güçlü, E., & Akin, E. (2023, November). An Improved Unsupervised Convolutional Neural Networks for Detection of Steel Wire Defects. In 2023 International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing, and Technologies (3ICT) (pp. 402-407). IEEE.
- [15] Xu, R., Hao, R., & Huang, B. (2022). Efficient surface defect detection using self-supervised learning strategy and segmentation network. *Advanced Engineering Informatics*, 52, 101566..
- [16] Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015). U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In *Medical image computing and computer-assisted intervention—MICCAI 2015: 18th international conference, Munich, Germany, October 5-9, 2015*,





- proceedings, part III 18 (pp. 234-241). Springer International Publishing..
- [17] Qin, X., Fan, D. P., Huang, C., Diagne, C., Zhang, Z., Sant'Anna, A. C., ... & Shao, L. (2021). Boundary-aware segmentation network for mobile and web applications. arXiv preprint arXiv:2101.04704.
- [18] Goncalves, J. P., Pinto, F. A., Queiroz, D. M., Villar, F. M., Barbedo, J. G., & Del Ponte, E. M. (2021). Deep learning architectures for semantic segmentation and automatic estimation of severity of foliar symptoms caused by diseases or pests. *Biosystems engineering*, 210, 129-142.

## Dolguşuz ve GR/B<sub>4</sub>C Dolgulu Hibrit Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin ve İşlenebilirliğinin İncelenmesi

Hüseyin GÜRBÜZ<sup>1</sup>, Mehmet Emin DEMİR<sup>2</sup>, Şehmus BADAY<sup>2</sup>, İbrahim Halil AKCAN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Batman Üniversitesi, Batman, Türkiye

<sup>2</sup>Beşiri Organize Sanayi MYO, Batman Üniversitesi, Batman, Türkiye

✉: [huseyin.gurbuz@batman.edu.tr](mailto:huseyin.gurbuz@batman.edu.tr)  <sup>1</sup>0000-0003-1391-172X  <sup>2</sup>0000-0001-9630-6378  <sup>3</sup>0000-0003-4208-8779  
 <sup>4</sup>0009-0007-8075-2323

Geliş (Received): 24.09.2024

Düzeltilme (Revision): 30.10.2024

Kabul (Accepted): 18.11.2024

### ÖZ

Bu çalışmada B<sub>4</sub>C ve Gr dolguları kullanılarak üretilen cam elyafli takviyeli kompozitlerin (CETK) çekme, eğme ve delik delme özellikleri incelenmiştir. %7,5 B<sub>4</sub>C ve %7,5 Gr dolgulu hibrit kompozitlerde dolgu parçacıkları hem çekme hem eğme dayanımlarını düşürmüştür. Çekme numunelerinin kopmuş kesitlerinin SEM görüntüleri analiz edildiğinde dolgulu kompozitlerde matris boşluklarının daha fazla olduğu belirlenmiştir. Hibrit kompozitlerden elde edilen delaminasyon değerleri dolguşuz kompozitlerden daha düşük, ilerleme kuvvetleri ise dolguşuz kompozitlerden daha yüksek çıkmıştır. Kesme hızı arttıkça delaminasyon değerlerinin arttığı, ilerleme oranının artmasıyla delaminasyon değerlerinin düştüğü tespit edilmiştir. Elde edilen ilerleme kuvvetleri ilerleme oranının artmasıyla artmakta, kesme hızının artırılmasıyla ise azalmaktadır. Hibrit ve dolguşuz kompozitlerin titreşim ve moment değerlerinin yakın olduğu gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Delik delme, Dolgu, Elyaf takviyeli kompozit, Mekanik özellikler

## Investigation of Mechanical Properties and Machinability of Unfilled and Gr/B<sub>4</sub>C Filled Hybrid Composites

### ABSTRACT

In this study, the tensile, flexural and drilling properties of unfilled and filled glass fiber reinforced composites (CETK) produced using B<sub>4</sub>C and Gr fillers were investigated. In hybrid composites with 7.5% B<sub>4</sub>C and 7.5% Gr fillers, filler particles reduced both tensile and flexural strengths. The SEM images of the fractured sections of the tensile specimens revealed that there are more matrix voids in the filled composites. The delamination values obtained from hybrid composites were lower than unfilled composites, and the thrust forces were higher. The delamination values obtained from hybrid composites were lower than unfilled composites, and the feed forces were higher than unfilled composites. It was determined that delamination values increased as the cutting speed increased, and delamination values decreased as the feed rate increased. It was revealed that the obtained thrust forces increased depending on the increase in the feed rate, and decreased depending on the increase in the cutting speed. It was observed that the vibration and moment values of hybrid and unfilled composites were close.

**Keywords:** Drilling, Fiber reinforced composite, Filler, Mechanical properties

### GİRİŞ

Son yıllarda epoksi reçineler düşük maliyet, kimyasal tepkimeye ilgisizlik, yüksek korozyon direnci, kolay işlenebilirlik ve hidrofobik özellikleri sayesinde geleneksel parçaların yerine kullanılmaktadır [1-3]. Ancak epoksi reçinelerin dayanımlarının düşük olması ve termal özelliklerinin kötü olması bu malzemeleri dezavantajlı kılmaktadır. Epoksi reçinelerin uygun dolgu ve elyaflarla takviyelendirilmesi reçinenin, mekanik, aşınma ve işlenebilirliğini etkilemektedir. Kullanılan dolguların boyutu, şekli ve miktarları da elde edilecek olan kompozitin özelliklerini değiştirmektedir [2].

Birçok araştırmacı polimer kompozitlere farklı elyaf türleri ve dolgular ilave ederek bu kompozitlerin istenen özelliklerini geliştirmeyi hedeflenmişlerdir [4-9]. Grafit, B<sub>4</sub>C, SiC, TiN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gibi farklı sert dolgu parçacıklarının epoksi reçineye ilave edilmesinin kompozitin mekanik ve aşınma özelliklerini iyileştirdiği yapılan çalışmalarda ortaya konmuştur [8,10-11]. Böylece epoksi matrisli kompozitlerin, silindirler, dişliler, tekerlekler ve aktarma kayışı gibi endüstriyel malzemelerin üretiminde kullanılması kolaylaşmaktadır [12,13]. Farklı dolgular kullanılarak üretilen kompozitlerin mekanik, tribolojik ve işlenebilirlik



özelliklerinin araştırıldığı birçok çalışma mevcuttur [14-16]. Suresha ve ark. [6] SiO<sub>2</sub> dolgusunun CETK'lerin çekme, eğme dayanımını ve sertliğini arttırdığını belirtmişlerdir. Ayrıca SiC dolgusunun aşınma direncini arttırdığı ve COF değerini düşürdüğünü belirlemişlerdir. Abenojar ve ark. [11] B<sub>4</sub>C dolgusunun kompozitin sertliğini 75 Shore D değerinden 79 Shore D değerine çıkardığı, eğilme dayanımını ise 102 MPa'dan 113 MPa'ya yükselttiğini belirlemişlerdir. Manjunath ve ark. [17] %7 SiO<sub>2</sub>, %3 nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ve %5 mikro-alümina trihidrat parçacık dolgulu cam elyafli kompozitlerin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Dolguların eğme, çekme ve darbe dayanımını arttırdığını gözlemlemişlerdir. Hariprasad ve ark. [18] B<sub>4</sub>C ve SiO<sub>2</sub> dolgularının elyaf takviyeli hibrit kompozitin çekme, eğme ve darbe özelliklerine etkisini araştırmışlardır. %20 SiO<sub>2</sub> dolgulu kompozitin çekme, eğme ve darbe direncinin %15 SiO<sub>2</sub> ve %5 B<sub>4</sub>C dolgulu kompozitten daha düşük olduğunu belirlemişlerdir. Suresha ve ark. [19] Gr dolgusunun kompozitin aşınma direncini geliştirdiğini belirlemişlerdir. Artan dolgu oranının kütle kaybını düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. Hulugappa ve ark. [20] CETK'lere %5 Gr ilavesinin çekme dayanımını 305 MPa'dan 342 MPa'a yükselttiğini belirtmişlerdir. CETK'lere SiC dolgusunun Gr dolgusundan daha fazla mukavemet kazandırdığını belirlemişlerdir. CETK'lerin sahip oldukları özelliklerinden dolayı havacılık, otomotiv ve uzay gibi birçok alanda kullanılmaktadır [21,22]. Kompozit iş parçalarının birleştirilmesi ve montajında delik delme büyük bir önem arz etmektedir. Bu duruma en iyi örnek bir uçağın yapılmasıdır. Çünkü uçağın birçok aksamında kompozit malzemeler kullanılmakta ve yaklaşık olarak 55,000 deliğe ihtiyaç duyulmaktadır [23,24]. Bu yüzden kompozitlere uygulanan delik delme işleminde kullanılan kesme parametreleri ve işleme koşulları büyük bir önem arz etmektedir. Literatürde CETK ile ilgili yapılan çalışmalar aşağıda özetle verilmiştir [25-32]. Mohan ve ark. [25] kesme parametrelerin CETK'lerin delinmesinde oluşan ilerleme kuvveti ve tork üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Optimum işleme parametrelerini, tork ve ilerleme kuvveti için iş parçası kalınlığı 3 mm, ilerleme 50 mm/dk, kesme hızı 1500 dev/dk ve matkap çapı 3 mm olarak bulmuşlardır. Liu ve ark. [26] CETK'lerin delinmesinde delaminasyonu ve ilerleme kuvveti değerlerini araştırmışlardır. Buldukları sonuçlara bağlı olarak uygun geometrik açılar oluştuğunda delaminasyon ve ilerleme kuvveti değerlerinin düştüğünü tespit etmişlerdir. Natarajan ve ark. [27] CETK'lerin delinmesinde farklı matkap uç açılarının delaminasyon ve ilerleme kuvvetleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar ışığında matkap uç açısının artması ilerleme kuvvetlerini azaldığını bulmuşlardır. Azalan ilerleme kuvvetleri delaminasyon değerlerinin düşmesine ve takım aşınmasının azalmasına katkı bulunduğunu ve bu da yüzey kalitesinin arttırdığını tespit etmişlerdir. Tian ve ark. [28] CETK'lerin delinmesi sonucu oluşan ilerleme kuvvetlerini ve delaminasyon değerlerini incelemişlerdir. Kesme hızı arttıkça delaminasyon miktarının arttığını ve ilerleme

kuvvetinin azaldığını bulmuşlardır. Ayrıca yazarlar, ilerleme miktarı arttığında ilerleme kuvvetinin arttığını ve delaminasyon miktarının azaldığını tespit etmişlerdir. Khashaba ve ark. [29] farklı kalınlıklarda ürettikleri CETK'lerin delinmesinde esnasında elde ettikleri ilerleme kuvvetlerini, delaminasyon ve ısıdan etkilenmiş bölgeyi incelemişler. Elde ettikleri sonuçlardan delaminasyon değerleri üzerinde kesme sıcaklığı ve ilerleme kuvvetlerinin önemli bir etkiye sahip olduğunu bulmuşlardır. Kompozitlerin kalınlıkları arttıkça ısıdan etkilenmiş bölgenin arttığını ve delme zamanı arttıkça ilerleme kuvvetlerinin arttığını tespit etmişlerdir. Erturk ve ark. [30] CETK'lerin delinmesinde kesme sıcaklığı üzerinde işleme parametrelerini etkisini araştırmışlardır. Kesme sıcaklığı üzerinde kesme hızı ve ilerlemeden çok HSS-R matkabın önemli bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Jessy ve ark. [31] CETK'lerin delinmesinde farklı soğutma metotların matkap sıcaklığı üzerinde etkisini araştırmışlardır. İçten soğutma metodunun diğer metotlara göre takım aşınması ve matkap sıcaklığı üzerinde ciddi katkıları olduğunu ortaya koymuşlardır. Khashaba ve ark. [32] CETK'lerin delme analizini yapmışlardır. Yazarlar, ilerleme oranlarının artmasıyla matkapta oluşan aşınmanın arttığını ve delaminasyon miktarı üzerinde yüksek ilerleme ve kesme hızının etkili olduğunu bulmuşlardır.

Bu çalışmanın temel amacı farklı iki dolgu kullanarak üretilen hibrit ve dolgusuz CETK'lerin mekanik ve delik delme performansının incelenmesidir. Hibrit dolgulu kompozitlerin işlenebilirliği ve mekanik özellikleri hakkında kısıtlı bilimsel çalışma olması bu konunun irdelenmesinin temel motivasyonudur. Delik delme işlemi, CFRP kompozitlerde önemli bir rol oynar. Çünkü yanlış delinmiş bir delik, delik kalitesini, boyutsal hassasiyetini, boyut doğruluğunu ve kompozit parçanın montajını olumsuz etkileyecektir. Bundan ötürü eklenecek dolguların elyaf takviyeli kompozitlerdeki delik delme performansını nasıl etkileyeceğinin belirlenmesi bu çalışmayı literatürden farklı kılmaktadır.

## MATERYAL ve YÖNTEM

### Kompozit iş parçalarının üretilmesi

Epoksi malzeme olarak düşük viskoziteye sahip, otomotiv ve gemi endüstrisinde yaygın bir şekilde faydalanılan ARC 152 reçine ve sertleştirici kullanılmıştır. B<sub>4</sub>C ve Gr tozları Ege nanotek, Plain dokuma tip cam elyaf ise karbomid firmasından temin edilmiştir. Cam elyaf 220 gr/m<sup>2</sup> ağırlığında, 1300 MPa çekme dayanıma, 65 GPa elastisite modülüne ve % 2,50 kopma uzamasına sahiptir. Kompozitler el yatırma yöntemi ile üretilmiştir. Kompozit malzemelerin üretiminde epoksi/sertleştirici oranı ürün kataloğunda belirtildiği üzere 4:1 olarak kullanılmıştır. Kullanılan B<sub>4</sub>C dolgusu, 2,52 g/cm<sup>2</sup> yoğunluğa ve 30 mikron parçacık boyutuna ve %96 saflığa sahiptir. Gr dolgusu ise 2,09 g/cm<sup>3</sup> yoğunluk ve 30 mikron boyutunda ve %99 saflıktadır. Kompozitlerdeki cam elyaf ve matris/dolgu oranı %50/%50 olarak belirlenmiştir. Ağırlıkça %7,5

B<sub>4</sub>C ve %7,5 Gr dolgu parçacıkları hassas terazide tartılarak aynı anda reçineye ilave edilmiştir. Dolgu parçacıkları matris içine ilave edildikten sonra homojen dağılması için 15 dakika karıştırılmıştır. Dokuma kumaşlar 300 mm x 300 mm boyutlarında kesilerek, her kumaş katmanına hazırlanan dolgu, matris ve sertleştirici karışımı rulo yardımıyla sürülerek 13 katmanlı plakalar üretilmiştir. Kompozitler oda sıcaklığında 24 saat boyunca kürleşmeye bırakılmıştır. Elde edilen plakalar 4±0,05 mm kalınlığa sahiptir. Çekme, eğme ve delik delme işlemleri için plakalardan ASTM standartlarına uygun numuneler kesilmiştir.

### Çekme ve eğilme testi

Kompozitlerin mukavemetlerinin ölçülmesi amacıyla çekme testleri 250 kN kapasiteli universal *Shimadzu AG-IC* marka cihazda 1 mm/dak hızda ASTM D638 standartlarına göre yapılmıştır. Çekme numuneleri ölçüleri 250 mmx 25 mm ve eğme numunesi ölçüleri ise 150 mm x 12,7 mm'dir. Eğme deneyleri, malzemelerin eğme ve kırılma mekanizmalarının belirlenmesinde kullanılan bir test yöntemidir [33]. İki destek üstüne konulan daire ya da dikdörtgen kesitli malzemelerin orta noktasına malzeme kırılana dek kuvvet uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Eğme testleri ASTM D790 standartlarına göre Shimadzu AG-IC marka cihazda 80 mm destek aralığı bırakılarak gerçekleştirilmiştir. Dolgusuz ve hibrit dolgulu kompozitlerin çekme ve eğme dayanımlarını test etmek için 3 kez deney tekrarı yapıldıktan sonra elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır.

### Kesici takımlar ve tezgâh

Delik delme deneyleri kuru işleme şartlarında CNC dik işleme tezgâhında dört devir sayısı (500 -1000 - 2000 - 4000 dev/dak), dört ilerleme (0,025 - 0,05 - 0,1 - 0,2 mm/dev) ve dört kesme hızında (6,25 - 12,5- 25- 50 m/dak) gerçekleştirilmiştir. 4 mm kalınlığında 25 mm x 130 mm boyutlarında kompozit numunelerin boydan boya delik delme işlemleri için kaplamalı karbür matkaplar kullanılmıştır. Matkaplar *KARCAN* kesici takım firmasından temin edilmiştir. Delme deneylerinde kullanılan matkaplar PVD kaplamalı, kaplama kalınlığı 1,78µm, kaplama bileşimi (AlTiN), kaplama katman sayısı 4, helis açısı 30°, uç açısı 118° ve boşluk açısı 11° dir.

### Delaminasyon faktörü ve SEM ölçümleri

Delaminasyon, kompozit malzemelerin delik delme operasyonları sonrası ölçülen en önemli ölçümlerinden bir tanesidir. Delaminasyon değerleri, delik çıkışından ölçülmüş olup Eşitlik 1'deki denklemden yararlanılarak hesaplanmıştır.

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_o} \quad (1)$$

Burada  $D_o$ ; delik çapı,  $F_d$ ; delaminasyon faktörü ile  $D_{max}$ ; deliğin çevresindeki en büyük hasar çapını ifade edilmektedir. *Quanta 650 Field Emission* markalı Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) cihazı, çekme sonrası kopma yüzeylerin görüntüleri için kullanılmıştır.

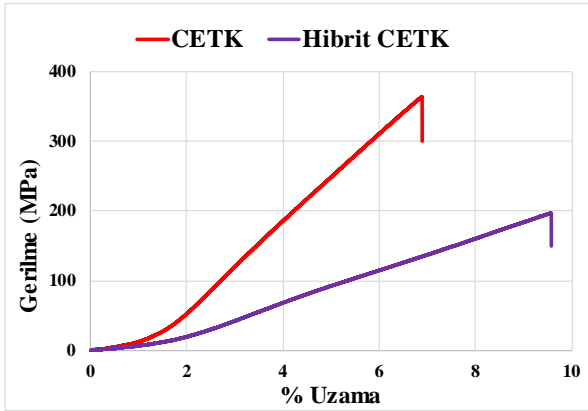
### İlerleme kuvveti, titreşim ve moment

Delik delme işlemleri esnasında oluşan ilerleme kuvvetleri ve moment değerleri *Kistler* marka *9257B model* dinamometre vasıtasıyla, kompozitlerin delinmesinde oluşan titreşimler ise *NI-9230* aparatı yardımıyla hesaplanmıştır.

### TARTIŞMA

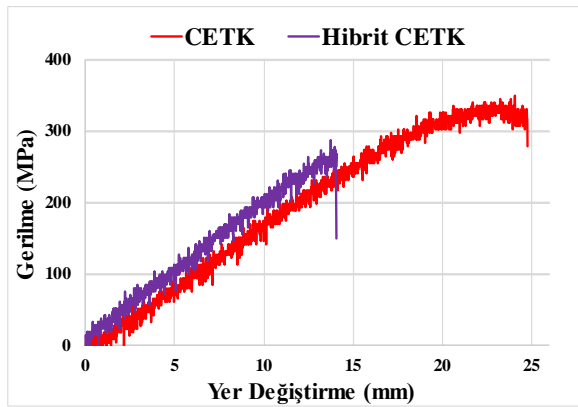
#### Çekme ve eğme deney sonuçları

Epoksi reçineli kompozitlerde dolgu parçacıklarının matris içinde homojen dağılması ve matris tarafından iyice ıslatılması mekanik özellikler üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. Dolgusuz CETK ve %7,5 B<sub>4</sub>C+%7,5 Gr dolgulu hibrit kompozitin çekme dayanım grafiği Şekil 1'de verilmiştir. B<sub>4</sub>C ve Gr dolgularının CETK'nin çekme dayanımını düşürdüğü görülmüştür. Dolgusuz CETK'nin çekme dayanımı 363 MPa iken, hibrit kompozitin çekme dayanımı 197 MPa'a düşerek çekme dayanımında %54'lük bir kayba neden olmuştur. Uygulanan çekme yükü önce matris çatlamasına neden olur, daha sonra oluşan gerilim elyaf ve dolgu parçacıklarına transfer edilir. Dolgu parçacıklarının reçine içinde homojen bir dağılıma sahip olmaması ve reçine ile dolgu arasındaki zayıf arayüzey bağlanması dolguların yük taşıma kapasitesini düşürür ve mekanik özellikleri kötüleştirir [34, 35]. Ayrıca dolguların sahip olduğu keskin köşeli geometrik şekilden dolayı matris içinde çatlak oluşumu destekleyerek gerilme yığılma noktaları oluşturmaktadır ve çekme dayanımını düşürebilmektedir [11]. Dolgu ilavesinin mekanik özelliklerde artış sağlayabilmesi parçacıkların homojen dağılımına ve elyaflardaki hidrojen bağlarını güçlendirmesine atfedilebilir [36]. Optimum bir orana kadar dolgular, elyaf takviyeli kompozitlerin çekme dayanımlarına katkı sunarken, bu oranın aşılması topraklanmaya, yetersiz matris ıslatılmasına ve mekanik özelliklerin düşmesine neden olmaktadır [13]. Deneysel sonuçlar yapılan benzer çalışmalarla paralellik arz etmektedir [37-39]. Anjum ve ark. [37] SiO<sub>2</sub> dolgulu CETK'lerde dolgu oranı artışının ve dolgu ilavesinin, kompozitin çekme dayanımını düşürdüğünü belirtmişlerdir. Fathy ve ark. [39] SiO<sub>2</sub> dolgulu elyaf takviyeli kompozitlerde çekme dayanımının %0,5 dolgu oranına kadar arttığını, bu oranın üzerine çıkıldığında ise dayanımın düşme trendine girdiğini belirlemişlerdir.



Şekil 1. Hibrit dolgulu ve dolgusuz kompozitlerin çekme dayanımları

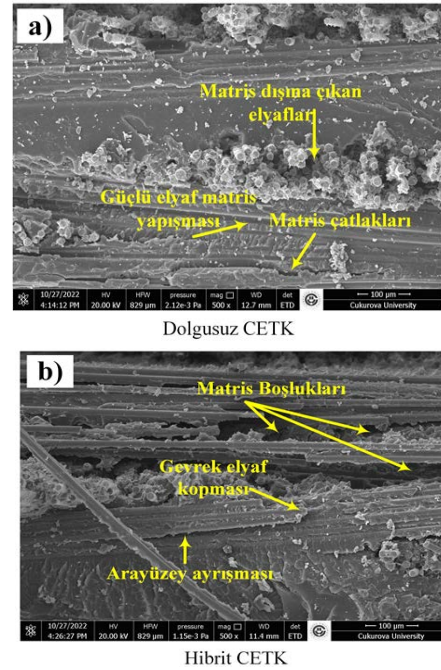
Şekil 2'de dolgusuz ve B<sub>4</sub>C/Gr CETK'lerin eğme dayanımı grafiği verilmiştir. B<sub>4</sub>C ve Gr dolgusunun CETK'lerin eğme dayanımını düşürdüğü görülmektedir. Dolgusuz kompozit ve B<sub>4</sub>C/Gr dolgulu hibrit CETK'lerin eğilme dayanımları sırasıyla 350 MPa ve 287 MPa olarak elde edilmiştir. Dolguların kompozit yapıda belirli bölgelere yığılması yeterli homojen bir yapı sağlayamaması, yük taşıma kapasitesini düşürmüştür. Hossain ve ark. [40] CETK'lerde yüksek dolgu oranlarının matris içinde farklı bölgelerde mikro topak alanları oluşturarak, kompozitin eğme dayanımını düşürdüğünü ifade etmişlerdir. Dolgu kullanarak eğilme dayanımında artış sağlanan çalışmalarda eğilme dayanımındaki iyileşmeyi, yeterli homojen dağılıma ve dolguların matrisle güçlü bağ kurmasına atfedilmiştir [41, 42].



Şekil 2. B<sub>4</sub>C/Gr hibrit dolgulu ve dolgusuz kompozitlerin eğme dayanımı grafiği

### SEM morfolojisi

Çekme testi sonrası dolgusuz ve hibrit kompozitlerin kırılma yüzeyleri Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekil 3a'da elyaf matrisinde daha az boşluk olduğu, matris ile elyaflar arasında arayüzey bağının daha iyi olduğu gözlenmektedir.



Şekil 3. Çekme testi sonrası numune kopma yüzeyleri

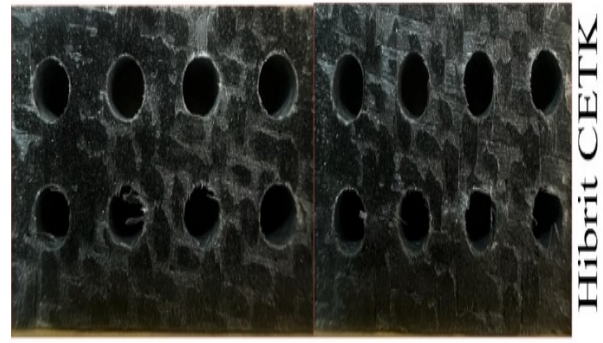
Matris süreksizliğinin daha az olması, kompozitin yük taşıma kapasitenin daha yüksek olmasını sağlamaktadır [43-44]. Şekil 3b'de matris/elyaf yapışmasının zayıf olduğu, gevrek elyaf kopmalarının ve boşlukların fazla olduğu görülmüştür. Matris içindeki süreksizliklerin kopma dayanımını düşürdüğü anlaşılmıştır.

### Delaminasyon ölçümlerinin değerlendirilmesi

Farklı kesme parametrelerinde dolgusuz ve B<sub>4</sub>C/Gr dolgulu CETK'lerin delik delme işlemi sonrası delik çıkışından delaminasyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Dolgusuz ve B<sub>4</sub>C/Gr dolgulu CETK'lerin delik delme sonrası ölçülen delaminasyon değişimleri Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 4 ve Şekil 5 incelendiğinde, ilerleme oranının artmasıyla delaminasyon değerlerinin azaldığı görülmüştür. Ghasemi ve ark. [45] ile Sunny ve ark. [46] yaptıkları çalışmalarda ilerlemenin artmasına bağlı olarak delaminasyon değerlerinin düştüğünü tespit etmişlerdir [45, 46]. Bu durum elde edilen sonuçlarla paralellik arz etmektedir. Kompozitin düşük ilerleme hızında delinmesi, delme süresini artırarak kompozit ile matkap arasındaki sürtünmenin artmasına ve delik çevresinde yüksek ısı oluşumuna yol açmaktadır. Delik çıkışındaki termal hasarların artışı, delaminasyon miktarı üzerinde negatif bir etki oluşturmuştur. Kesme hızının etkisi incelendiğinde, kesme hızı artışının delaminasyon değerlerini arttırdığı belirlenmiştir. Elde edilen bu sonuç literatürdeki çalışmalarla paralellik arz etmektedir [47, 48]. Kesme hızını artmasına bağlı olarak artan sürtünmeden dolayı sıcaklığın artması kompozitin matris tokluğunun düşürmesine neden olmaktadır. Ayrıca delik çapının büyümesine ve bundan dolayı delaminasyon değerlerinin yükselmesine yol açacaktır. Şekil 4 - Şekil 5'teki grafikler incelendiğinde, en düşük delaminasyon değeri hibrit CETK'te 1,09 mm, en yüksek delaminasyon

değeri ise dolgusuz CETK'te 1,23 mm olarak elde edilmiştir. Dolgusuz ve hibrit dolgulu CETK'lerin delik delme sonrası delaminasyon görüntüleri Şekil 6.'da verilmiştir. Şekil 6.'daki delaminasyonlar incelendiğinde dolgusuz kompozitte delik çevresinde belirgin şekilde deformasyonların dolgulu kompozite kıyasla daha fazla olduğu gözlenmiştir.

Hibrit dolgulu ve dolgusuz CETK'lerin delaminasyon değerleri karşılaştırıldığında, dolgusuz kompozitlerin delaminasyon değerlerinin hibrit dolgulu kompozitlerden daha yüksek çıktığı Şekil 4 - Şekil 5'teki grafiklerden anlaşılmaktadır. Hibrit kompozit içinde yer alan Gr dolgu parçacıklarının yağlayıcı özelliğe ve B<sub>4</sub>C dolgu parçacıklarının ise yüksek sertliğe sahip olmaları delaminasyon değerlerinin daha düşük olmasını sağlamaktadır. Delik delme sırasında kesici takım ile kompozit arasında oluşan sürtünmelerin, hibrit kompozitte bulunan dolgular sayesinde azalması, delik çıkışlarındaki deformasyonların daha az olmasını sağlamıştır. Şekil 6.'da verilen delik çıkışlarına ait görüntüler Şekil 4 ve Şekil 5'te verilen grafiklerin doğruluğunu teyit etmektedir. Şekil 4a'da 0,025 ilerleme hızında dolgusuz kompozitin delaminasyon faktörü 1,145 mm iken hibrit kompozitin delaminasyon değeri ise 1,09 mm olarak ölçülmüştür. Dolgu parçacıklarının CETK'in delaminasyon faktörünü yaklaşık %5 iyileştirdiği görülmüştür. En düşük delaminasyon değeri 0,2 mm/dev ilerleme oranında hibrit kompozitte 1,075 mm iken en yüksek değer ise 1,145 mm'dir.

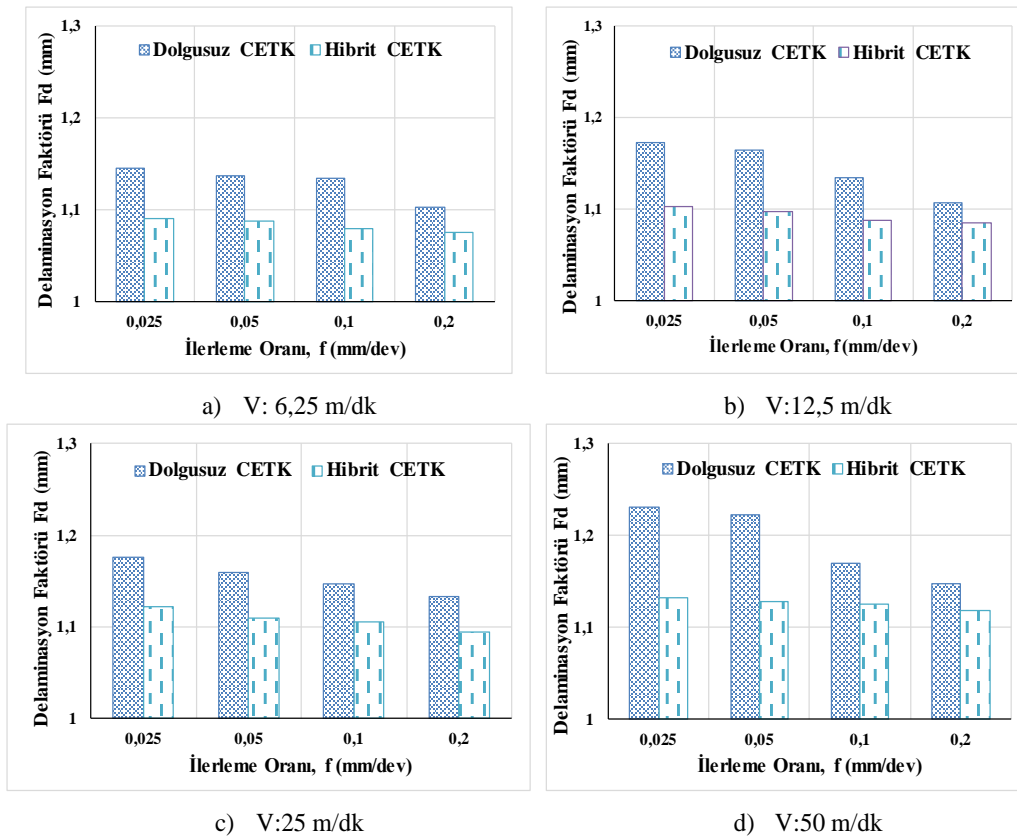


Hibrit CETK

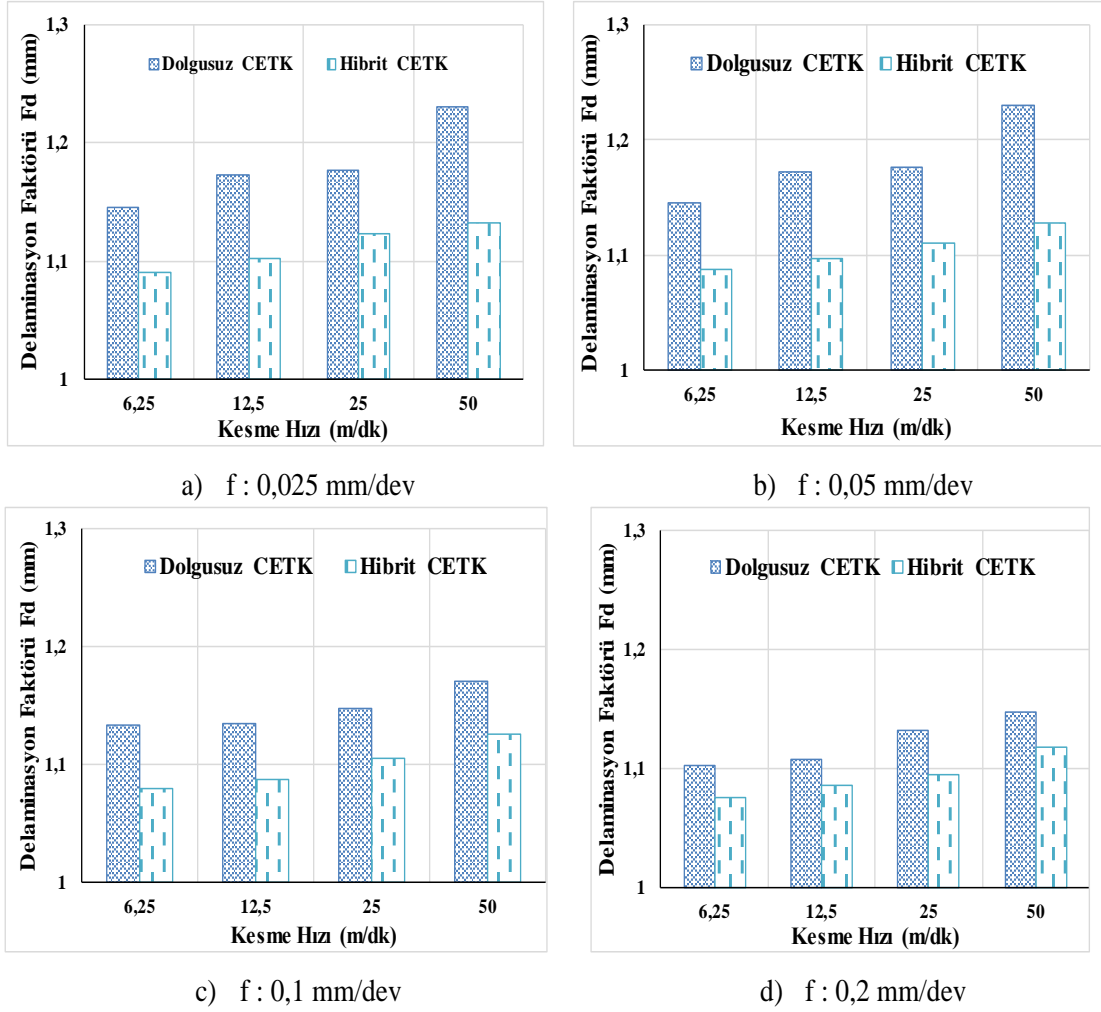


Dolgusuz CETK

Şekil 6. Dolgusuz ve hibrit dolgulu CETK'lerin delme sonrası deformasyon görüntüleri



Şekil 4. B<sub>4</sub>C/Gr dolgulu ve dolgusuz kompozitlerin farklı ilerleme oranlarında ölçülen delaminasyon değerleri



Şekil 5. Dolgusuz ve B<sub>4</sub>C/Gr dolgulu kompozitlerin kesme hızına bağlı delaminasyon miktarları

### Titreşim ve momentlerin değerlendirilmesi

Dolgulu ve dolgusuz CETK'lerine ait hem titreşim hem de moment değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Farklı kesme parametrelerinde dolgusuz ve B<sub>4</sub>C/Gr dolgulu CETK'lerin delik deleme esnasında oluşan moment değerleri birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. En yüksek ve en düşük işleme şartlarında bile moment değerleri arasında belirgin bir fark oluşmamıştır. Benzer durum titreşim değerlerinin ölçümlerinde de meydana gelmiştir. Tablo 1'de en düşük ve en yüksek moment ve titreşim değerlerinin elde edildiği işleme parametreleri sonuçları incelendiğinde, B<sub>4</sub>C/Gr CETK'lerin moment ve titreşim değerleri, dolgusuz CETK'lerin moment ve titreşim ölçümlerinden daha fazla çıktığı tespit edilmiştir. İlerleme hızının 0,025 mm/dev'den 0,2 mm/dev'e çıkarılması moment değerinin % 428 artışla 0,22'den 1,163'e çıkartmıştır. Aynı şartlarda titreşim değerleri ise 0,085210'dan 0,085459'a çıkarak % 0,29 bir artış meydana gelmiştir. Ortaya çıkan bu durum, dolgulu kompozit içerisinde yer alan B<sub>4</sub>C dolgu parçacıkların sert olması delme esnasında kesici takımı daha fazla

zorlayarak moment değerlerinin yüksek çıkmasına yol açmıştır. Metal malzemelere kıyasla, epoksi matrisli elyaf takviyeli kompozitlerin düşük sertliğe sahip olması ve sönümlenme gücünün yüksek olmasından ötürü, düşük miktarlarda titreşimler meydana gelmektedir.

Tablo 1. CETK'lerin titreşim ve moment değerleri

Kesme parametreleri (f: mm/dev; V: m/dak)	Malzeme tipi	Moment	Titreşim
f <sub>4</sub> : 0,2 ve V <sub>1</sub> : 6,25	Dolgusuz	1,163	0,085459
f <sub>1</sub> : 0,025 ve V <sub>4</sub> : 50	CETK	0,22	0,085210
V <sub>1</sub> : 6,25 ve f <sub>4</sub> : 0,2	B <sub>4</sub> C/Gr	2,93	0,087153
V <sub>4</sub> : 50 ve f <sub>1</sub> : 0,025	(Hibrit)	0,48	0,086950

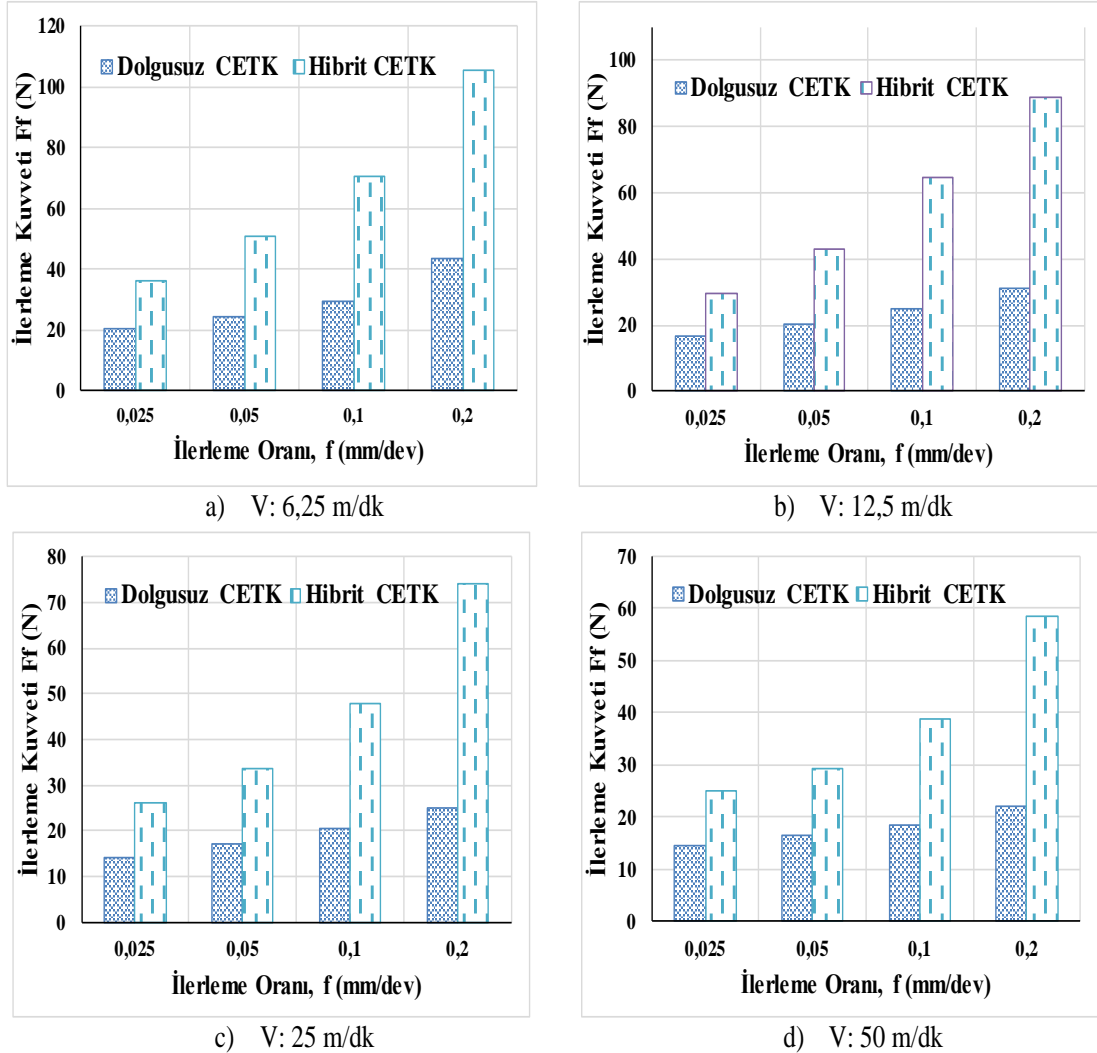
### İlerleme kuvvetlerinin değerlendirilmesi

Hibrit dolgulu ve dolgusuz CETK'lere 4 farklı ilerleme oranında ve 4 farklı kesme hızında 4 mm çapında delikler açılmıştır. Dolgusuz ve hibrit dolgulu CETK'lerin farklı işleme koşullarında delik delinirken kesici takımda meydana gelen ilerleme kuvvetleri Şekil 7 ve Şekil 8'de

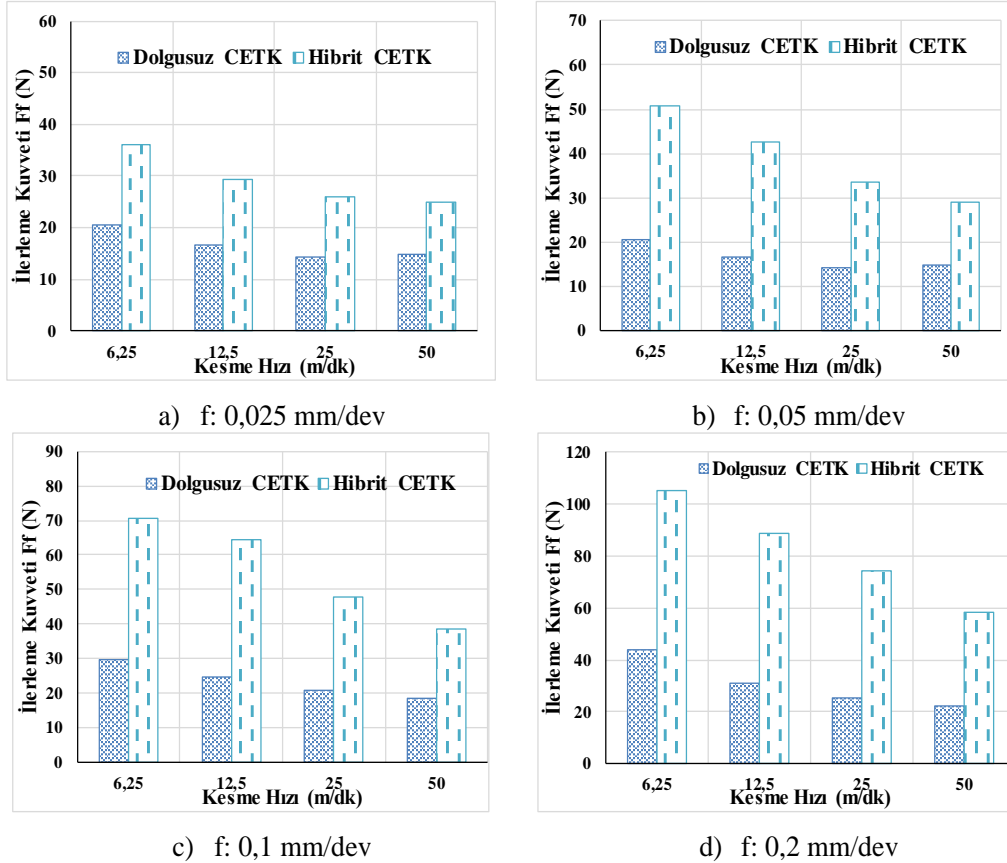


sunulmuştur. Şekil 7 ve Şekil 8 incelendiğinde, ilerleme oranının artmasıyla ilerleme kuvvetlerinin arttığı tespit edilmiştir. Ortaya çıkan bu sonuç literatürdeki çalışmalarla paralellik göstermiştir [12,49]. İlerleme oranı artışıyla birim zamandaki talaş kaldırma hacminin artması matkaba gelen yük artmaktadır. Bununla birlikte delme esnasında ilerlemeye bağlı olarak artan sürtünme ve talaş sıkışmaları ilerleme kuvvetlerinin yüksek çıkmasına katkı sağlamıştır. Hibrit ve dolgunsuz CETK'lerin delinmesinde, kesme hızı artışına bağlı olarak ilerleme kuvvetlerinde düşüş tespit edilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalar ile elde edilen sonuçlar örtüşmektedir [50]. Kompozit malzemenin delinmesi esnasında kesme hızının artışına bağlı olarak kesme bölgesindeki sıcaklığının artması kompozitin yumuşamasına yardımcı olacaktır. Bu da delme işlemini kolaylaştırarak ilerleme kuvvetlerinin azalmasına katkı

sağlayacaktır. Dolgunsuz ve hibrit dolgu CETK'lerin ilerleme kuvvetleri karşılaştırıldığında, hibrit kompozitlerin dolgunsuz CETK'lerden daha yüksek ilerleme kuvvetlerine sahip olduğu görülmüştür. Ortaya çıkan bu sonuç hibrit kompozitlerin yapısında bulunan B<sub>4</sub>C dolgu parçacıklarından kaynaklanmaktadır. B<sub>4</sub>C parçacıklarının sertliğinin yüksek olmasından ötürü delme sırasında matkabin daha fazla yüke maruz kalarak ilerleme kuvvetlerinin yükselmesine yol açmıştır. Şekil 7 ve Şekil 8 incelendiğinde en yüksek ilerleme kuvveti değeri hibrit CETK'den ( $f_4=0,2$  mm/dev ve  $V_1=6,25$  m/dk'da elde edilirken en düşük ilerleme kuvveti değeri ise dolgunsuz CETK'den ( $f_1=0,025$  mm/dev ve  $V_4=50$  m/dk'da kesme parametrelerinde elde edilmiştir.



Şekil 7. B<sub>4</sub>C/Gr dolgu ve dolgunsuz kompozitlerin farklı ilerleme oranlarında ölçülen delaminasyon değerleri



Şekil 8. Dolgusuz ve B<sub>4</sub>C/Gr dolgulu kompozitlerin kesme hızına bağlı delaminasyon miktarları

## SONUÇ

El yatırma yöntemiyle üretilen dolgusuz ve B<sub>4</sub>C/Gr dolgulu CETK hibrit kompozitlerin mekanik ve işlenebilirlik özelliklerinin incelenmesi sonucunda elde edilen önemli bulgulardan bazıları şunlardır.

- B<sub>4</sub>C ve Gr dolgularının CETK'in çekme dayanımını 363 MPa'dan 197 MPa'a düşürmüştür. Eğme dayanımı ise 350 MPa'dan 287 MPa'a düşürmüştür. Dolgu parçacıklarının kompozit yapıda homojen dağılmadığı ve yüksek dolgu oranlarının reçine içinde topaklanmaya neden olduğu anlaşılmıştır.
- Kopma yüzeylerinin SEM görüntülerinde dolgusuz kompozitlerdeki matris boşlukları, dolgulu hibrit kompozite göre daha azdır.
- En düşük delaminasyon değeri en düşük kesme hızı ve en yüksek ilerleme oranında hibrit CETK'te 1,09 mm olarak elde edilirken en yüksek delaminasyon değeri ise en yüksek kesme hızı ve en düşük ilerleme oranında dolgusuz CETK'te 1,23 mm olarak elde edilmiştir. Delaminasyon değerlerinin kesme hızı ile doğru orantılı, ilerleme hızı ile ters orantılı olduğu tespit edilmiştir.
- Hibrit kompozitlerin dolgusuz kompozitlere kıyasla daha düşük delaminasyon değerlerine ve daha yüksek ilerleme kuvvetlerine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Her iki kompozit türünde de titreşim ve moment değerleri birbirine yakın elde edilmiştir.

- Dolgusuz ve hibrit kompozitlerde yüksek ilerleme hızları ilerleme kuvvetlerinin yükselmesine neden olur iken, yüksek kesme hızları ise ilerleme kuvvetlerinin düşmesini sağlamıştır.
- En yüksek ilerleme kuvveti değeri en yüksek ilerleme ve en düşük kesme hızında hibrit CETK'den 105,2 N elde edilirken en düşük ilerleme kuvveti değeri ise en düşük ilerleme ve en yüksek kesme hızında dolgusuz CETK'den 14,7 N elde edilmiştir.

## TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu deneysel çalışmanın gerçekleştirilmesinde her türlü katkı ve desteklerini sağlayan Batman Üniversitesi BAP birimine (BTÜBAP-2021-YL-020 no'lu proje) teşekkür eder.

## KAYNAKÇA

- [1] Chan JX, Wong JF, Petrú M, et al. Effect of nanofillers on tribological properties of polymer nanocomposites: A review on recent development, *Polymers*.13(17)1-47, 2021.
- [2] Bhatia S, Khan S, Angra S. Effect of the content of silane-functionalized boron carbide on the mechanical and wear



- performance of B4C reinforced epoxy composites, *High Performance Polymers*. 33(10) 1165-1180, 2021.
- [3] Chelliah A. Mechanical properties and abrasive wear of different weight percentage of TiC filled basalt fabric reinforced epoxy composites, *Materials Research*. 22(2), 2019.
- [4] Albayrak M, Kaman MO, Bozkurt I. Experimental and numerical investigation of the geometrical effect on low velocity impact behavior for curved composites with a rubber interlayer, *Applied Composite Materials*. 30(2) 507-538, 2023.
- [5] Albayrak M, Kaman MO, Bozkurt I. The effect of lamina configuration on low-velocity impact behaviour for glass fiber/rubber curved composites, *Journal of Composite Materials*. 57(11) 1875-1908, 2023.
- [6] Suresha B, Chandramohan G, Rao PRS, Sampathkumaran P, Seetharamu S. Influence of SiC filler on mechanical and tribological behavior of glass fabric reinforced epoxy composite systems, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 26(6) 565-578, 2007.
- [7] Demir M. E., Çelik Y. H., and Kilickap E. Effect of matrix material and orientation angle on tensile and tribological behavior of jute reinforced composites, *Materials Testing*. 61(8) 806-812, 2019.
- [8] Cetkin E, Demir ME, Ergün RK. The effect of different fillers, loads, and sliding distance on adhesive wear in woven e-glass fabric composites, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part E*. 237(2) 418-429, 2023.
- [9] Demir ME, Investigation of the abrasive wear behavior of GFRP and CFRC with different parameters using taguchi and artificial neural networks method, *Politeknik Dergisi*. 1-1, 2024.
- [10] Bhatia S, Angra S, Khan S. A review on mechanical and tribological characterization of boron carbide reinforced epoxy composite, *Advanced Composite Materials*. 30(4) 307-337, 2021.
- [11] Abenojar J, Martínez MA, Velasco F, Pascual-Sánchez V, Martín-Martínez JM. Effect of boron carbide filler on the curing and mechanical properties of an epoxy resin, *The Journal of Adhesion*. 85(4-5) 216-238, 2009.
- [12] Raju BR, Suresha B, Swamy RP, Kanthraju BSG. Investigations on Mechanical and Tribological Behaviour of Particulate Filled Glass Fabric Reinforced Epoxy Composites, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. 01(04) 160-167, 2013.
- [13] Kharat WS, Sidhu JS. Development of Epoxy Based Composites Filled With Boron Carbide (B<sub>4</sub>C), Tungsten Disulphide (WS<sub>2</sub>) and Evaluation of its Mechanical Properties, *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics*. 6(1) 19-30, 2016.
- [14] Demir ME, Cetkin E, Ergün RK, Denizhan O. Tribological and mechanical properties of nanofilled glass fiber reinforced composites and analyzing the tribological behavior using artificial neural networks, *Polymer Composites*. 45(5) 4233-4249, 2024.
- [15] Kose H, Bayar I, Ergün RK. Experimental optimization of CuO and MgO hybrid nanoparticle reinforcement ratios to enhance fatigue life of GFRP composites. *Polymer Composites* 11125-11137, 2024.
- [16] Ergün RK, Köse H. Experimental optimization of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> microparticles ratio in epoxy layered glass fiber to improve tensile fatigue performance, *Journal of Composite Materials*. 57(16) 2563-2572, 2023.
- [17] Manjunath M, Renukappa NM, Suresha B. Influence of micro and nanofillers on mechanical properties of pultruded unidirectional glass fiber reinforced epoxy composite systems, *Journal of Composite Materials*. 50(8) 1109-1121, 2016.
- [18] Hariprasad P, Kannan M, Ramesh C, et al. Mechanical and Morphological Studies of Sansevieria trifasciata Fiber-Reinforced Polyester Composites with the Addition of SiO<sub>2</sub> and B<sub>4</sub>C, *Advances in Materials Science and Engineering*. 1-5, 2022.
- [19] Suresha B, Ramesh BN, Subbaya KM, Ravi Kumar BN, Chandramohan G. Influence of graphite filler on two-body abrasive wear behaviour of carbon fabric reinforced epoxy composites, *Materials & Design*. 31(4) 1833-1841, 2010.
- [20] Hulugappa B, Achutha M V., Suresha B. Effect of Fillers on Mechanical Properties and Fracture Toughness of Glass Fabric Reinforced Epoxy Composites. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering* 2016;04(01):1-14.
- [21] Başar G, Fedai Y, Kirli Akin H. Kompozit Malzemelerin Delme İşleminde İtme Kuvvetinin Taguchi Metodu ile Optimizasyonu ve Regresyon Analizi ile Tahmini, Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi. 35(4) 969-982. 2020.
- [22] Karaca F. Investigation of Drilling Parameters Effect On Delamination Factor in With Glass Fiber Reinforced Plastic Composites, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 28(2) 23-27, 2016.
- [23] Uzay Ç. Investigating the Wear Behaviors of Silane Coated Silica Filled Glass/Epoxy Nanocomposites, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 23(1) 260-269, 2023.
- [24] Çelik A, Lazoglu I, Kara A, Kara F. Investigation on the performance of SiAlON ceramic drills on aerospace grade CFRP composites, *Journal of Materials Processing Technology*. 223 39-47, 2015.
- [25] Mohan NS, Ramachandra A, Kulkarni SM. Influence of process parameters on cutting force and torque during drilling of glass-fiber polyester reinforced composites, *Composite Structure*. 71(3-4) 407-413, 2005.
- [26] Liu L, Qi C, Wu F, Zhang X, Zhu X. Analysis of thrust force and delamination in drilling GFRP composites with candle stick drills, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 95(5-8) 2585-2600, 2018.
- [27] Natarajan E, Markandan K, Sekar SM, et al. Drilling-Induced Damages in Hybrid Carbon and Glass Fiber-Reinforced Composite Laminate and Optimized Drilling Parameters, *Journal of Composites Science*. 6(10) 2022.
- [28] Tian J, Wu F, Zhang P, Lin B, Liu T, Liu L. The coupling effect and damage analysis when drilling GFRP laminates using candlestick drills. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 102(1-4):519-531. 2019.
- [29] Khashaba UA, Abd-Elwahed MS, Najjar I, et al. Heat-affected zone and mechanical analysis of GFRP composites with different thicknesses in drilling processes, *Polymers*. 13(14) 2021.
- [30] Erturk AT, Vatanserver F, Yazar E, Guven EA, Sinmazcelik T. Effects of cutting temperature and process optimization in drilling of GFRP composites, *Journal of Composite Materials*. 55(2) 235-249, 2021.
- [31] Jessy K, Satish kumar S, Dinakaran D, Seshagiri Rao V. Influence of different cooling methods on drill temperature in drilling GFRP, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76(1-4) 609-621, 2015.
- [32] Khashaba UA, El-Keran AA. Drilling analysis of thin woven glass-fiber reinforced epoxy composites, *Journal of Materials Processing Technology*. 249 415-425, 2017.
- [33] Zuo JP, Xie HP, Dai, F, Ju, Y. Three-point bending test investigation of the fracture behavior of siltstone after thermal treatment, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 70 133-143, 2014.
- [34] Latha PS, Rao MV. Investigation into Effect of Ceramic Fillers on Mechanical and Tribological Properties of Bamboo-Glass Hybrid Fiber Reinforced Polymer Composites, *Silicon*. 10(4) 1543-1550, 2018.
- [35] Ozsoy I, Demirkol A, Mimaroglu A, Unal H, Demir Z. The influence of micro- And nano-filler content on the mechanical properties of epoxy composites, *Strojniški vestnik Journal of Mechanical Engineering*. 61(10) 601-609, 2015.
- [36] Raju BR, Suresha RPSB, Bharath KN. The Effect of Silicon Dioxide Filler on the Wear Resistance of Glass Fabric Reinforced Epoxy Composites, *Advances in polymer science and technology - an international journal*. 2(4) 51-57, 2012.
- [37] Anjum N, Ajit Prasad SL, Suresha B. Role of silicon dioxide filler on mechanical and dry sliding wear behaviour of glass-epoxy composites, *Advances in Tribology*. 1-13, 2013.

- [38] Abuali Galehdari N, Kelkar AD. Effect of neutron radiation on the mechanical and thermophysical properties of nanoengineered polymer composites, *Journal of Materials Research*. 32(2) 426-434, 2017.
- [39] Fathy A, Shaker A, Hamid MA, Megahed AA. The effects of nano-silica/nano-alumina on fatigue behavior of glass fiber-reinforced epoxy composites. *Journal of Composite Materials* 51(12):1667-1679, 2017.
- [40] Hossain MK, Hossain ME, Hosur M V., Jeelani S. Flexural and compression response of woven E-glass/polyester-CNF nanophased composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 42(11) 1774-1782, 2011.
- [41] Raja T, Devarajan Y. Investigation on boron carbide nanofiller-influenced epoxy polymer composite for thermal barrier applications, *Biomass Convers Biorefinery*. 14 12623 2023.
- [42] Siddhartha, Patnaik A, Bhatt AD. Mechanical and dry sliding wear characterization of epoxy-TiO<sub>2</sub> particulate filled functionally graded composites materials using Taguchi design of experiment, *Materials & Design*. 32(2) 615-627, 2011.
- [43] Singh MM., Kumar H, Kumar GH, Sivaiah P, Nagesha KV, Ajay KM, Vijaya G. Determination of strength parameters of glass fibers reinforced composites for engineering applications, *Silicon*. 12 1-11, 2020.
- [44] Ou Y, Zhu D, Zhang H, Huang L, Yao Y, Li G, Mobasher B. Mechanical characterization of the tensile properties of glass fiber and its reinforced polymer (GFRP) composite under varying strain rates and temperatures, *Polymers*. 8(5) 1-16, 2016.
- [45] Ghasemi FA, Hyvadi A, Payganeh G, Arab NBM. Effects of drilling parameters on delamination of glass-epoxy composites, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 5(12) 1433-1440, 2011.
- [46] Sunny T, Babu J, Philip J. Experimental Studies on Effect of Process Parameters on Delamination in Drilling GFRP Composites Using Taguchi Method, *Procedia Materials Science*, 6:1131-1142, 2014.
- [47] Krishnaraj V, Prabukarthi A, Ramanathan A, et al. Optimization of machining parameters at high speed drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates, *Composite Part B Engineering*. 43(4) 1791-1799, 2012.
- [48] Melentiev R, Priarone PC, Robiglio M, Settineri L. Effects of Tool Geometry and Process Parameters on Delamination in CFRP Drilling: An Overview, *Procedia CIRP*. 45 31-34, 2016.
- [49] Bayraktar S, Turgut Y. Investigation of the cutting forces and surface roughness in milling carbon-fiber-reinforced polymer composite material, *Material Tehnology*. 50(4) 591-600, 2016.
- [50] Parasuraman S, Elamvazuthi I, Kanagaraj G, Natarajan E, Pugazhenti A. Assessments of process parameters on cutting force and surface roughness during drilling of aa7075/tib2 in situ composite, *Materials*. 14(7) 2021.




## Şebinkarahisar (Giresun) Bölgesinde Ekşi Karadut (*Morus nigra* L.) Yetiştirilen Arazilerin Topoğrafik Özelliklerinin Değerlendirilmesi

Bahadır ATMACA<sup>1</sup>, Mustafa CÜCE<sup>2</sup>, Hatice DUMANOĞLU<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Gıda Teknolojisi Bölümü, Şebinkarahisar Uygulamalı Bilimler Yüksekokulu, Giresun Üniversitesi, Giresun, Türkiye

<sup>2</sup> Gıda Teknolojisi Bölümü, Şebinkarahisar Uygulamalı Bilimler Yüksekokulu, Giresun Üniversitesi, Giresun, Türkiye

<sup>3</sup> Bahçe Bitkileri Bölümü, Ziraat Fakültesi, Ankara Üniversitesi, Ankara, Türkiye

✉: [bahadir.atmaca@giresun.edu.tr](mailto:bahadir.atmaca@giresun.edu.tr) <sup>1</sup> 0000-0002-4829-180X <sup>2</sup> 0000-0001-7406-171X <sup>3</sup> 0000-0002-7099-7630

Geliş (Received): 07.10.2024

Düzeltilme (Revision): 23.10.2024

Kabul (Accepted): 12.11.2024

### ÖZ

Bu çalışma, Giresun ili Şebinkarahisar ilçesinde doğal olarak yetişen Şebinkarahisar Karadut'unun (*Morus nigra* L.) ilçedeki yetiştiricilik kültürü ve potansiyelini belirlemek üzere yapılmıştır. Ekşi karadut ağaçlarında yaş tahmini üzerine bilimsel bir dendrokronolojik çalışma mevcut olmadığından belirlenen 69 adet karadut ağacından 47 adedinin Cumhuriyet öncesinden kalma anıtsal nitelikte antik ekşi karadut ağacı olduğu belirlenmiştir. Anıt ağaç niteliği taşıdığı saptanan asırlık ağaçlar Şebinkarahisar ilçesinin mahalle ve köylerine yayılmış durumda olmasına rağmen yoğun olarak bağlar bölgesi olarak adlandırılan Avutmuş, Kırkgöz, Biroğul ve İkiöğul mahallelerinde yer almaktadır. İlçede ekşi karadut yetiştirilen arazilerin yükseltileri GPS cihazıyla, eğim ve bakı değerleri de ArcGIS-ArcMap 10.3 programı kullanılarak hazırlanan haritalar ile belirlenmiştir. Elde edilen arazi topoğrafyasına ilişkin bu verilerin ilerleyen zamanda Şebinkarahisar koşullarında ekşi karadut (*Morus nigra* L.) yetiştiriciliğine uygun arazilerin haritalanmasında kullanılabileceği düşünülmektedir. 950-1500 m aralığındaki yükselti değerlerine sahip, % 6-20 (orta) eğim sınıfında yer alan ve güneydoğu, güney, güneybatı, doğu, kuzeydoğu, batı ve kuzey (0°-22.5°) bakılı arazilerin ekşi karadut yetiştiriciliği için uygun olacağı değerlendirilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Urmu Dutu, Tıbbi ve Aromatik Bitki, Anıtsal Ağaç, Harita

## Evaluation of the Topographic Features of Lands Cultivating Sour Black Mulberry (*Morus nigra* L.) in Şebinkarahisar (Giresun) Region

### ABSTRACT

This study was conducted to determine the cultivation culture and potential of black mulberry tree (*Morus nigra* L.); growing naturally in Şebinkarahisar district of Giresun province. Since there is no scientific dendrochronological study to determine the age of sour black mulberry trees, it was determined that 47 of the 69 identified sour black mulberry trees are monumental old trees from the pre-republican period. Although the centuries-old trees identified as monumental are spread across the neighborhoods and villages of Şebinkarahisar district, they are mostly concentrated Avutmuş, Kırkgöz, Biroğul, and İkiöğul neighborhoods, which are, known as a vine-growing area. The elevations of the areas where sour black mulberries are grown in the district were determined using a GPS device, and the slope and aspect values were determined using maps created with the ArcGIS-ArcMap 10.3 program. It is assumed that these data on the land topography obtained can be used in the future for mapping areas suitable for the cultivation of sour black mulberry (*Morus nigra* L.) under the conditions of Şebinkarahisar. It is considered that areas with elevation values between 950-1500 meters, slope class of 6-20% (moderate), and aspects of southeast, south, southwest, east, northeast, west, and north (0°-22.5°) are suitable for sour black mulberry cultivation.

**Keywords:** Urmu Mulberry, Medicinal and Aromatic Plant, Monumental Tree, Map

### GİRİŞ

Ekşi karadut (*Morus nigra* L.), kapalı tohumlu bitkiler arasında en yüksek kromozom sayısına sahip olan ve uzun yıllar yaşayabilen bir türdür. Ekonomik açıdan

önemli bir potansiyele sahip olan bu tıbbi aromatik tür, modern bahçecilik uygulamalarıyla entegre edilememiştir [1]. Karadut (*M. nigra*) çoğaltılması zor olan türlerdendir [2]. Son yıllarda koyu renge sahip meyvelerin sağlık açısından daha faydalı içeriklere sahip

olduğu bilgisiyle, bu türlere olan ilgi artmıştır. Bu meyve türlerinden biri de karaduttur. İnsan beslenmesindeki önemi nedeniyle karadut meyvelerine özellikle de meyve suyuna talebi artmaktadır. Bu da karadut üretimini teşvik etmektedir. Dut üretimini arttırmak için Urmu dut (ekşi karadut) genotipleri ile kapama bahçeler kurulabilir [3]. Türkiye'nin doğal genetik kaynakları arasında yer alan karadut, cazip koyu kırmızı rengi, sulu yapısı ve eşsiz aromasıyla sevilen bir meyvedir. Karadut dünyada geniş bir yayılıma sahiptir. Anadolu'nun yanı sıra Kuzey İran, Azerbaycan, Suriye, Çin ve Ermenistan gibi bölgelerde de yetiştirilmektedir. Yaygın olmamakla beraber Avrupa, ABD, Avustralya ve Hindistan'da da karadut yetiştiriciliği yapılmaktadır [4]. Şebinkarahisar'da 2012 senesinde Giresun İl Özel İdaresi ile Giresun İl Tarım ve Orman Müdürlüğü tarafından ortaklaşa kurulan seralarda ekşi karadut, Şebin cevizi, çam ağacı ve kızılçık yetiştirilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda toplamda 5 adet plastik örtülü ve yay çatılı meyve fidanı serası bulunmaktadır. Bu seralarda Şebin cevizi başta olmak üzere bu türlerin bölgede yaygınlaştırılması hedeflenmekte ve bölge çiftçilerinin bu konu ile ilgili teşvik edilmesi sağlanmaktadır [5].

Coğrafik bilgi sistemleri, oldukça gelişmiş bir teknolojidir. Bir CBS veri tabanı sisteminde, konumsal bilgi veya koordinat sistemi ile tarla sınırları, verim, pH, bitki besin elementi düzeyleri vb. gibi tarlaya ve bitkiye ait özellikler (veri bileşenleri) yer alır [6]. CBS teknolojilerinin son senelerde etkin biçimde kullanımı araştırma sonuçlarının hızlı ve güvenilir bir biçimde ortaya konulmasına katkı sunmaktadır. Alternatif üretim sahalarının belirlenmesi ve tarımsal sürdürülebilirliğin sağlanması açısından ürün çeşitliliğinin artırılması yönünde yapılacak arazi araştırmalarında CBS teknolojilerinden yararlanmak büyük önem taşımaktadır [7].

Türkiye'de yüzey şekilleri, bölgesel ve yöresel olarak iklim koşullarının değişmesinde son derece etkilidir. İklimde meydana gelen bu değişiklikler, özellikle dağ kuşaklarımızda bitki örtüsü üzerinde etkili olmakta ve farklı fizyonomik görünüme sahip değişik ekolojik koşullarda yetişen bitki topluluklarının gelişimini etkilemektedir. Yüksekliğin artmasıyla birlikte sıcaklık ve bağıl nem azalırken, genellikle yağış, buharlaşma ve güneşten gelen radyasyonun şiddeti artar. Ayrıca rüzgarın hızı da artar ve günlük sıcaklık farkları yükselir. Bunun yanında yüksekliğin artmasıyla birlikte vejetasyon ve toprak oluşumu (pedojenez) süresi kısılır. Topoğrafyada yükseklik koşullarıyla beraber bakı ve eğim derecesi, ülkemizde kısa mesafelerde farklı ortamların oluşmasına olanak sağlamıştır. Güneye bakan yamaçlarda, birçok enlem derecesine sahip güneydeki bitkilerin yetişmesine olanak tanırken, kuzeye bakan yamaçlarda nem ihtiyacı yüksek bitkiler gelişmektedir. Özellikle dağ kuşaklarımızda yer yer dar ve derin vadiler oluşturan akarsular, çok engebeli ve eğimli bir topoğrafyanın oluşmasına katkı sağlamıştır [8].

Edizer ve ark. [2], denizden 998 m yükseklikteki araştırma alanında yapmış oldukları çalışmada, 2014 yılının Mart ayında Malatya Meyvecilik Araştırma

İstasyonu'ndan temin ettikleri karadut (*M. nigra*) odun çeliklerini köklendirme serasına dikmişler ve odun çeliklerinin köklenmesi üzerine farklı büyüme düzenleyicisi doz ve kombinasyonlarının etkilerini araştırmışlardır. Araştırma sonunda karadutların çelikle ticari olarak çoğaltılabileceği sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte literatürde bu konuda elde edilen farklı sonuçların genetik farklılıklar, köklendirme ortamındaki ekolojik koşullar, çelik alma zamanı gibi faktörlerin bir sonucu olabileceği belirtilmiştir. Sütyemez [3], Kahramanmaraş ili Merkez ilçede doğal yetişen karadut (Urmu dut) genotipi ve bu genotipten doku kültürü yoluyla çoğaltılan 5 bitkinin bazı pomolojik, fenolojik ve morfolojik özelliklerini belirlemek amacıyla yaptığı araştırma sonucunda urmu dut genotipinin bitkisel ve meyve kalitesi açısından önemli özelliklere sahip olduğunu tespit etmiştir. Araştırmanın en önemli bulgularından biri, klonal olarak çoğaltılan bitkilerde gençlik kısırılık devresinin kısalığı ve bu bitkilerin üç yıl içinde meyve vermeye başlamasıdır. Çalışmada, klonal olarak çoğaltılan bitkiler ile ana ebeveyn bitkilerin özelliklerinin beklendiği gibi birbirine çok yakın olduğu tespit edilmiştir. Cüce [9], Şebinkarahisar ilçesindeki arazi incelemelerinde tam meyveye yatmış sağlıklı bir *M. nigra* ağacından ortalama olarak yıllık 200 kg civarında ürün alındığını belirtmiştir. Ancak mevsim değişiklikleri, ağaç bakımındaki yetersizlik ve ilçede yetiştirilen karadut ağaçlarının tam verime yatma süresinin oldukça uzun olması gibi nedenlerden dolayı verim oranının düşüş gösterdiği belirtilmiştir.

Bu çalışmada, Giresun ilinin Şebinkarahisar ilçesinde ekşi karadut (*M. nigra* L.) yetiştirilen mevcut arazilerin topoğrafik özelliklerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bununla birlikte, bu çalışmadan elde edilecek veriler kullanılarak, Coğrafi Bilgi Sistemleri yazılımlarının yardımıyla ilerleyen dönemlerde Şebinkarahisar ilçesinde ekşi karadut için uygun dikim alanlarının belirlenip haritalandırılması planlanmaktadır.

## MATERYAL ve YÖNTEM

Karadeniz Bölgesi'nin Doğu Karadeniz Bölümü'nde bulunan Şebinkarahisar ilçesi, Doğu Karadeniz Dağlarının güney yamaçlarında ve Yeşilirmak'ın kolu olan Kelkit Çayı vadisinin engebeli bir kesiminde yer almaktadır [10]. Şebinkarahisar'da meyve yetiştiriciliği çok önemli bir yere sahiptir [11]. Şebinkarahisar'ın 1965-2012 yılları arasındaki 48 yıllık uzun yıllar iklim verileri ortalamalarına göre yıllık ortalama toplam yağış miktarı 583.5 mm, yıllık ortalama sıcaklık değeri 9.0 °C ve yıllık ortalama nispi nemi % 61.05 olarak belirlenmiştir [12]. Türkiye'deki dut üretimi yıllık 60.000 tondur. Bu miktarın % 95'ini beyaz dut, kalan % 5'ini kırmızı ve karadut oluşturmaktadır. Dut bitkisi, ılıman iklimden subtropik iklime kadar değişen farklı ekolojik koşullarda iyi bir gelişim gösterir. Optimum sıcaklık aralığı 24-28 °C'dir ve yıllık yağış miktarı 600-2500 mm civarındadır. Verimli topraklarda 10 gün aralıklarla, killi topraklarda ise 15 gün aralıklarla sulama ister. % 65-80 civarındaki

atmosferik nem oranı, dut yetiştiriciliği için idealdir. Güneş ışığı, gelişme ve yaprak kalitesi için önemli bir unsurdur. Deniz seviyesinden 1400 metre yükseltiyeye kadar yetiştirilebilen dut, tuzlu topraklar hariç, toprak ve iklim şartları açısından seçici değildir. Sığ topraklar önerilmez. Derin topraklarda iyi gelişmekle birlikte kireçli, kuru, kurak ve kumlu topraklarda yetiştirmeye elverişlidir. Optimum toprak pH'sı 6.5-7 olmalıdır. Çok iyi drene olan, tercihen derin, verimli ve kumlu topraklar dut yetiştiriciliği için idealdir [4].

TÜİK [13] verilerine göre 2004-2022 yılları arasında Giresun-Şebinkarahisar'daki dut üretimi Tablo 1 de verilmiştir. İlçede ağaç sayısı artmış ancak verim ve üretim dalgalı bir seyir izlemiştir. Bunun nedenlerinin başında ilçede yaşanan iklimsel dalgalanmalar gelmektedir. En yüksek üretim miktarı 2214 ton ile 2019 yılında elde edilmiştir (Tablo 1). Cüce [9], *M. nigra* için tüm Türkiye'de olduğu gibi Şebinkarahisar ilçesinde kapama bahçelerin bulunmaması ve üreticilerin ürünlerini bireysel olarak pazara sunmaları nedeniyle üretim miktarlarının tam olarak bilinmediğini belirtmiştir.

**Tablo 1.** 2004-2022 yılları arasında Şebinkarahisar ilçesinde dut üretimine ilişkin veriler

Yıllar	Meyveler, İçecek ve Baharat Bitkileri				
	Dut				
	Meyve Verim Veren Yaşta Ağaç Sayısı	Meyve Vermeyen Yaşta Ağaç Sayısı	Toplu Meyvelik Alan (Dekar)	Verim (Kg/ Meyve Veren Ağaç)	Üretim Miktarı (Ton)
2004	20000	4300	1350	8	160
2005	20000	4300	1280	4	80
2006	2000	4300	1280	40	80
2007	20000	4000	1280	20	400
2008	20000	4000	1280	20	400
2009	20000	4000	1280	20	400
2010	2000	4000	1280	20	40
2011	2500	3500	1500	20	50
2012	2500	3500	1522	20	50
2013	2500	3500	1534	20	50
2014	2500	3500	120	8	20
2015	36000	9000	120	20	720
2016	36000	9000	120	2	72
2017	36880	7320	120	18	664
2018	37000	7525	122	19	700
2019	37000	7525	122	60	2218
2020	37000	7525	122	59	2189
2021	37000	7525	122	2	74
2022	37000	7525	122	30	1110

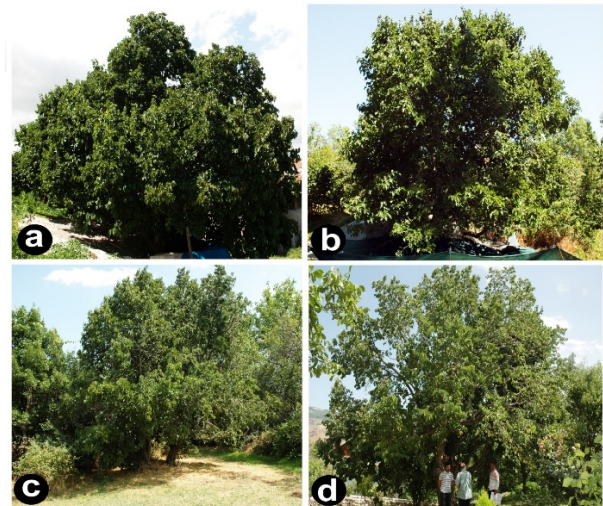
Kaynak: TÜİK [13]

Giresun ilinin Şebinkarahisar ilçesinde bazı asırlık ekşi karadut (*M. nigra*) ağaçlarının görselleri Şekil 1'de verilmiştir. İlçede ekşi karadut yetiştirilen arazilerin koordinat bilgileri ve denizden yükseklik değerleri, 1-3 metre hassasiyetli Magellan eXplorist 610 marka GPS cihazı ile tespit edilmiş ve arazilerin yer aldığı mevkiiler (köy/mahalle) ile birlikte Tablo 2'de gösterilmiştir. Arazi çalışmaları 27.07.2023 ile 10.08.2023 tarihleri arasında yapılmıştır. Araştırma kapsamında İkiöğül, Avutmuş, Bülbül, Kırkgöz, Kavaklar, Tamzara, Büroğül, Kütküt, Akbudak, Yavuz Selim ve Kızılca Mahalleleri ile

Çağlayan ve Saraycık Köylerinden toplamda 69 adet ekşi karadut ağacı değerlendirilmiştir. Ekşi karadut ağaçlarının yaşlarının tahmini üzerine bilimsel bir dendrokronolojik araştırma mevcut olmadığı için değerlendirilen 69 adet ekşi karadut ağacından 47 adedinin Cumhuriyet öncesinden kalma anıtsal nitelikte antik ekşi karadut ağacı olduğu belirlenmiştir. Gürcan [1], Türkiye'de 2018-2021 yılları arasında ekşi karaduta ilişkin bir sörvey gerçekleştirmiştir. Anıtsal nitelikte olan, Cumhuriyet öncesinden kalma, 200'ün üzerinde antik ekşi karadut ağacı belirlemiştir.

Şebinkarahisar ilçesinde ekşi karadut yetiştirilen arazilerin eğim ve bakı haritalarının yapımında USGS [14]'den ulaşılan sayısal yükseklik modeli (DEM) verisi (SRTM 1 Arc-Second Global/~30 meters) ve Anonim [15]'den yararlanılmıştır. Hazırlanan haritaların datum/projeksiyon dönüşümleri WGS 1984 UTM Zone 37 N olacak şekilde yapılmıştır. DEM verisi için hücre boyutu (X, Y) 30 m, 30 m olarak ayarlanmıştır. Haritalar ArcGIS-ArcMap 10.3 programı kullanılarak hazırlanmıştır. GPS ile tespit edilen örnek noktaları, KML dosyası biçiminde hazırlanarak ArcGIS-ArcMap 10.3 programındaki ArcToolbox-Conversion Tools yardımıyla eğim ve bakı haritalarının içerisine yerleştirilmiştir.

Şebinkarahisar Karadutu; Şebinkarahisar Ziraat Odası tarafından, işlenmiş ve işlenmemiş meyve ve sebzeler ile mantarlar ürün grubunda, 885 tescil numarasıyla 13.09.2021 tarihinde tescil edilmiştir. Coğrafi işaret olarak tescil edilen Şebinkarahisar Karadutu için tescil belgesinde yer alan bilgiler Tablo 3'te verilmiştir [16]. Şebinkarahisar'daki bazı asırlık ekşi karadut ağaç gövdelerinin görselleri Şekil 2'de; asırlık ekşi karadut ağaçlarından karadut pekmezi üretimi aşamalarına ilişkin görseller de Şekil 3'te sunulmuştur.



**Şekil 1.** Şebinkarahisar'da yetiştirilen asırlık ekşi karadut ağaçları, a) Kadioğlu Mahallesi, b) Kavaklar Mahallesi, c) Avutmuş Mahallesi, d) Büroğül Mahallesi

**Tablo 2.** Şebinkarahisar ilçesinde ekşi karadut (*M. nigra*) ağaçlarının bulunduğu konumlara ait bilgiler

Ör. No.	Koordinatlar	Mevki	Den. Yük. (m)	Ör. No.	Koordinatlar	Mevki	Den. Yük. (m)
7	40°17'26"K 38°27'40"D	İkioğul M.	1031	4	40°17'26"K 38°27'36"D	Kırkgöz M.	1049
8	40°17'28"K 38°27'40"D	İkioğul M.	1037	11	40°17'34"K 38°27'29"D	Kırkgöz M.	1061
37	40°17'35"K 38°27'39"D	İkioğul M.	1048	12	40°17'32"K 38°27'30"D	Kırkgöz M.	1053
38	40°17'37"K 38°27'40"D	İkioğul M.	1058	13	40°17'31"K 38°27'28"D	Kırkgöz M.	1074
39	40°17'38"K 38°27'41"D	İkioğul M.	1047	14	40°17'31"K 38°27'29"D	Kırkgöz M.	1063
40	40°17'37"K 38°27'42"D	İkioğul M.	1039	24	40°17'32"K 38°26'28"D	Kavaklar M.	1211
41	40°17'40"K 38°27'34"D	İkioğul M.	1059	25	40°17'33"K 38°26'26"D	Kavaklar M.	1207
42	40°17'43"K 38°27'34"D	İkioğul M.	1054	26	40°17'27"K 38°26'25"D	Kavaklar M.	1213
57	40°18'15"K 38°27'34"D	İkioğul M.	1032	27	40°17'32"K 38°26'16"D	Kavaklar M.	1244
58	40°18'09"K 38°27'55"D	İkioğul M.	995	28	40°17'32"K 38°26'13"D	Kavaklar M.	1244
59	40°18'02"K 38°27'56"D	İkioğul M.	1004	30	40°17'38"K 38°26'41"D	Kavaklar M.	1170
60	40°17'42"K 38°27'50"D	İkioğul M.	1003	31	40°19'39"K 38°26'12"D	Tamzara M.	1225
43	40°18'39"K 38°28'16"D	Avutmuş M.	1022	32	40°19'42"K 38°26'16"D	Tamzara M.	1236
44	40°18'40"K 38°28'18"D	Avutmuş M.	1018	33	40°19'41"K 38°26'18"D	Tamzara M.	1229
45	40°18'48"K 38°28'22"D	Avutmuş M.	1040	34	40°19'40"K 38°26'08"D	Tamzara M.	1249
46	40°18'49"K 38°28'22"D	Avutmuş M.	1041	35	40°19'33"K 38°26'01"D	Tamzara M.	1275
47	40°18'48"K 38°28'25"D	Avutmuş M.	1048	36	40°19'31"K 38°26'12"D	Tamzara M.	1220
48	40°18'49"K 38°28'04"D	Avutmuş M.	1103	5	40°17'25"K 38°27'41"D	Biroğul M.	1043
49	40°18'48"K 38°28'01"D	Avutmuş M.	1089	6	40°17'25"K 38°27'40"D	Biroğul M.	1032
50	40°18'45"K 38°28'02"D	Avutmuş M.	1072	9	40°17'29"K 38°27'46"D	Biroğul M.	1027
51	40°18'28"K 38°27'35"D	Avutmuş M.	1056	10	40°17'16"K 38°27'41"D	Biroğul M.	1037
52	40°18'29"K 38°27'35"D	Avutmuş M.	1063	61	40°17'18"K 38°27'47"D	Biroğul M.	1022
53	40°18'25"K 38°27'39"D	Avutmuş M.	1028	62	40°17'46"K 38°18'15"D	Çağlayan K.	1087
15	40°17'27"K 38°25'20"D	Bülbül M.	1385	63	40°17'48"K 38°18'21"D	Çağlayan K.	1108
16	40°17'13"K 38°25'22"D	Bülbül M.	1370	64	40°17'52"K 38°18'17"D	Çağlayan K.	1116
17	40°17'16"K 38°25'17"D	Bülbül M.	1369	65	40°17'49"K 38°18'19"D	Çağlayan K.	1097
18	40°17'25"K 38°25'12"D	Bülbül M.	1388	54	40°18'19"K 38°27'12"D	Kütüküt M.	1072
19	40°17'22"K 38°25'04"D	Bülbül M.	1427	55	40°18'23"K 38°27'10"D	Kütüküt M.	1079
20	40°17'24"K 38°25'15"D	Bülbül M.	1395	56	40°18'14"K 38°27'09"D	Kütüküt M.	1077
21	40°17'23"K 38°25'17"D	Bülbül M.	1398	67	40°16'46"K 38°26'09"D	Akbudak M.	1167
23	40°17'42"K 38°25'26"D	Bülbül M.	1382	68	40°16'47"K 38°26'10"D	Akbudak M.	1172
29	40°17'17"K 38°25'23"D	Bülbül M.	1373	1	40°17'20"K 38°24'37"D	Yavuz Selim M.	1411
69	40°17'17"K 38°25'23"D	Bülbül M.	1373	22	40°17'08"K 38°25'22"D	Kızılca M.	1361
2	40°17'26"K 38°27'33"D	Kırkgöz M.	1067	66	40°16'29"K 38°19'21"D	Saraycık K.	1064
3	40°17'26"K 38°27'34"D	Kırkgöz M.	1054				

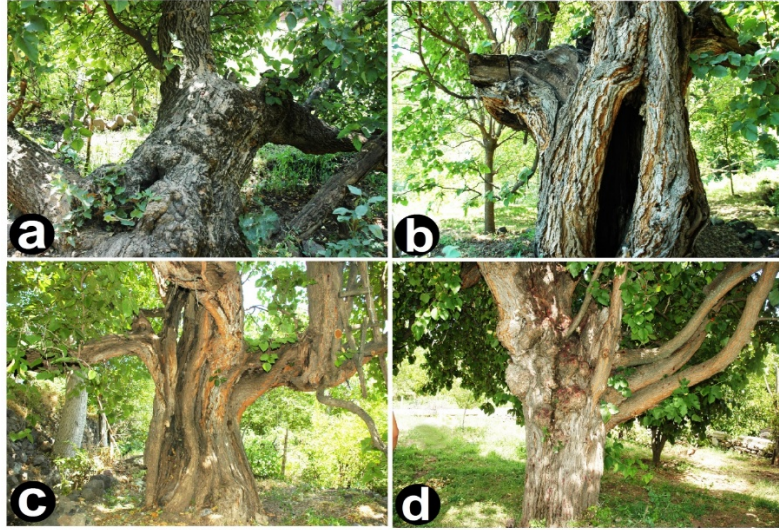
Ör. No.: Örnek Numarası; Den. Yük.: Denizden Yükseklik; m: Metre; K: Kuzey; D: Doğu; M: Mahalle; K: Köy



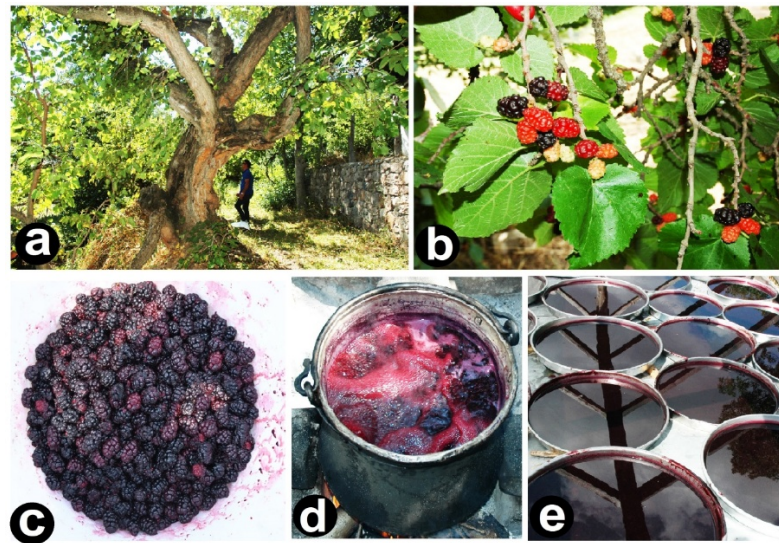
**Tablo 3.** Coğrafi işaret olarak tescillenen Şebinkarahisar Karadutu için tescil belgesinde belirtilen bilgiler

<b>Tescil No</b>	885
<b>Tescil Tarihi</b>	13.09.2021
<b>Başvuru No</b>	C2020/044
<b>Başvuru Tarihi</b>	06.02.2020
<b>Coğrafi İşaretin Adı</b>	Şebinkarahisar Karadutu
<b>Ürün / Ürün Grubu</b>	Karadut / İşlenmiş ve işlenmemiş meyve ve sebzeler ile mantarlar
<b>Coğrafi İşaretin Türü</b>	Menşe adı
<b>Tescil Ettiren</b>	Şebinkarahisar Ziraat Odası
<b>Tescil Ettirenin Adresi</b>	Bülbül Mah. İnönü Cad. No:9 Şebinkarahisar GİRESUN
<b>Coğrafi Sınır</b>	Giresun ili Şebinkarahisar ilçesi Şebinkarahisar Karadutu ibaresi ve menşe adı amblemi ürünün veya ambalajının üzerinde yer alır. Ürünün veya ambalajının üzerinde kullanılmadığında, Şebinkarahisar Karadutu ibaresi ve menşe adı amblemi işletmede kolayca görülecek şekilde bulundurulur.
<b>Kullanım Biçimi</b>	

Kaynak: TÜRKPATENT [16]



**Şekil 2.** Şebinkarahisar'da yetiştirilen asırlık ekşi karadut ağaç gövdeleri, a) Tamzara Mahallesi, b) Kadioğlu Mahallesi, c) Avutmuş Mahallesi, d) Biroğul Mahallesi



**Şekil 3.** Şebinkarahisar'da yetiştirilen asırlık ekşi karadut ağaçlarından karadut pekmezi üretimi, a) Asırlık ekşi karadut ağacı (Avutmuş Mahallesi), b) Ekşi karadut meyvesi (olgunlaşma safhası), c) Ekşi karadut meyvesi (olgun meyve toplama), d) Ekşi karadut şıra kaynatma, e) Ekşi karadut pekmezi (serme)



## TARTIŞMA

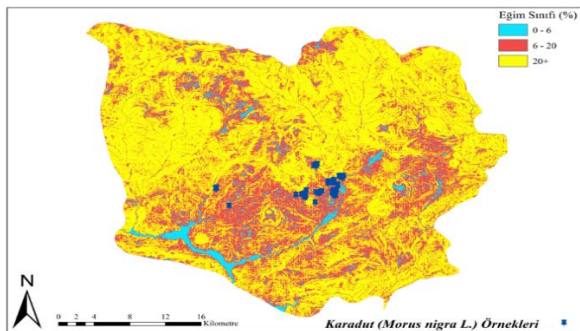
Araştırmada incelenen ekşi karadut (*M. nigra* L.) bitkisinin yetiştirildiği arazilerin deniz seviyesinden yükseklikleri GPS cihazı ile arazide ölçülmüş ve yüksekliklerin 995 metre (Örnek 58 - İkiöğül mah.) ile 1427 metre (Örnek 19 - Bülbül mah.) arasında değiştiği tespit edilmiştir. Bu değerler; 995-1139 m, 1139-1283 m ve 1283-1427 m yükselti aralıklarında olacak şekilde 3 sınıfa ayrılmıştır. Toplamda değerlendirilen 69 adet ekşi karadut ağacının 43'ünün 995- 1139 metre yükselti aralığında olduğu belirlenmiştir. Geri kalan karadut ağaçlarından 14'ünün 1139-1283 m yükselti aralığında; 12'sinin de 1283-1427 m yükselti aralığında olduğu saptanmıştır (Tablo 4).

**Tablo 4.** Şebinkarahisar'da ekşi karadut (*M. nigra*) ağaçlarının buldukları arazilere ilişkin yükselti sınıflandırması

Yükselti Sınıfı (m)	Örnek Numarası
995-1139	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66
1139-1283	24, 25, 26, 27, 28, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 67, 68
1283-1427	1, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 29, 69

Ekşi karadut yetiştirilen arazilerin eğim ve bakı özelliklerini belirlemek amacıyla Şebinkarahisar ilçesinin eğim ve bakı haritaları oluşturulmuştur (Şekil 4 ve Şekil 5). GPS ile kaydedilen örnek noktaları haritalara eklendikten sonra, her bir örnek alanın eğim ve bakı değerleri tespit edilmiştir.

Şebinkarahisar'daki ekşi karadut ağaçlarının yer aldığı arazilerin eğim sınıfları, Anonim [17]'in bildirdiği şekilde % 0-6 (hafif), % 6-20 (orta) ve % 20+ (dik) olarak değerlendirilmiştir. Karadut ağaçlarının 51'nin buldukları arazilerin eğim sınıfı % 6-20 (orta) olarak belirlenmiştir. % 20+ (dik) eğimde sınıflandırılmış arazilerdeki karadut ağaçlarının sayısı 12 ve % 0-6 (hafif) eğimde sınıflandırılmış arazilerdeki karadut ağaçlarının sayısı da 6 adet olarak tespit edilmiştir (Tablo 5).

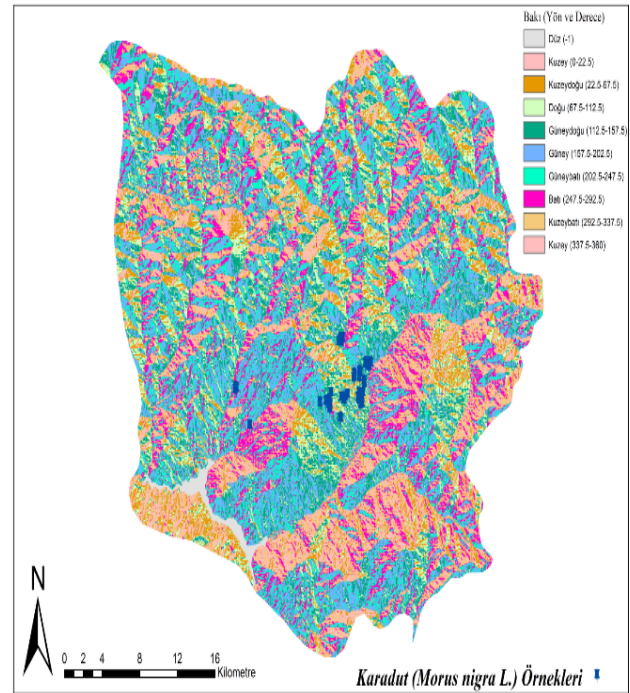


**Şekil 4.** Şebinkarahisar ilçesindeki eğim sınıflarını ve karadut (*Morus nigra* L.) örnek yerlerini gösteren harita

**Tablo 5.** Şebinkarahisar'da ekşi karadut (*M. nigra*) ağaçlarının buldukları arazilere ilişkin eğim sınıflandırması

Eğim Sınıfı (%)	Örnek Numarası
0-6	9, 20, 28, 29, 61, 69
6-20	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 30, 31, 32, 34, 35, 37, 38, 39, 41, 42, 45, 46, 47, 49, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 63, 64, 65, 66, 67, 68
20+	22, 33, 36, 40, 43, 44, 48, 50, 51, 52, 53, 62

Şebinkarahisar ilçesinde incelenen ekşi karadut ağaçlarının buldukları araziler bakı (yön ve derece) sınıflarına göre değerlendirildiklerinde; 28 adet karadut ağacının güneydoğu (112.5°-157.5°) bakılı alanlarda yer aldığı belirlenmiştir. Doğu (67.5°-112.5°) bakılı alanlarda 15; güney (157.5°-202.5°) bakılı alanlarda 9; kuzeydoğu (22.5°-67.5°) bakılı alanlarda 8; batı (247.5°-292.5°) bakılı alanlarda 5 ve güneybatı (202.5°-247.5°) bakılı alanlarda 3 adet karadut ağacı saptanmıştır. Araştırma alanında kuzey (0°-22.5°) bakılı 1 adet karadut ağacı olduğu tespit edilmiştir. Düz (-1°), kuzeybatı (292.5°-337.5°) ve kuzey (337.5°-360°) bakılı alanlarda karadut ağacı bulunmamıştır (Tablo 6).



**Şekil 5.** Şebinkarahisar ilçesindeki bakı sınıflarını ve karadut (*Morus nigra* L.) örnek yerlerini gösteren harita

**Tablo 6.** Şebinkarahisar’da ekşi karadut ağaçlarının buldukları arazilere ilişkin bakı sınıflandırması

Bakı (Yön ve Derece)	Örnek Numarası
Düz (-1°)	-
Kuzey (0°-22.5°)	10
Kuzeydoğu (22.5°-67.5°)	11, 39, 41, 54, 57, 58, 60, 61
Doğu (67.5°-112.5°)	8, 9, 15, 24, 25, 26, 27, 28, 34, 35, 37, 38, 40, 55, 56
Güneydoğu (112.5°-157.5°)	2, 3, 4, 5, 6, 7, 12, 13, 14, 18, 19, 20, 21, 23, 31, 32, 33, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 59, 67
Güney (157.5°-202.5°)	1, 17, 30, 36, 51, 52, 53, 66, 68
Güneybatı (202.5°-247.5°)	22, 63, 65
Batı (247.5°-292.5°)	16, 29, 62, 64, 69
Kuzeybatı (292.5°-337.5°)	-
Kuzey (337.5°-360°)	-

Şebinkarahisar ilçesinde yapılan bu çalışmada, ekşi karadut (*M. nigra* L.) ağaçlarının (69 adet) yer aldıkları arazilerin topoğrafik özellikleri belirlenmiştir. İncelenen ekşi karadut ağaçlarının % 62.32’sinin 995-1139 metre yükselti aralığında yer alması, bu yükselti aralığındaki ve benzer yükselti değerlerine sahip arazilerin ekşi karadut yetiştiriciliği için uygun olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. İlçede 1139-1283 metre ve 1283-1427 metre yükselti sınıfında toplam 26 adet karadut ağacı bulunduğu için ekşi karadut yetiştiriciliği bakımından bu yükselti sınıflarının ve bu değerlere yakın olan yükseltilerin de değerlendirmeye alınabileceği düşünülmektedir. Atmaca ve Cüce [18] yaptıkları çalışmada, Şebinkarahisar’ın yükseltisinin kuzeyden güneye doğru azaldığını belirtmişlerdir. Yükselti değerlerini üç gruba ayırarak yaptıkları inceleme göre, en geniş alanı kaplayan yükselti grubu 788,737 km<sup>2</sup> ile 750-1.700 metre aralığında yer almıştır. Edizer ve ark. [2], Malatya Meyvecilik Araştırma İstasyonu’ndan elde ettikleri karadut odun çeliklerini köklendirme serasına dikerek, denizden 998 metre yükseklikteki araştırma alanında çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Lim [19]’e göre karadut deniz seviyesinden 2000 m yüksekliğe kadar yetişmektedir. Erkalı ve Dalkılıç [20], Uşak ilinin Ulubey ilçesinin değişik mevkiilerinde, rakımı 650-890 m arasında değişen alanlardan 15 adet karadut genotipi belirlemiştir. Skrovankova ve ark. [21], Türkiye’de Artvin ilinden 20 karadut (*M. nigra*) genotipini incelemiş ve 540 m-1218 m arasındaki yükseltilerde bulunduğunu saptamışlardır.

İnceleme alanında yapılan değerlendirmeye göre, ekşi karadut ağaçlarının %73.91’lik büyük bir çoğunluğunun %6-20 (orta) eğim sınıfındaki arazilerde bulunduğu saptanmıştır. Bu durum, orta eğim sınıfının ilçedeki ekşi karadut yetiştiriciliği için uygun olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir. Ekşi karadut

ağaçlarının % 17.39’unun dik eğimli alanlarda bulunması önemli bir durumdur. Bu dik eğimli arazilerdeki eğim özelliklerinin iyi şekilde değerlendirilmesi ve ağaçlandırma, teraslama gibi işlemlerle karadut yetiştiriciliğinin yapılmasını mümkün kılacaktır. Geri kalan karadut ağaçlarının hafif eğim sınıfındaki alanlarda yer alması, karadutun hafif eğimli alanlarda yoğun koruyucu önlemlere gerek kalmadan yetiştirilebileceğini göstermektedir. Atmaca ve Cüce [18], Şebinkarahisar ilçesinin % 66.207’sinde dik (% 20+) eğimli arazilerin bulunduğunu saptamışlardır. Bununla birlikte orta (% 6-20) eğim sınıfındaki arazilerin oranını % 29.763 olarak; hafif (% 0-6) eğimli arazilerin de oranını % 4.03 olarak belirlemişlerdir. Uzun ve Zaman [22], Giresun ili topraklarının oldukça eğimli ve engebeli bir arazi yapısına sahip olduğunu ve ilin iç kesiminde (Şebinkarahisar, Çamoluk ve Alucra ilçeleri) ise nispeten daha sade bir topoğrafik görünümün önem kazandığını bildirmişlerdir. Aynı araştırmacılar Şebinkarahisar Karadutu’nun, yerel coğrafi koşulların yöreye has özellikler kazandırdığı bir meyve olduğunu belirtmişlerdir. Lim [19]’e göre karadut ağacı iyi drene edilmiş toprakta gelişir. Ahlawat ve ark. [23]’na göre karadut ağaçlarının dikiminden önce toprak derin bir şekilde sürülmeli, tırmıklanmalı ve düzleştirilmelidir. Şebinkarahisar ilçesinde ekşi karadut yetiştiriciliği yapılacak olan arazilerde drenaj ve tesviye çalışmaları gerçekleştirileceği zaman eğim özelliklerinin de göz önünde bulundurulması uygun olacaktır.

Şebinkarahisar’da araştırılan ekşi karadut ağaçlarının yer aldıkları arazilerin % 57.97’sinin güneydoğu, güney ve güneybatı bakılara sahip oldukları belirlenmiştir. Geri kalan örneklerin doğu, kuzeydoğu, batı ve kuzey (0°-22.5°) bakılı arazilerde oldukları saptanmıştır. Başta güneydoğu bakı olmak üzere güney ve güneybatı bakılara sahip alanların güneşten faydalanma durumlarının daha iyi olabileceği göz önünde bulundurulduğunda ekşi karadut yetiştiriciliği için öne çıktıkları söylenilebilir. Bununla birlikte Şebinkarahisar ilçesi koşullarında doğu, kuzeydoğu, batı ve kuzey (0°-22.5°) bakıya sahip arazilerin de karadut yetiştiriciliği için değerlendirilebileceği düşünülmektedir. Özgen [4], karadut ağaçlarının yavaş büyüdüğünü ve uzun yıllar verimde kaldığını dikkate alarak bahçe kurulacak yerin özenle seçilmesi gerektiğini vurgulamıştır. Lim [19], karadut ağacının güneşli bir konumda gelişeceğini bildirmiştir. Atmaca ve Cüce [18], Şebinkarahisar’da güneydoğu, güney ve güneybatı bakılı alanların sırasıyla; % 14.153, % 16.253 ve % 13.218 oranlarında yüzölçümüne sahip olduğunu bildirmişlerdir. Doğu, kuzeydoğu ve batı bakılı alanların yüzölçümlerini ise sırasıyla; % 12.577, % 8.957 ve % 13.819 olarak saptamışlardır. İlçede kuzey [(0°-22.5°) + (337.5°-360°)] bakılı toplam alanların yüzölçümünü % 9.256 olarak belirlemişlerdir. Özgen [4]’e göre karadut için bahçe yerinin kışın son günlerinde ya da erken ilkbaharda çok soğuk olmaması gerekmektedir. Zira, çiçek veya genç meyveler don zararına uğrayabilirler. Kış aylarında, bahçe yerinin normal meyve tutumu ve büyümesi için gereken soğuk ihtiyacını karşılayacak şekilde yeterince

soğuğa maruz kalması önemlidir. Rüzgar, karadut bahçelerinde çok nadir olarak bir risk oluşturur; ancak bazı bölgelerde rüzgar kaynaklı dal kırılmaları nadiren de olsa meydana gelebilir.

## SONUÇ

Şebinkarahisar ilçesinde yapılmış olan bu çalışmadan elde edilen veriler, karadutla ilgili gerçekleştirilmiş önceki bilimsel çalışmalar, ekşi karadut ağaçlarının yer aldığı arazilerde yapılan gözlemler, yetiştiricilerin verdikleri bilgiler, ilçenin iklimsel özellikleri ve topoğrafyası gibi faktörler dikkate alındığında, Şebinkarahisar koşullarında ekşi karadut (*M. nigra* L.) yetiştiriciliğine uygun arazilerin haritalanması için değerlendirilebilecek arazi özellikleri Tablo 7'de gösterilmiştir.

**Tablo 7.** Şebinkarahisar'da ekşi karadut (*M. nigra* L.) yetiştiriciliğine uygunluk haritasında kullanılacak özellikler

Arazi Özelliği	Şebinkarahisar'da Ekşi Karadut Yetiştiriciliği için Önerilen Değerlendirme Kriterleri
Yükselti	950-1500 m
Eğim	% 6-20
Bakı	Güneydoğu, Güney, Güneybatı, Doğu, Kuzeydoğu, Batı ve Kuzey (0°-22.5°)

## Teşekkür

Bu araştırma kapsamında, gerek arazi çalışmalarındaki yardımlarıyla ve gerekse karadut yetiştiriciliği hakkında vermiş oldukları bilgilerle bizlere sunmuş oldukları değerli katkılardan dolayı; Şebinkarahisar İlçe Tarım ve Orman Müdürü Sayın Kamil ÇAKIR'a, Sayın Ramazan SUCU'ya ve bizlere yakın ilgi gösteren karadut bahçelerinin sahiplerine teşekkür ederiz.

## KAYNAKÇA

- [1] Gürcan, K. Ekşi karadutun (*Morus nigra* L.) Türkiye'de yetiştiricilik kültürü ve alanları: Asırlık ağaçların keşfi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 31(Ek Sayı 1): 568-582, 2021.
- [2] Edizer, Y., Gökçek, O., Saraçoğlu, O. Karadut'un (*Morus nigra*) odun çelikleriyle çoğaltılmasında büyüme düzenleyici uygulamaların etkileri. Gaziosmanpaşa Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 33(3): 92-96, 2016.
- [3] Sütyemez, M. Kahramanmaraş ekolojik şartlarında karadutun (*Urmu dut*) morfolojik, fenolojik ve pomolojik özelliklerinin belirlenmesi. Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi, 8(3): 686-692, 2021.
- [4] Özgen, M. Karadut Yetiştiriciliği. Ankara: T.C. Tarım ve Köyişleri Bakanlığı Yayın Dairesi Başkanlığı, 36 s, 2008.
- [5] Sezer, İ., Başkaya, Z. Coğrafi koşullar ve dağılışı yönüyle Giresun ilinde seracılık faaliyetlerinin

- [6] Kirişçi, V., Keskin, M., Say, S.M., Keskin, S.G. Hassas Uygulamalı Tarım Teknolojisi. Ankara: Nobel Yayın Dağıtım Ltd. Şti., Birinci Baskı, Yayın No: 88, 186 s, 1999.
- [7] Delibaş, L., Bağdatlı, M.C., Danışman, A. Topoğrafya ve bazı toprak özelliklerinin coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ortamında analiz edilerek ceviz yetiştiriciliğine uygun alanların belirlenmesi: Tekirdağ ili Merkez köyleri örneği. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi (GÜFBED), 5(1): 50-59, 2015.
- [8] Savaş, Ö., Güney, E. Türkiye Bitki Coğrafyası. Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Ltd. Şti., 1. Basım, Yayın No: 964, Çevre ve Yer Bilimi: 004, 353 s, 2014.
- [9] Cüce, M. Şebinkarahisar'da yetiştirilen karadut odun çeliklerinin köklenmesi üzerine farklı oksin çeşitlerinin etkisi. Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, 14(1): 304-314, 2024.
- [10] Yılmaz, G. Şehir coğrafyası açısından Şebinkarahisar. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, 2006.
- [11] Atmaca, B., Nalbant, H. Giresun ilinin Şebinkarahisar ilçesinde yer alan Avutmuş Çayı'nın batı kesimlerindeki bazı meyve bahçelerinin toprak özellikleri. Toprak Bilimi ve Bitki Besleme Dergisi, 6(2): 111- 121, 2018.
- [12] Anonim. Giresun Meteoroloji İstasyon Müdürlüğü Verileri. T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Giresun / Türkiye, 2020a.
- [13] TÜİK. Şebinkarahisar İlçesinin 2022 Yılı Bitkisel Üretim İstatistikleri. Türkiye İstatistik Kurumu, Ankara/Türkiye, <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=92&locale=tr> (Erişim tarihi: 15.01.2024), 2024.
- [14] USGS. DEM Data (SRTM 1 Arc-Second Global/~30 meters). Available from URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (Date of Access: 29 July 2022), 2022.
- [15] Anonim. Giresun İli 1/25000 Ölçekli Büyük Toprak Grubu Haritası. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Tarım Reformu Genel Müdürlüğü, Toprak Etüt ve Planlama Çalışma Grubu Verileri, Ankara / Türkiye, 2020b.
- [16] TÜRKPATENT. Türk Patent ve Marka Kurumu. Şebinkarahisar Karadutu Coğrafi İşaret Tescil Belgesi (Tescil No: 885). Erişim adresi ve tarihi: <https://ci.turkpatent.gov.tr/Files/GeographicalSigns/033b4a70-19ca-4180-9067-1d279f11e25f.pdf> (29.06.2024), 2021.
- [17] Anonim. Türkiye Genel Toprak Amanajman Planlaması (Toprak Koruma Ana Planı). Ankara: T.C. Tarım Orman ve Köyişleri Bakanlığı, Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü, Havza Islahı ve Göletler Daire Başkanlığı, 105 s, 1987.
- [18] Atmaca, B., Cüce, M. Kelkit Vadisi'nde ceviz yetiştiriciliğine uygun alanların tespitinde coğrafi bilgi sistemlerinin (CBS) kullanımı: Giresun ili



- Şebinkarahisar ilçesi örneği. Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, 13(2): 561-582, 2023
- [19] Lim, T.K. Edible Medicinal and Non-Medicinal Plants: Volume 3, Fruits. Springer Dordrecht, 2012.
- [20] Erkaleli, Z.Ö., Dalkılıç, Z. Uşak ili Ulubey ilçesinde yetişen karadutların (*Morus nigra* L.) morfolojik, fenolojik ve pomolojik özelliklerinin belirlenmesi. Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 13(1): 89-106, 2016.
- [21] Skrovankova, S., Ercisli, S., Ozkan, G., Ilhan, G., Sagbas, H.I., Karatas, N., Jurikova, T., Mlcek, J. Diversity of phytochemical and antioxidant characteristics of black mulberry (*Morus nigra* L.) fruits from Turkey. Antioxidants, 11(7): 1339, 2022.
- [22] Uzun, B., Zaman, M. Giresun ilinde coğrafi işaretli ürünler ve özellikleri. Koday, S., Sevindi, C. (Editörler), Atatürk Üniversitesi Coğrafya Araştırmaları Serisi 2021 "Beşeri coğrafya" (ss. 145-168). Ankara: Gazi Kitabevi, 2021.
- [23] Ahlawat, T.R., Patel, N.L., Agnihotri, R., Patel, C.R., Tandel, Y.N. Black mulberry (*Morus nigra*). Ghosh, S.N., Singh, A., Thakur, A. (Eds). Underutilized Fruit Crops: Importance and Cultivation (pp. 195-212). Delhi, India: Narendra Publishing House, 2016.

## Rüzgâr Hızı Tahminine Yönelik Hibrit ConvLstm Modeli: Hindistan'ın En Yüksek Rüzgâr Hızına Sahip Şehirleri için Bir Vaka Çalışması

Anıl UTKU<sup>1</sup>, Sinem AKYOL<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Munzur Üniversitesi, Tunceli, Türkiye

<sup>2</sup> Yazılım Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

✉: [sakyol@firat.edu.tr](mailto:sakyol@firat.edu.tr)  <sup>1</sup> 0000-0002-7240-8713  <sup>2</sup> 0000-0001-9308-3500

Geliş (Received): 07.10.2024

Düzeltilme (Revision): 13.11.2024

Kabul (Accepted): 26.11.2024

### ÖZ

Rüzgâr hızı tahmini lojistik, enerji üretimi ve yenilenebilir enerji kaynakları, havacılık ve denizcilik, tarım, afet yönetimi, çevresel izleme, inşaat, yaşam planlama ile ekonomik faaliyetler için oldukça önemlidir. Bu çalışmada, Hindistan'ın en yüksek rüzgâr hızına sahip şehirlerinden olan Jaisalmer, Kochi, Mangalore, Puri ve Rameswaram şehirlerinin rüzgâr hızlarının tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Rüzgâr hızı tahminine yönelik CNN ve LSTM modellerinin etkin özelliklerinden faydalanarak ConvLSTM hibrit modeli geliştirilmiştir. ConvLSTM ile mekânsal ve zamansal verileri aynı anda işleyerek rüzgâr hızının dinamiklerini daha iyi belirlemek amaçlanmıştır. ConvLSTM, RF, SVM, ANFIS, CNN ve LSTM ile rüzgâr hızının 10 metre ve 100 metre yüksekliklerdeki ölçümlerinden oluşan yaklaşık 15 yıllık saatlik bir veri seti kullanılarak kapsamlı bir şekilde test edilmiştir. Deneysel sonuçlar, ConvLSTM'in her bir şehir ve rüzgâr hızı parametresinin neredeyse tamamında 0,9'un üzerinde  $R^2$  değerine sahip olduğunu, RMSE ve MAE hata metrikleri açısından ise en düşük hata değerlerine sahip olarak karşılaştırılan modellerden daha başarılı olduğunu göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** CNN, Derin öğrenme, Makine öğrenmesi, LSTM, Rüzgâr hızı

### Hybrid ConvLSTM Model for Wind Speed Prediction: A Case Study for India's Highest Wind Speed Cities

#### ABSTRACT

Wind speed prediction is very important for logistics, energy production and renewable energy sources, aviation and maritime, agriculture, disaster management, environmental monitoring, construction, life planning and economic activities. In this study, it was aimed to predict the wind speeds of Jaisalmer, Kochi, Mangalore, Puri and Rameswaram, which are among the cities with the highest wind speeds in India. ConvLSTM hybrid model was developed by taking advantage of the effective features of CNN and LSTM models for wind speed prediction. With ConvLSTM, it is aimed to better determine the dynamics of wind speed by processing spatial and temporal data simultaneously. ConvLSTM has been extensively tested using an approximately 15-year hourly dataset consisting of RF, SVM, ANFIS, CNN and LSTM and wind speed measurements at 10 meters and 100 meters' altitudes. Experimental results show that ConvLSTM has  $R^2$  values above 0.9 for almost all of the city and wind speed parameters, and outperforms the compared models with the lowest error values in terms of RMSE and MAE error metrics.

**Keywords:** CNN, Deep learning, Machine learning, LSTM, Wind speed

#### GİRİŞ

Meteoroloji, atmosferik olayları ve meydana gelme biçimlerini inceleyen bir bilim dalıdır. Meteoroloji hava durumunu ve iklim değişkenlerinin gelecekteki değerlerini öngörmeyi amaçlamaktadır [1]. Meteoroloji uzmanları, meteorolojik olguları belirleyebilmek için fiziksel, istatistiksel ve bilgisayar destekli modeller kullanmaktadır. Rüzgâr, yüksek basınç bölgelerinden düşük basınç bölgelerine doğru hava kütlelerinin hareketidir [2]. Rüzgârın hızı ve yönü, atmosferdeki

basınç farkları, sıcaklık değişiklikleri ve dünyanın dönüşü gibi faktörlerden etkilenir. Rüzgâr, hava tahminlerinde önemli bir rol oynar. Rüzgâr hızları ve yönleri, hava sistemlerinin nasıl hareket edeceğini ve hangi bölgelerde etkili olacağını belirlemede kullanılır [3]. Meteorologlar, rüzgâr verilerini analiz ederek yağış, sıcaklık ve diğer iklim değişkenlerinin durumunu öngörürler. Rüzgâr, atmosferdeki basınç farkları nedeniyle meydana gelmektedir. Rüzgârın yönü ve hızı, dünyanın dönmesi ile dağ, vadi ve binalar gibi etkenlerden dolayı değişmektedir [4]. Rüzgârlar, nemli

havayı sürükleyerek yağışların meydana gelmesine neden olur. Rüzgâr hareketlerini gözlemleyebilmek amacıyla radarlar ve uydular kullanılmaktadır. Rüzgâr hızını ölçmek için ise anemometre cihazları kullanılmaktadır [5].

Kuvvetli rüzgârlar, fırtına ve kasırgalara sebep olarak ciddi can ve mal kayıplarına neden olabilir [6]. Özellikle hava ve deniz ulaşımı olmak üzere ulaşım güvenliğini tehlikeye düşürebilir. Kuvvetli rüzgârlar neticesinde elektrik şebekelerinde arızalar yaşanabilir, binalar zarar görebilir [7]. Bitki örtüsünün seyrek olduğu bölgelerde toprağı aşındırarak erozyona ve çölleşmeye neden olabilir. Tarımsal ürünlere zarar vererek üretim verimliliğinin düşmesine ve kullanılan kimyasalların farklı bölgelere taşınmasına neden olabilir [8]. Ayrıca, hava kirliliğine neden olan toz ve partikül maddelerin taşınmasına neden olarak hava kalitesine olumsuz etki edebilir.

Fırtınalardan kaynaklanan şiddetli rüzgârlar, büyük ölçekli orman hasarları, elektrik kesintileri ve bina hasarı gibi önemli hasarlara neden olur [9, 10]. Fırtına, kasırga, dolu ve kuvvetli rüzgârlar, tarımsal üretim alanlarının yanı sıra günlük yaşamı da olumsuz etkileme potansiyeline sahip doğal tehlikelerdir. Bu nedenle rüzgâr hızı tahmini, gelişmiş hava uyarıları almak için önemli bir görevdir. Çeşitli sektörler için oldukça önemli olan rüzgâr hızı tahmininde yapay zekâ teknolojilerinin kullanımı, tahmin doğruluğunun ve verimliliğinin artırılması açısından önemlidir. Rüzgâr hızı tahmini yenilenebilir enerji optimizasyonu, güvenlik ve risk yönetimi, afetlere yönelik stratejiler geliştirilmesi, tarımsal üretim, açık hava etkinlikleri ve hava kirliliği açısından önemlidir [11].

Doğru rüzgâr hızı tahminleri, rüzgâr santrallerinin operasyonlarının optimize edilmesine yardımcı olur. Enerji üretiminin daha iyi planlanmasına olanak tanır. Rüzgâr türbinlerinin verimli çalışmasını sağlayarak aşınmayı ve yıpranmayı azaltır. Ayrıca elektrik şebekelerinde arz ve talebin dengelenmesine, rüzgar enerjisinin daha güvenilir bir şekilde entegre edilmesine ve fosil yakıtlara olan bağımlılığın azaltılmasına yardımcı olur [12]. Havacılık sektöründe uçakların kalkışları ve inişleri ile uçuş planlaması ve güvenliği açısından kritik öneme sahiptir [13, 14]. Benzer şekilde denizcilik faaliyetlerinde, navigasyon ve rota planlaması ile gemilerin ve mürettebatın güvenliğinin sağlanması için hayati öneme sahiptir [13].

Fırtına ve kasırga tahminleri, kasırgalar ve fırtınalar için erken ve doğru uyarılar sağlayarak şiddetli hava olaylarına hazırlıklı olunmasını, potansiyel can ve mal kaybının önlenmesini sağlar [15]. Tarımsal üretim süreçlerinde çiftçilerin kimyasal uygulamalarının ve sulama süreçlerinin planlanması ve mahsullerin rüzgârın zararından korunması gibi faaliyetler açısından önemlidir [16]. Benzer şekilde rüzgâr hızı tahminleri yelken, sörf ve yamaç paraşütü gibi açık hava sporlarının planlanması açısından önemlidir. Ayrıca rüzgâr düzenlerini anlamak, hava kirleticilerin dağılımını modellemek ve hava kalitesi yönetimini iyileştirmek için önemlidir [17].

Rüzgâr hızı tahmininde yapay zekâ yöntemlerinin kullanımı daha yüksek tahmin doğruluğu, uyarlanabilir öğrenme, çoklu veri kaynaklarının entegrasyonu, gerçek zamanlı işleme ve ölçeklenebilirlik sağlar [18]. Yapay zekâ yöntemleri, büyük miktarlarda geçmiş ve gerçek zamanlı verileri işleyerek geleneksel yöntemlere göre daha yüksek tahmin doğruluğu sağlamaktadır. Yapay zekâ yöntemleri sürekli olarak yeni verileri öğrenerek ve uyum sağlayarak zaman içinde tahmin yeteneklerini geliştirir [19]. Bu sayede, değişen hava koşulları ve anomalilerin tespit edilmesi kolaylaşmaktadır. Yapay zekâ yöntemleri, uydu görüntüleri, hava durumu istasyonları ve IoT cihazları dahil olmak üzere çeşitli kaynaklardan gelen verileri entegre ederek rüzgâr düzenlerinin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlayabilir [20]. Ayrıca yapay zekâ yöntemleri, geniş coğrafi alanları kapsayacak şekilde ölçeklenebilir ve küresel hava durumu modellerinin karmaşıklığını ele alarak yerel, bölgesel ve küresel düzeylerde tahminler sağlayabilir [21].

Bu çalışmada, Hindistan'ın en yüksek rüzgâr hızına sahip şehirlerinden olan Jaisalmer, Kochi, Mangalore, Puri ve Rameswaram şehirlerinin rüzgâr hızlarının tahminine yönelik Convolutional Neural Network (CNN) ve Long Short-Term Memory (LSTM) modelleri kullanılarak hibrit ConvLSTM modeli geliştirilmiştir. Çalışmada, şehirlerin 01-01-2010 ile 21-02-2024 tarihleri arasındaki rüzgâr hızının 10 metre ve 100 metre yüksekliklerdeki ölçümlerinden oluşan saatlik, güncel bir veri seti kullanılmıştır. ConvLSTM modeli, Adaptive Neuro Fuzzy Inference Systems (ANFIS), Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM), CNN ve LSTM ile uygulamalı olarak karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın literatüre sunduğu yenilikler aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Tahmin doğruluğunu ve etkinliğini arttırmak amacıyla hibrit ConvLSTM modeli geliştirilmiştir.
- Bu veri seti ve şehirler kullanılarak yapılmış literatürdeki ilk çalışmadır.
- ConvLSTM modeli ile RF ve SVM gibi geleneksel makine öğrenmesi yöntemleri, CNN ve LSTM gibi derin öğrenme modelleri ile yapay sinir ağları ile bulanık mantık sistemlerini birleştiren hibrit bir model olan ANFIS kapsamlı olarak karşılaştırılmıştır.

## İLİŞKİLİ ÇALIŞMALAR

Derin öğrenme modelleri, özellikle uzun kısa süreli hafıza ağları rüzgâr hızı tahmininde önemli başarı göstermiştir. Bu modeller, zaman serisi verilerindeki karmaşık kalıpların yakalanmasında çok iyi sonuçlar verdiği için rüzgâr hızı tahmininde ideal bir araç olarak kullanılmaktadır. Bu bölümde derin öğrenme yöntemleri kullanılarak rüzgâr hızı tahmini yapılmasına yönelik yapılan çalışmalar ele alınmaktadır.

Subbiah ve diğ., rüzgâr hızı tahmini için non-lineerlik, boyutsallık, belirsizlik ve aşırı uyum sorunlarını giderdikleri BFS-Bi-LSTM modelini önermişlerdir [22]. Önerdikleri modeli LSTM, BFS-LSTM, MLP ve BFS-MLP modelleri ile karşılaştırmışlardır. Geliştirilen model, 0.530 Mean Absolute Error (MAE), 0.784 Root

Mean Squared Error (RMSE) ve 0.8766 R-Squared ( $R^2$ ) değerleri ile karşılaştırılan modellerden daha başarılı bir performans sergilenmiştir.

Chen ve Han, kanat yarıçapındaki değişimi dikkate alan ve aerodinamiğin haritasını yeniden oluşturan bir yöntem önermişlerdir [23]. Rüzgâr türbininin mevcut verileri kullanılarak, başlangıç olarak radyal bazlı fonksiyonları temel alan iki sinir ağı modeli eğitilmiştir. Modeller sırasıyla etkili yarıçapı tahmin ederek, aerodinamik haritalama yüzeyini yeniden oluşturmuşlardır. Ardından, mevcut rüzgâr hızını anlık olarak etkili bir şekilde tahmin edebilen ve gelecek zaman adımıdaki rüzgâr hızını öngörebilen LSTM tabanlı bir model eğitilmiştir. Deneysel sonuçlar, önerilen yöntemin rüzgâr hızı tahmin doğruluğunu ortalama %70'in üzerinde geliştirdiğini göstermektedir.

Chen ve diğ., yeni bir çekirdek MSE kayıp fonksiyonu önermişlerdir [24]. Çekirdek MSE kayıp fonksiyonunun, derin öğrenme hatalarının doğrusal olmama durumunu diğer kayıp fonksiyonlarına kıyasla daha doğru bir şekilde doğrudan ölçebildiğinden bahsetmişlerdir. Yeni kayıp fonksiyonunu doğrulamak için, temel modeller olarak Recurrent Neural Network (RNN), LSTM ve Gated Recurrent Unit (GRU) kullanılmıştır. Üç farklı veri seti üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, yeni kayıp fonksiyonunun genellikle daha verimli ve üstün olduğunu ortaya koymuştur. Bu da, çok adımlı tahminlerde elde edilen hata oranının %95 MSE'den daha düşük olabileceği sonucunu doğurmuştur.

Han ve diğ., pearson korelasyon katsayısına, uyarlanabilir gürlütle tam topluluk ampirik mod ayrıştırmasına ve dikkat mekanizması ve grid arama yöntemine sahip algoritmalara dayanan yeni bir hibrit derin öğrenme modelini rüzgâr hızını tahmin etmek için önermişlerdir [25]. Elde ettikleri sonuçlara göre, MAE, Mean Absolute Percentage Error (MAPE) ve RMSE değerleri düzeltilmeden sonra 0,1042 m/s, %4,63 ve 0,1309 m/s olup, 94,13 oranında azalmıştır.

Khodayar ve diğ., kısa vadeli rüzgâr hızı tahmini için bir yöntem önermişlerdir [26]. Önerilen yöntem, yeni bir özellik çıkarma katmanıyla birlikte bulanık tip II çıkarım sistemine sahip yeni bir gerçek değerli derin inaç ağından oluşmaktadır. Western Wind veri seti test edilerek RMSE ve MAPE metrikleri için alınan deneysel sonuçlar, önerilen algoritmanın başarılı sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Hao ve diğ., karma frekans verilerinin değerini dikkate alarak, tahmin etkinliğini artırmak amacıyla karma frekans modellemeye dayalı bir derin öğrenme modeli geliştirmişlerdir [27]. İlk olarak, orijinal düşük ve yüksek frekanslı rüzgâr hızlarını ayrıştırmak ve yeniden oluşturmak için bir veri ön işleme modülü tasarlanmıştır. Yapılan simülasyon sonuçları, tasarlanan birleşik modelin Saha 1 ve Saha 2'de karşılaştırılan diğer tüm modellere göre daha iyi performans sergilediğini göstermektedir.

Özellikle, geliştirilen modelin Saha 1'de MAE, RMSE, MAPE, IA ve U1 değerleri sırasıyla 0,2897, 0,4010, 3,8261 %, 0,9771 ve 0,0249 iken, Saha 2'de bu değerler

sırasıyla 0,2352, 0,2912, 3,8972 %, 0,9944 ve 0,0209 olarak hesaplanmıştır.

ConvLSTM, zaman serisi verilerindeki uzun vadeli bağımlılıkları öğrenme kapasitesini CNN'in mekânsal özellik çıkarma yeteneği ile birleştirerek, karmaşık ve dinamik verilerin tahmininde önemli avantajlar sunar. Literatürde ConvLSTM'e benzer yöntemler kullanılmakla birlikte, bu çalışmanın ayırt edici özelliği, Hindistan'ın en yüksek rüzgâr hızına sahip beş şehirden alınan 15 yıllık veri setinin analiz edilmesi ve bu kadar uzun süreli bir saatlik verinin daha önce çalışılmamış olmasıdır. Bu bağlamda, ConvLSTM modeli, yalnızca doğruluk performansı açısından değil, aynı zamanda mekânsal ve zamansal veri işleme kapasitesiyle de literatüre önemli bir katkı sunmaktadır. ConvLSTM, RF ve SVM gibi geleneksel yöntemlerden yalnızca doğruluk değerleri açısından değil, karmaşık veri örüntülerini işleyebilme kapasitesi sayesinde de ayrılmaktadır. Örneğin, ANFIS modeli bulanık mantık sistemlerine dayansa da yüksek boyutlu mekânsal ve zamansal verilerde sınırlı kalmıştır. Bu durum ConvLSTM'in hibrit yapısının önemini göstermektedir.

Bu çalışmanın özgünlüğü, geliştirilen modelin rüzgâr hızı tahmininde kullanılarak, daha önce benzer bir veri setinde ve bu bağlamda test edilmemiş olmasıdır. Literatürdeki mevcut çalışmalarda, genellikle tek bir coğrafi bölge veya daha kısa süreli veriler kullanılmışken, bu çalışmada Hindistan'daki farklı şehirlerden alınan 15 yıllık veri setiyle, mekânsal ve zamansal bağımlılıkların daha kapsamlı bir şekilde işlenmesi sağlanmıştır. Çalışmada kullanılan 15 yıllık rüzgâr hızı verisi, Hindistan'ın farklı coğrafi bölgelerinden alınmış olup, daha önce literatürde bu tür bir veri seti kullanılmamıştır. Kullanılan veri seti, modelin genelleme kapasitesinin test edilmesi açısından literatüre önemli bir katkıdır. Bu veri seti, rüzgâr enerjisi sektöründe daha doğru tahminler yapılabilmesine olanak tanıyacak ve yenilikçi bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.

Literatürdeki çalışmaların çoğunda, genellikle tek bir şehir veya ülkeye ait veriler kullanılmıştır. Bu durum, modelin genelleme kapasitesini sınırlayabilir. Ancak bu çalışmada, Hindistan'ın farklı iklim koşullarına sahip beş şehirden alınan verilerle yapılan tahminler, ConvLSTM'in geniş bir coğrafyada nasıl performans gösterdiğini ortaya koymaktadır ve modelin gerçek dünya uygulamaları açısından önemlidir.

## MATERYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada Hindistan'ın en yüksek rüzgâr hızına sahip şehirlerinden olan Jaisalmer, Kochi, Mangalore, Puri ve Rameswaram'ın 10 metre ve 100 metre yükseklikte ölçülen rüzgâr hızlarının tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Veri seti olarak şehirlerin Ocak 2010 ile Şubat 2024 tarihleri arasındaki hava durumu verileri kullanılmıştır. Geliştirilen ConvLSTM modeli, RMSE, MAE ve  $R^2$  metrikleri kullanılarak RF, SVM, ANFIS, CNN ve LSTM ile uygulamalı olarak karşılaştırılmıştır. ConvLSTM modelini değerlendirmek için karşılaştırılan



tekniklerin seçiminde farklı model yaklaşımlarını temsil etme, derin öğrenme modelleriyle karşılaştırma ve farklı yaklaşımların etkinliğini değerlendirmek amaçlanmıştır. Bu bölümde kullanılan veri seti, uygulanan tahmin modelleri ve geliştirilen ConvLSTM hakkında ayrıntılı bilgiler sunulmuştur.

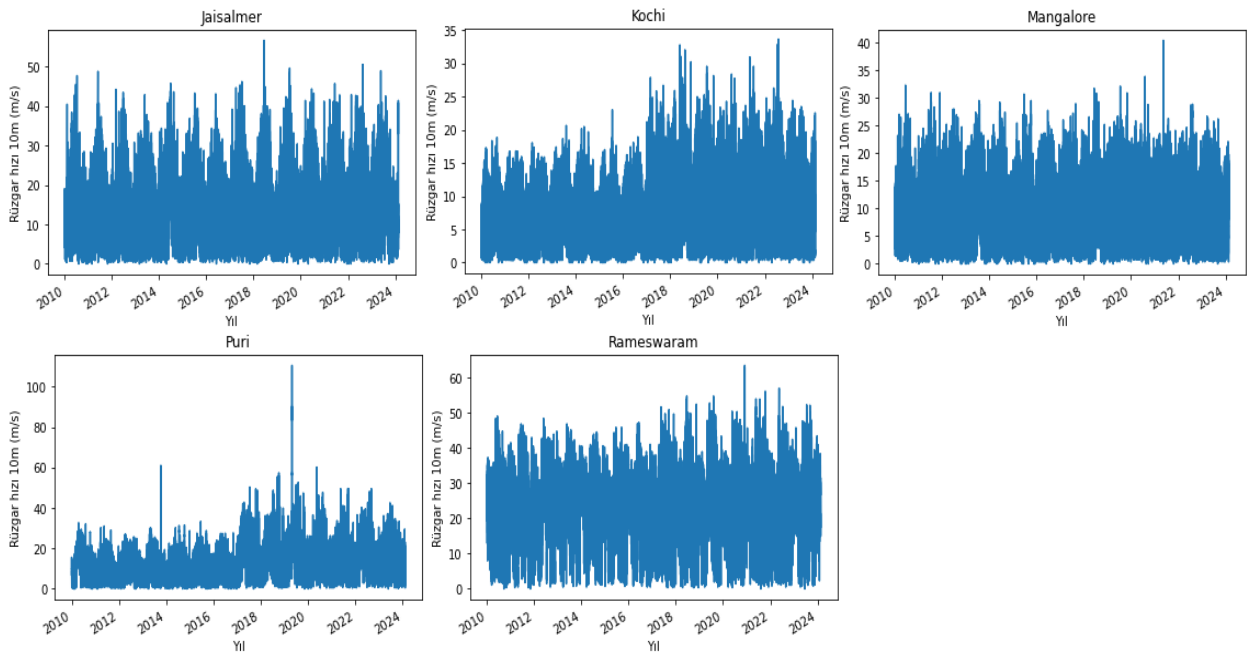
## Veri Seti

Kullanılan veri seti, Hindistan Meteoroloji Departmanı ve Hindistan Yenilenebilir Enerji Ajansı (IREDA) tarafından sağlanan rüzgâr hızına ilişkin kamuya açık veri tabanlarından elde edilmiştir. Bu veri seti, Jaisalmer, Kochi, Mangalore, Puri ve Rameswaram şehirlerine ait 01.01.2010 - 21.02.2024 tarihleri arasındaki saatlik rüzgâr hızlarını içermektedir. Veriler, her bir şehir için 10 metre ve 100 metre yükseklikte ölçülen değerleri kapsamakta olup, bu yükseklikler enerji, meteoroloji ve çevresel analizlerde referans yükseklikler olarak kullanılmaktadır. Veri setinin güncelliği, 2024 yılı Şubat ayına kadar uzanan ölçümleri içermesiyle sağlanmıştır. Veriler, ilgili kurumların kalibrasyonlu meteorolojik istasyonları tarafından düzenli olarak ölçülmüş ve kalite kontrol süreçlerinden geçirilmiştir. Özellikle eksik veya hatalı veri noktaları, interpolasyon ve veri temizleme yöntemleriyle düzenlenmiştir. Ayrıca, veri setinin doğruluğunu artırmak amacıyla ek istatistiksel kontroller yapılmıştır. Veriler, Hindistan Meteoroloji Departmanı tarafından kullanılan otomatik ölçüm cihazları ve anemometreler yardımıyla toplanmıştır. Ölçümler düzenli olarak her saat alınmış ve çevresel koşullara göre standart bir protokolle işlenmiştir. Ayrıca, veri işleme sürecinde Python ile veri görselleştirme ve analitik

işlemler yapılmış ve çalışmada kullanılan metodoloji detaylı şekilde açıklanmıştır.

Veri seti tarih, sıcaklık, nem, çiy noktası, yağmur ve kar yağış durumu, bulutluluk, rüzgâr hızı ve yüzey basıncı gibi iklim değişkenlerini içermektedir [28]. Kullanılan veri setindeki özellikler (sıcaklık, nem, çiy noktası, yağış durumu, bulutluluk, yüzey basıncı vb.), rüzgâr hızını etkileyen meteorolojik parametreler arasından seçilmiştir. Bu seçim, literatürdeki benzer çalışmalar ve rüzgâr hızı ile bu değişkenler arasındaki doğrusal olmayan ilişkilerin kanıtlanmış olması temel alınarak yapılmıştır. Örneğin, yüzey basıncı farkları ve sıcaklık değişimleri, rüzgâr hızını belirlemede kritik faktörlerdir. Bu özellikler modelimize zengin bir giriş sağlamış ve tahmin doğruluğunu artırmıştır.

Veri setinden, rüzgâr hızının 10 metre ve 100 metre yüksekliklerdeki ölçümlerinin değerleri seçilmiştir. 10 metre yüksekliği, meteorolojide yüzey rüzgâr hızlarını raporlamak için yaygın olarak kullanılan bir referans yüksekliğidir. Bu yükseklik, çoğu yüzey engelinin (binalar, ağaçlar vb.) üzerinde olduğundan, yer seviyesindeki koşulları daha doğru bir şekilde yansıtır. 10 metre yüksekliği hava tahminleri, tarım ve kentsel planlamada kullanılmaktadır. 100 metre yüksekliği, özellikle rüzgâr enerjisi bağlamında büyük önem taşır. Rüzgâr hızları genellikle daha yüksek ve daha tutarlı olduğu için rüzgâr türbinleri genellikle bu yükseklikte veya yakınında yerleştirilir. 100 metre yüksekliği rüzgâr çiftliği planlaması ve havacılıkta kullanılmaktadır [3]. Şekil 1'de, python programlama dili ve spyder yazılımı kullanılarak görselleştirilen Ocak 2010 ile Şubat 2024 arasında Jaisalmer, Kochi, Mangalore, Puri ve Rameswaram şehirlerindeki 10 metre yüksekliğindeki rüzgâr hızlarının zamana göre değişimi görülmektedir.



Şekil 1. 10 metre yüksekliğindeki rüzgâr hızlarının zamana göre değişimi

Şekil 1'de, şehirlerin 10 metre yüksekliğinde ölçülen rüzgâr hızlarının zaman içindeki değişimleri görülmektedir. Jaisalmer, yıl boyunca belirgin mevsimsel dalgalanmalara sahiptir. Bölgedeki sıcak ve kuru hava koşulları nedeniyle özellikle yaz aylarında rüzgâr hızlarında artış gözlemlenebilir. Genel olarak, yıllık ortalama rüzgâr hızlarının yüksek olduğu görülmektedir. 10 metre yüksekliğindeki rüzgâr hızlarının 15 yıllık ortalaması Jaisalmer için 14,87, Kochi için 7,02, Mangalore için 9,73, Puri için 13,70 ve Rameswaram için 24.46'dır. Kochi'de mevsimsel dalgalanmalar belirgin olup, özellikle muson sezonunda rüzgâr hızlarında artışlar görülmektedir. Yıllık ortalama rüzgâr hızları, Jaisalmer'e kıyasla daha düşüktür. Mangalore'de de mevsimsel dalgalanmalar görülmektedir. Özellikle muson dönemlerinde rüzgâr hızları artar. Mangalore'nin yıllık ortalama rüzgâr hızları, Kochi'ye benzer şekilde orta düzeydedir ve kıyı iklimi ile uyumludur. Puri'de, özellikle Bengal Körfezi'ne yakın olması nedeniyle, muson sezonunda rüzgâr hızlarında belirgin artışlar gözlemlenebilir.

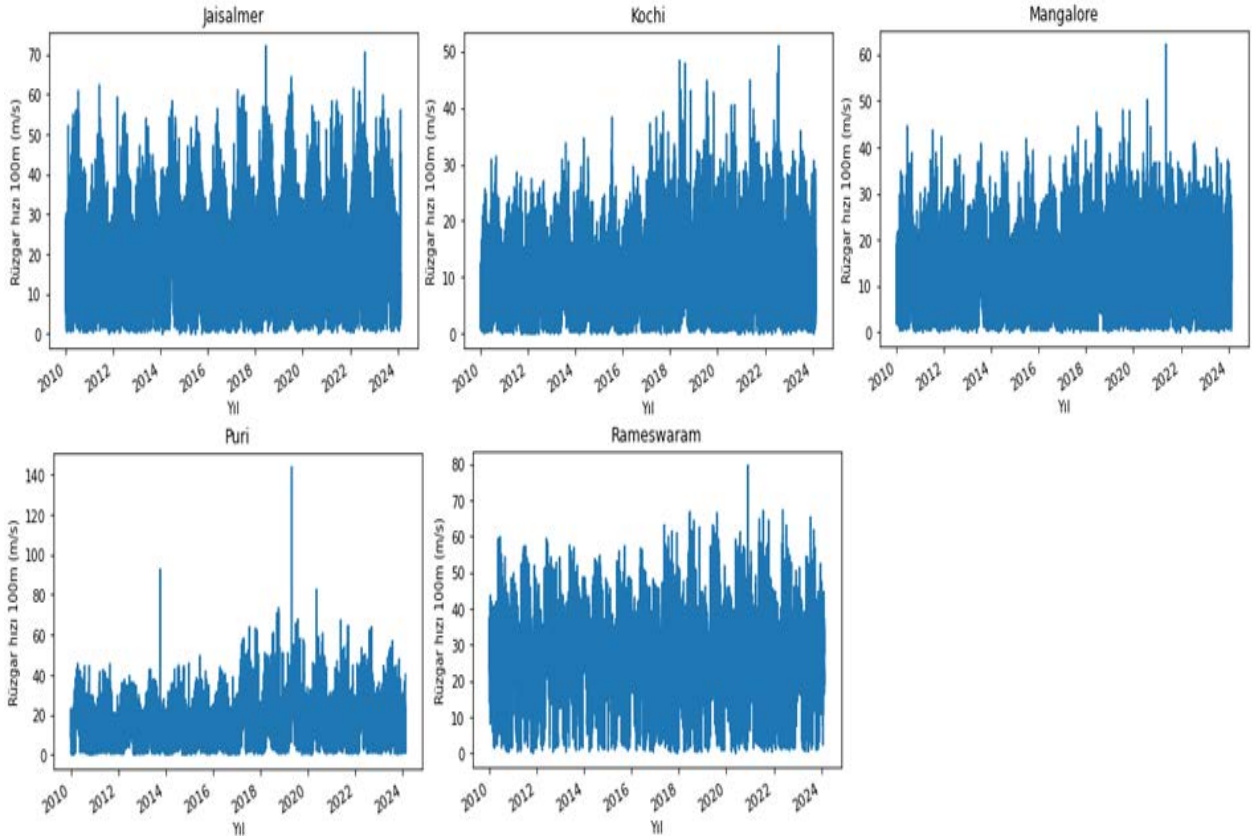
Rameswaram, yıl boyunca mevsimsel dalgalanmalar göstermektedir. Özellikle muson sezonunda rüzgâr hızlarında artışlar gözlenmektedir. Rameswaram'daki yıllık ortalama rüzgâr hızları genellikle orta düzeydedir ancak muson etkisiyle zaman zaman artış gösterebilir.

Şekil 2'de, python programlama dili ve spyder yazılımı kullanılarak görselleştirilen Ocak 2010 ile Şubat 2024 arasında Jaisalmer, Kochi, Mangalore, Puri ve

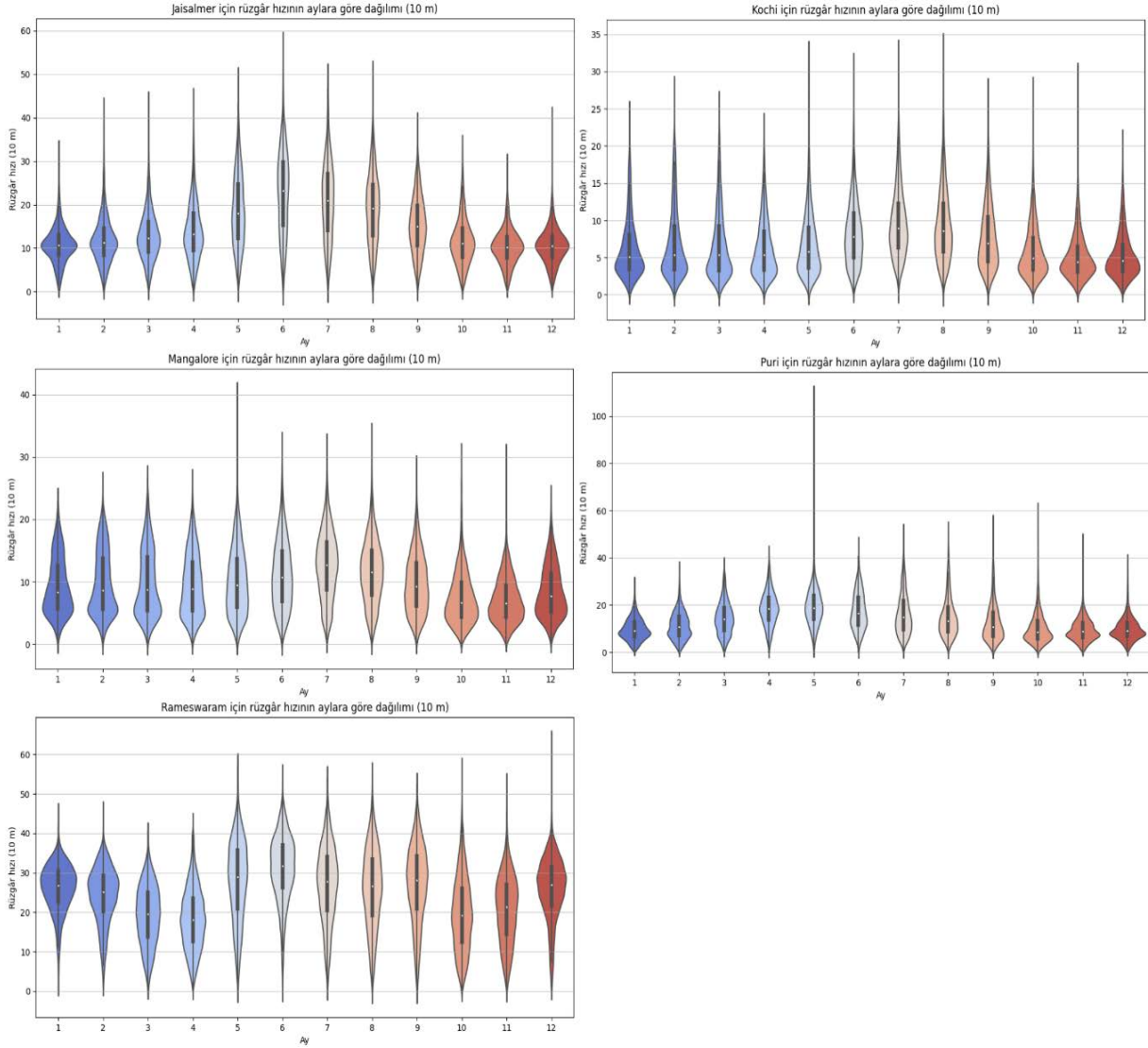
Rameswaram şehirlerindeki 100 metre yüksekliğindeki rüzgâr hızlarının zamana göre değişimi görülmektedir.

Şekil 2'de, şehirlerin 100 metre yüksekliğinde ölçülen rüzgâr hızlarının zaman içindeki değişimleri görülmektedir. Jaisalmer'de 100 metre yükseklikteki rüzgâr hızlarında belirgin mevsimsel dalgalanmalar gözlemlenebilir. Yıllık ortalama rüzgâr hızları oldukça yüksektir. 100 metre yüksekliğindeki rüzgâr hızlarının 15 yıllık ortalaması Jaisalmer için 20,90, Kochi için 10,68, Mangalore için 13,79, Puri için 18,94 ve Rameswaram için 27.52'dir. Jaisalmer'in çöl iklimi ve geniş açık alanları, bu yüksek hızların nedeni olarak görülebilir. Kochi'de mevsimsel rüzgâr hızları özellikle muson sezonunda artış göstermektedir. Kochi'nin yıllık ortalama rüzgâr hızları 100 metre yükseklikte daha düşüktür. Kıyı bölgesinde bulunan şehir, denizden gelen nemli hava akımları nedeniyle nispeten sabit ve orta hızda rüzgârlara sahiptir. Mangalore'de muson sezonunda rüzgâr hızlarında belirgin artışlar gözlemlenir. Puri'deki yıllık ortalama rüzgâr hızları muson ve siklon etkisiyle dalgalanabilir ve genellikle orta seviyelerde olabilir. Rameswaram'daki yıllık ortalama rüzgâr hızları 100 metre yükseklikte orta düzeydedir. Muson etkisiyle zaman zaman artışlar gözlenebilir.

Şekil 3'te şehirlerin 10 metre yüksekliğindeki rüzgâr hızlarının 15 yıllık periyot için aylık ortalamaları görülmektedir.



Şekil 2. 100 metre yüksekliğindeki rüzgâr hızlarının zamana göre değişimi



Şekil 3. Şehirlerin 10 metre yüksekliğindeki rüzgâr hızlarının aylara göre dağılımı

Şekil 4'te şehirlerin 100 metre yüksekliğindeki rüzgâr hızlarının 15 yıllık periyot için aylık ortalamaları görülmektedir.

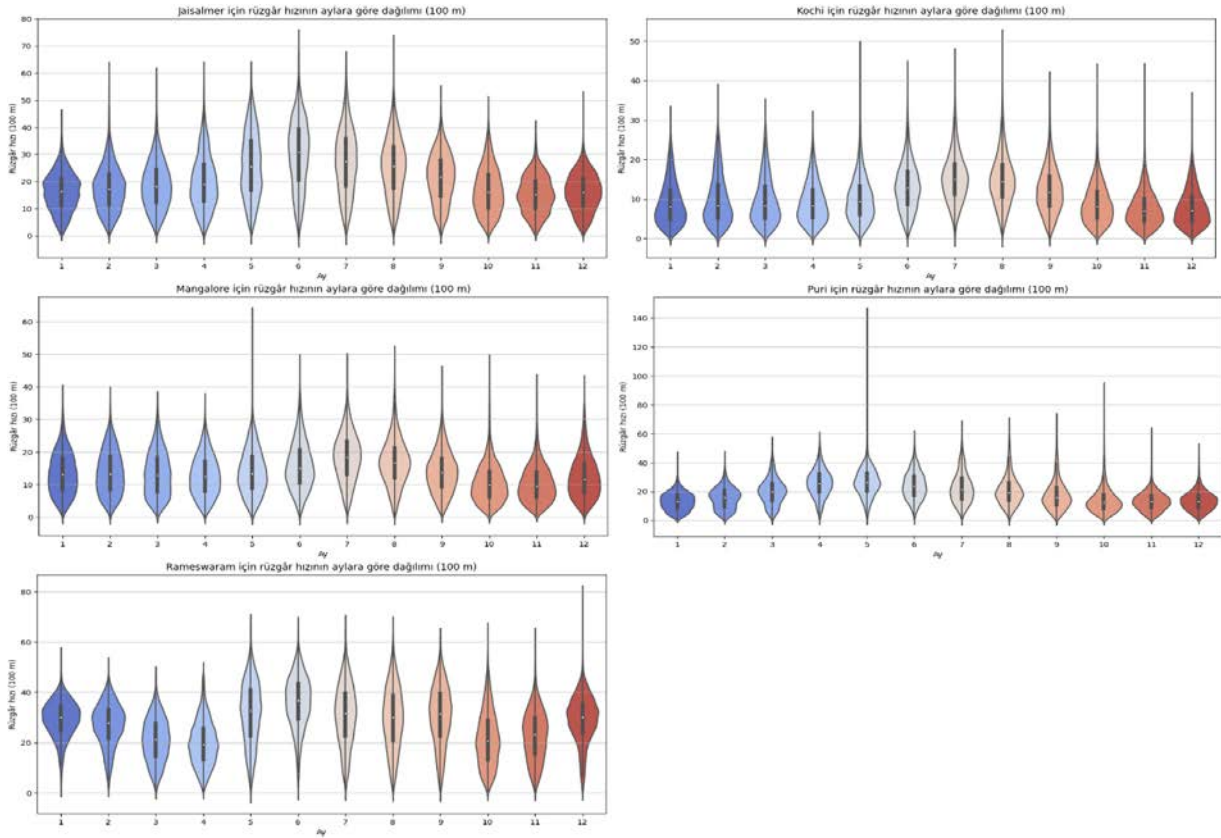
Şekil 3 ve Şekil 4'te görüldüğü gibi Jaisalmer'de kış aylarında, rüzgâr hızları genellikle düşüktür. Soğuk ve kuru hava hâkimdir. Bu dönemde rüzgâr hızları minimum seviyelerdedir. Sıcaklıkların artmasıyla rüzgâr hızları da yükselmektedir. Yaz aylarında rüzgâr hızları en yüksek seviyelere ulaşır. Bu dönem sıcak ve kuru hava koşullarının etkisindedir. Sonbaharda rüzgâr hızlarında düşüş görülmektedir. Eylül ayında yüksek olan rüzgâr hızları, Kasım ayına doğru azalmaktadır.

Kochi'de kış aylarında rüzgâr hızları genellikle düşüktür. Tropikal iklim etkisi ile rüzgâr hızları sabit ve hafiftir. Sıcaklıkların artmasıyla birlikte rüzgâr hızları da yavaş yavaş yükselmektedir. Yaz aylarında ve muson sezonunda rüzgâr hızlarında belirgin bir artış görülmektedir. Güneybatı musonlarının etkisiyle rüzgâr hızları en yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Sonbaharda rüzgâr hızları düşmeye başlamaktadır.

Mangalore'da kışın rüzgâr hızları nispeten düşüktür. Tropikal iklimin etkisiyle rüzgâr hızları sabit kalmaktadır. Sıcaklıkların artmasıyla birlikte rüzgâr hızları da yükselmektedir. Yaz aylarında rüzgâr hızları artmaktadır. Sonbaharda rüzgâr hızları azalmaya başlamaktadır.

Puri'de kışın rüzgâr hızları nispeten düşüktür. Bengal Körfezi'nin etkisiyle rüzgâr hızları sabit kalmaktadır. İlkbaharda rüzgâr hızlarında artış gözlemlenmektedir. Sıcaklıkların artmasıyla rüzgâr hızları da yükselmektedir. Bengal Körfezi'nden gelen rüzgârların etkisiyle rüzgâr hızları en yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Sonbaharda rüzgâr hızları azalmaya başlamaktadır.

Rameswaram'da kışın rüzgâr hızları genellikle düşüktür. Tropikal iklim etkisi ile rüzgâr hızları sabit ve hafiftir. İlkbaharda rüzgâr hızlarında artış gözlemlenmektedir. Yazın ve muson sezonunda rüzgâr hızlarında belirgin bir artış görülmektedir. Musonların etkisiyle rüzgâr hızları en yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Sonbaharda rüzgâr hızları düşmeye başlamaktadır.



Şekil 4. Şehirlerin 100 metre yüksekliğindeki rüzgâr hızlarının aylara göre dağılımı

### Tahmin Modelleri

RF bir topluluk öğrenme yaklaşımıdır. Rastgele öznitelik seçimine dayalı olarak oluşturulan ayrı bir sonlu grup karar ağacı tasarlamayı amaçlamaktadır. RF'ler, eğitimdeki farklılıklar nedeniyle güçlü genelleme kapasitelerine sahiptir ve ormandaki farklı karar ağaçlarını oluşturmak için kullanılan çift alt kümelerle sahiptir. Ancak sağlam ve etkili bir RF oluşturmak için karar ağaçlarının doğruluğunun ve çeşitliliğinin artırılması ile karar ağaçlarının sayısının azaltılması konularına dikkat edilmesi gerekmektedir [29].

Denetimli öğrenme algoritmalarından biri olan SVM, regresyon ve sınıflandırma sorunları için tasarlanmıştır. SVM'nin temel amacı, verileri en iyi şekilde ayıran hiper düzlemi bulmaktır. Bu hiper düzlem, farklı sınıflardaki veriler arasındaki en büyük marjini sağlar. Marjin, hiper düzlem ile en yakın veri noktaları arasındaki mesafeyi ifade eder. SVM algoritmasının, zaman serileri analizi, yüzlerin tespiti, bazı görüntülerin sınıflandırılması, metinlerin sınıflandırılması gibi uygulama alanlarında kullanılmaktadır [30].

CNN çok boyutlu girdilerin işlenmesinde kullanılan bir sinir ağıdır. Görüntü tanıma ve bilgisayarlı görmede kullanılan önemli araçlardan biri haline gelmiştir [31]. Geliştirilmelerinin nedeni 2 boyutlu görüntü verilerini tespit etmek olsa da tek değişkenli zaman serilerinin analizinde de etkin bir şekilde kullanılmaktadırlar.

Konvolüsyon, havuzlama ve tam bağlantılı katmanlar kullanılarak CNN oluşturulur [32].

LSTM bir tür tekrarlı sinir ağı modelidir. LSTM mimarisi, uzun vadeli bağımlılıkları sıralı bir şekilde öğrenebilen bellek hücreleri içerir [33]. LSTM ayrıca uzun vadeli bağımlılıklara sahip verileri analiz etmek ve anlamak için de kullanılır. Genellikle hava durumu tahminleri ve borsa fiyatları gibi zaman serisi verilerini analiz etmek için kullanılır [34].

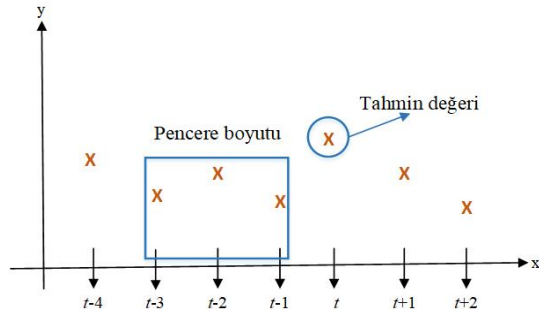
ANFIS, bulanık sistemlerden öğrenebilmekte ve yapay sinir ağlarının geri yayılımı yoluyla sonuçlar çıkarabilmektedir. Öğrenme kuralları olarak da bilinen eğitim kuralları bu amaçla kullanılır. Özellikle basit sınıflandırma sorunlarının çözümünde faydalıdır. Bu sayede girdi vektörleri ile etkili bir şekilde geliştirilebilirler. Girdi ve çıktı arasındaki doğrusal olmayan ilişkiyi kavrayabilir, sorunları hızlı ve güvenilir bir şekilde çözebilirler. ANFIS'in temel özelliği, bilgiyi nöronlar arasındaki etkileşimlere dayalı olarak işlemeleridir [35].

### Geliştirilen ConvLSTM Hibrit Modeli

Bu çalışmada kullanılan veri seti, saatlik olarak rüzgâr hızlarından oluşan bir zaman serisi veri setidir. Zaman serisi verilerinin, denetimli öğrenme modelleri tarafından işlenebilmesi için verilerin regresyon problemi yapısına dönüştürülmesi gereklidir. Bu amaçla Şekil 5'te



görüldüğü gibi kayan pencere kullanılarak zaman serisi verileri regresyon problemi yapısına dönüştürülmüştür.



Şekil 5. Kayan pencere yöntemi

Şekil 5'te örnek olarak boyutu 3 olan bir kayan pencerede görülmektedir.  $t-3$ ,  $t-2$  ve  $t-1$  zamanındaki veriler kayan pencereye girdi olarak sunulmakta,  $t$  zamanındaki veri ise çıktı olarak alınmaktadır. Kayan pencere boyutunu belirlemek için yapılan deneyler, 9 boyutunda bir pencere için en düşük hata değerlerine ulaşıldığını göstermiştir. Tablo 1'de örnek olarak Jaisalmer için 10 metre yükseklikte ölçülen rüzgâr hızının tahmini için kayan pencere boyutunun belirlenmesine yönelik deneysel çalışmanın sonuçları sunulmuştur.

Tablo 2. Kayan pencere yöntemi

Pencere	RMSE	MAE	R <sup>2</sup>
5	2.71	1.82	0.91
7	2.54	1.74	0.93
9	2.49	1.66	0.95
11	2.52	1.68	0.94

Tablo 2. Kayan pencere yöntemi

1.gözlem verisi	2.gözlem verisi	3.gözlem verisi	4.gözlem verisi	5.gözlem verisi	6.gözlem verisi	7.gözlem verisi	8.gözlem verisi	9.gözlem verisi	Çıktı verisi
7,20	6,98	6,69	6,69	5,35	6,13	6,98	6,92	6,48	5,44
6,98	6,69	6,69	5,35	6,13	6,98	6,92	6,48	5,44	5,09
6,69	6,69	5,35	6,13	6,98	6,92	6,48	5,44	5,09	6,83
6,69	5,35	6,13	6,98	6,92	6,48	5,44	5,09	6,83	7,62
5,35	6,13	6,98	6,92	6,48	5,44	5,09	6,83	7,62	8,89

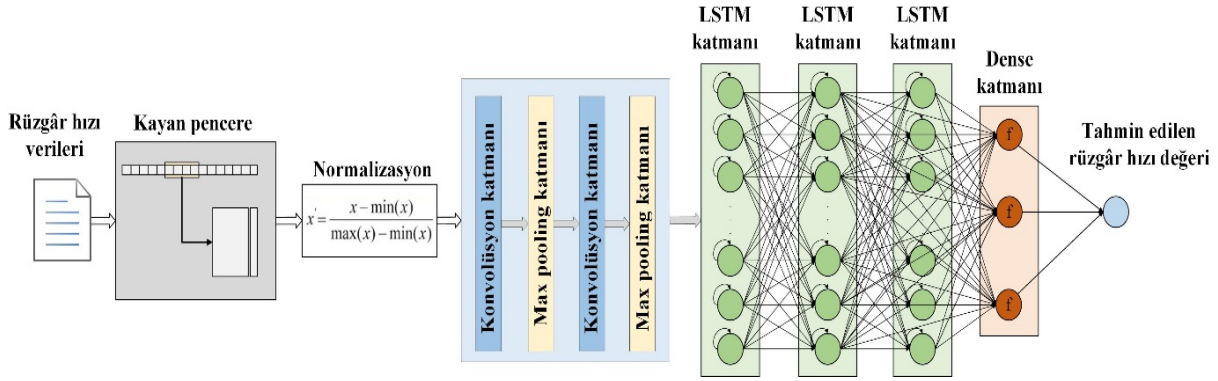
Regresyon problemi formatına dönüştürülen veri seti, min-max scaler kullanılarak ölçeklendirilmiştir. Veri setinin %33'ü test ve %67'si ise eğitim için kullanılmıştır. Bu oranlar yapılan deneysel çalışmalar neticesinde en düşük hata oranları elde edildiği için belirlenmiştir. Eğitim verilerinin %10'u ise model hiper-

Belirlenen 9 boyutundaki kayan pencere ilk 9 gözlem verisi girdi olarak sunulmuş ve 10. adımdaki gözlem verisi çıktı olacak şekilde denetimli öğrenme problemi yapısına dönüştürülmüştür. Her bir adımda kayan pencere bir gözlem adımı sağa kaydırılarak tüm gözlem verilerinin işlenmesi sağlanmıştır. Bu yöntem, geçmiş dokuz saati giriş olarak alıp onuncu saat için tahmin yapmayı sağlamaktadır. Kayan pencere boyutunun dokuz olarak belirlenmesi, yapılan deneylerde en düşük hata oranlarının elde edilmesini sağlamıştır. Ayrıca, veriler ölçeklendirme işlemi için Min-Max Scaler kullanılarak 0 ile 1 arasına normalize edilmiştir. Eğitim verilerinin %10'u, Grid Search yöntemi ile hiperparametre optimizasyonu için ayrılmıştır. Bu süreçler, modelin doğruluğunu artırmada kritik bir rol oynamıştır. Yapılan ön işleme adımları, ConvLSTM modelinin hem mekânsal hem de zamansal bağımlılıkları etkili bir şekilde öğrenmesini sağlamıştır. Özellikle, normalize edilen girişlerin ve kayan pencere yönteminin uygulanması, zaman serisi dinamiklerini daha hassas bir şekilde modellemeye olanak tanımıştır.

Tablo 2'de Jaisalmer şehrinin 10m rüzgâr hızı parametresi için kayan pencere yöntemine girdi olarak sunulan ve çıktı olarak elde edilecek olan gerçek değerler görülmektedir. Kullanılan veri seti 2010-01-01 00:00:00 tarih ve saatinden başlayarak 1 saat aralıklarla elde edilen ölçüm değerlerini göstermektedir. 1. Gözlem verisi 2010-01-01 00:00:00 tarih ve saatindeki rüzgâr hızını, 2. gözlem verisi ise 2010-01-01 01:00:00 tarih ve saatindeki rüzgâr hızını göstermektedir. 9. gözlem verisi 2010-01-01 08:00:00 tarih ve saatindeki rüzgâr hızını ve çıktı ise 2010-01-01 09:00:00 tarih ve saatindeki rüzgâr hızını göstermektedir.

parametrelerinin grid arama ile optimize edilmesi amacıyla kullanılmıştır.

ConvLSTM modeli, mekânsal ve zamansal verileri işlemek için CNN ve LSTM'in öne çıkan özelliklerini birleştiren hibrit bir modeldir. Geliştirilen ConvLSTM modelinin yapısı Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 6. Geliştirilen ConvLSTM modelinin mimarisi

Şekil 6'da görüldüğü gibi ConvLSTM giriş katmanı, konvolüsyon katmanları, pooling katmanları, LSTM katmanları, dense katmanı ve çıktı katmanından oluşmaktadır. Konvolüsyon katmanları, giriş verisinden mekânsal özelliklerin çıkarılmasını sağlamaktadır. Çıkarılan özellik haritalarına ReLU aktivasyon fonksiyonu uygulanmaktadır. Max pooling katmanları, özellik haritalarının boyutlarını azaltmak için kullanılmaktadır. LSTM katmanları, verideki zamana bağımlı uzun ve kısa vadeli bağımlılıkların belirlenmesini sağlamaktadır. LSTM katmanlarından elde edilen çıktılar dense katmanına gönderilmektedir ve nihai çıktı elde edilmektedir. ConvLSTM'de CNN katmanları, rüzgâr hızı verilerinin mekânsal özelliklerinin çıkarılmasından sorumludur. Çıkarılan özellikler, verinin zamansal dinamiklerini belirlemek için LSTM'e iletilmektedir. Bu sayede, ConvLSTM hem mekânsal hem de zamansal bağımlılıkları öğrenmektedir. ConvLSTM, CNN ve LSTM'nin etkili yönlerini birleştirerek daha yüksek bir tahmin doğruluğu sağlamaktadır. ConvLSTM'in hiper-parametreleri grid arama kullanılarak belirlenmiştir. Konvolüsyon katmanları, çekirdek boyutu 1 ve 64 filtreden oluşan 1D katmanlardır. Havuzlama katmanlarının çekirdek boyutu 1 ve havuzlama boyutu 2'dir. Ayrıca, her biri 64 nöron içeren 3 LSTM katmanı bulunmaktadır. LSTM'in epoch sayısı 100, batch size'ı 8, aktivasyon fonksiyonu ReLU, optimizier'i Adam ve kayıp fonksiyonu RMSE'dir.

ConvLSTM modelinde CNN katmanları, verinin mekânsal özelliklerini öğrenmek için kullanılır. Rüzgâr hızı gibi coğrafi verilerde mekânsal bağımlılıklar, özellikle farklı şehirlerin ve çevresel koşulların etkilerini anlamada kritik öneme sahiptir. Örneğin, bir şehirdeki rüzgâr hızı, o bölgedeki coğrafi faktörlere (dağlık alanlar, denize yakınlık, vb.) bağlı olarak değişir. CNN katmanları, bu tür mekânsal ilişkileri tespit edip öğrenerek, rüzgâr hızı tahminlerinde daha doğru sonuçlar elde edilmesini sağlar. LSTM katmanları, zaman serisi verilerindeki uzun vadeli bağımlılıkları öğrenir. Rüzgâr hızı gibi değişkenler, zaman içinde belli örüntüler gösterir ve geçmiş değerler, gelecekteki değerler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. LSTM, bu geçmiş bilgilere dayanarak, gelecekteki rüzgâr hızı tahminlerini yaparken, uzun vadeli bağımlılıkları etkili bir şekilde modelleyebilir. Bu, ConvLSTM modelinin zaman

indeki değişimlerin doğru şekilde yakalanmasına ve rüzgâr hızı tahminlerinin daha hassas olmasına olanak tanır.

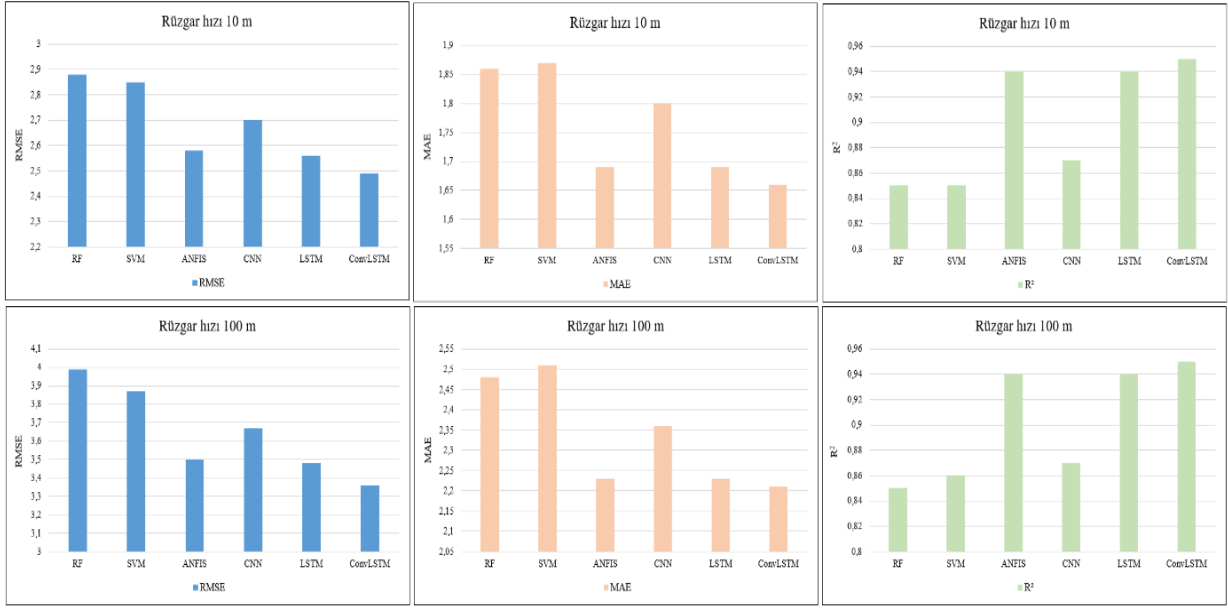
Mekânsal ve zamansal bağımlılıkların birleştirilmesi, modelin doğruluğunu artırır çünkü geleneksel modeller sadece bir tür bağımlılığı (ya mekânsal ya da zamansal) öğrenebilirken, ConvLSTM her ikisini de aynı anda işleyerek daha derin ve kapsamlı bir öğrenme sağlar. Bu, rüzgâr hızı gibi dinamik ve karmaşık verilerin daha güvenilir ve doğru bir şekilde tahmin edilmesini mümkün kılar.

## DENEYSEL SONUÇLAR

Bu çalışmada, Jaisalmer, Kochi, Mangalore, Puri ve Rameswaram'ın 10 metre ve 100 metre yükseklikte ölçülen rüzgâr hızlarının tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen ConvLSTM modeli RF, SVM, ANFIS, CNN ve LSTM ile uygulamalı bir şekilde karşılaştırılmıştır. Tablo 3 ve Şekil 7'de Jaisalmer için deneysel sonuçlar görülmektedir. Tablo 3 ve Şekil 7'de görüldüğü gibi ConvLSTM 10 metre yükseklikte ölçülen rüzgâr hızının tahmininde 0,95 R<sup>2</sup>, 100 metre yükseklikte ölçülen rüzgâr hızının tahmininde ise 0,95 R<sup>2</sup> ile karşılaştırılan modellerden daha başarılı olmuştur. ConvLSTM'in ardından sırasıyla LSTM, ANFIS, CNN, SVM ve RF başarılı olmuştur.

Tablo 3. Jaisalmer için deneysel sonuçlar

Model	Rüzgâr hızı 10 m			Rüzgâr hızı 100 m		
	RMS	MA	R <sup>2</sup>	RMS	MA	R <sup>2</sup>
RF	2,88	1,86	0,8	3,99	2,48	0,8
			5			5
SVM	2,85	1,87	0,8	3,87	2,51	0,8
			5			6
ANFIS	2,58	1,69	0,9	3,50	2,23	0,9
			4			4
CNN	2,70	1,80	0,8	3,67	2,36	0,8
			7			7
LSTM	2,56	1,69	0,9	3,48	2,23	0,9
			4			4
ConvLSTM	2,49	1,66	0,9	3,36	2,21	0,9
			5			5



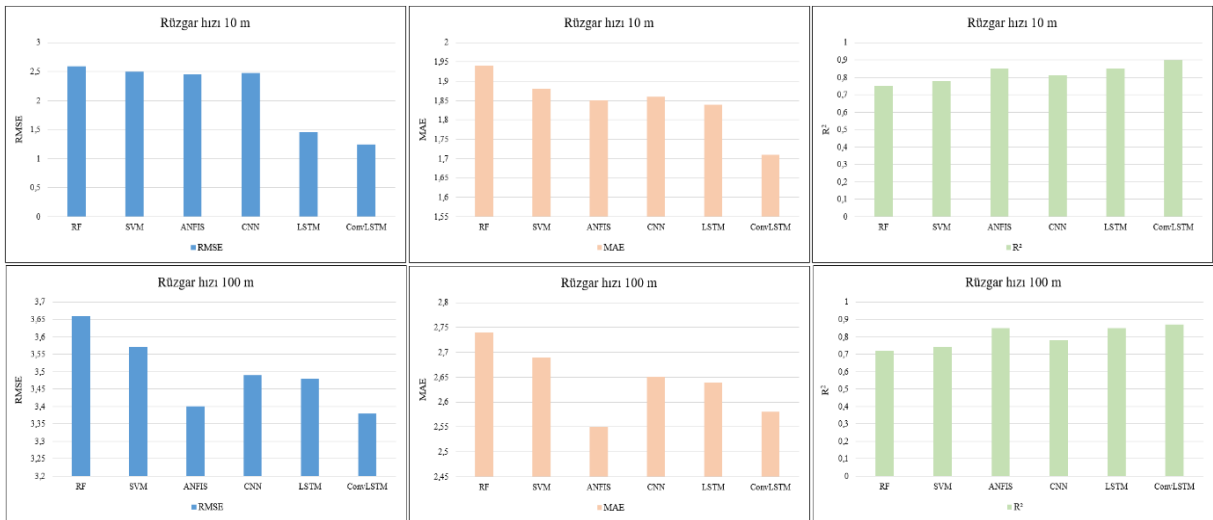
Şekil 7. Jaisalmer için deneysel sonuçlar

Tablo 4 ve Şekil 8’de görüldüğü gibi ConvLSTM 10 metre yükseklikte ölçülen rüzgâr hızının tahmininde 0,90 R<sup>2</sup>, 100 metre yükseklikte ölçülen rüzgâr hızının

tahmininde ise 0,87 R<sup>2</sup> ile karşılaştırılan modellerden daha başarılı olmuştur. ConvLSTM’in ardından sırasıyla LSTM, ANFIS, CNN, SVM ve RF başarılı olmuştur.

Tablo 4. Kochi şehri için deneysel sonuçlar

Model	Rüzgâr hızı 10 m			Rüzgâr hızı 100 m		
	RMSE	MAE	R <sup>2</sup>	RMSE	MAE	R <sup>2</sup>
RF	2,59	1,94	0,75	3,66	2,74	0,72
SVM	2,50	1,88	0,78	3,57	2,69	0,74
ANFIS	2,46	1,85	0,85	3,40	2,55	0,85
CNN	2,48	1,86	0,81	3,49	2,65	0,78
LSTM	1,46	1,84	0,85	3,48	2,64	0,85
ConvLSTM	1,25	1,71	0,90	3,38	2,58	0,87



Şekil 8. Kochi şehri için deneysel sonuçlar

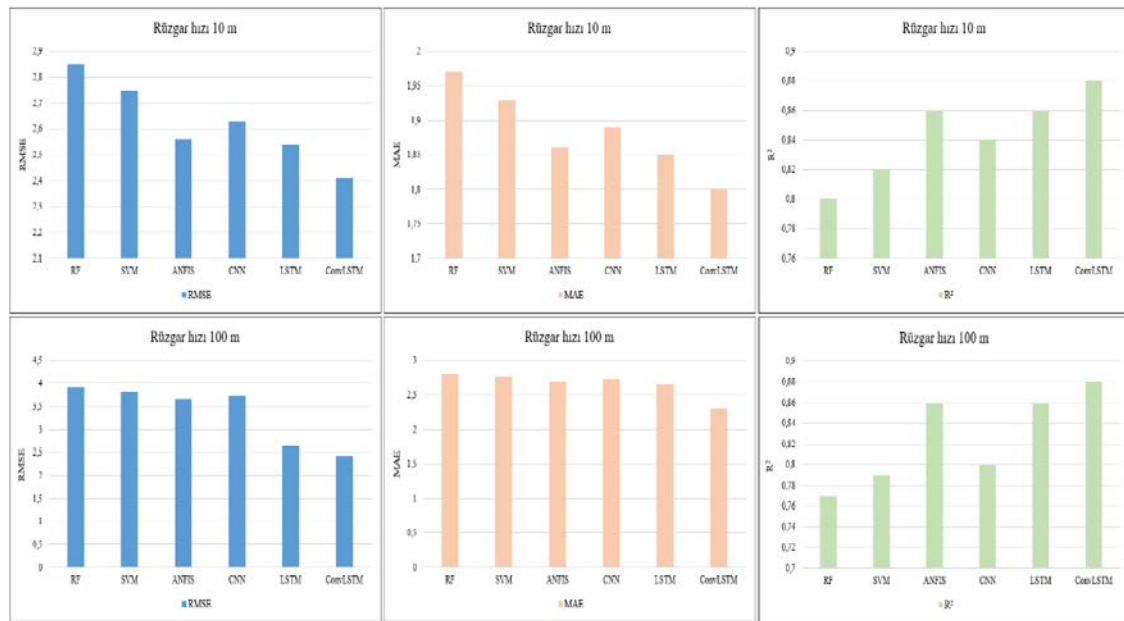


Tablo 5 ve Şekil 9’da Mangalore için deneysel sonuçlar görülmektedir. Tablo 5 ve Şekil 9’da görüldüğü gibi ConvLSTM 10 metre yükseklikte ölçülen rüzgâr hızının tahmininde 0,88  $R^2$ , 100 metre yükseklikte ölçülen

rüzgâr hızının tahmininde ise 0,88  $R^2$  ile karşılaştırılan modellerden daha başarılı olmuştur. ConvLSTM’in ardından sırasıyla LSTM, ANFIS, CNN, SVM ve RF başarılı olmuştur

**Tablo 5.** Mangalore için deneysel sonuçlar

Model	Rüzgâr hızı 10 m			Rüzgâr hızı 100 m		
	RMSE	MAE	$R^2$	RMSE	MAE	$R^2$
<b>RF</b>	2,85	1,97	0,80	3,92	2,80	0,77
<b>SVM</b>	2,75	1,93	0,82	3,83	2,77	0,79
<b>ANFIS</b>	2,56	1,86	0,86	3,67	2,69	0,86
<b>CNN</b>	2,63	1,89	0,84	3,73	2,74	0,80
<b>LSTM</b>	2,54	1,85	0,86	2,66	2,65	0,86
<b>ConvLSTM</b>	2,41	1,80	0,88	2,44	2,31	0,88



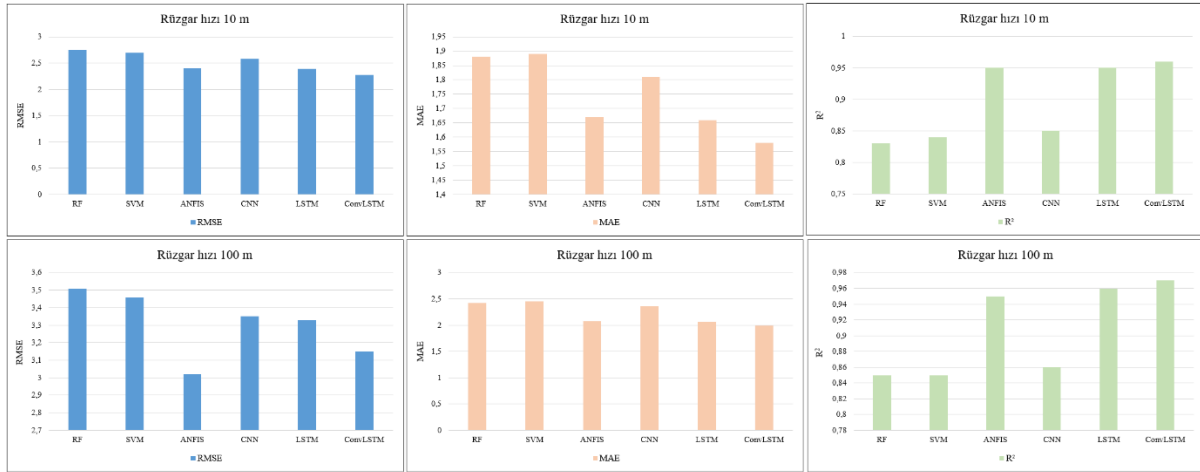
**Şekil 9.** Mangalore şehri için deneysel sonuçlar

Tablo 6 ve Şekil 10’da görüldüğü gibi ConvLSTM 10 metre yükseklikte ölçülen rüzgâr hızının tahmininde 0,96  $R^2$ , 100 metre yükseklikte ölçülen rüzgâr hızının

tahmininde ise 0,97  $R^2$  ile karşılaştırılan modellerden daha başarılı olmuştur. ConvLSTM’in ardından sırasıyla LSTM, ANFIS, CNN, SVM ve RF başarılı olmuştur.

**Tablo 6.** Puri şehri için deneysel sonuçlar

Model	Rüzgâr hızı 10 m			Rüzgâr hızı 100 m		
	RMSE	MAE	$R^2$	RMSE	MAE	$R^2$
<b>RF</b>	2,75	1,88	0,83	3,51	2,42	0,85
<b>SVM</b>	2,70	1,89	0,84	3,46	2,45	0,85
<b>ANFIS</b>	2,40	1,67	0,95	3,02	2,08	0,95
<b>CNN</b>	2,58	1,81	0,85	3,35	2,36	0,86
<b>LSTM</b>	2,39	1,66	0,95	3,33	2,07	0,96
<b>ConvLSTM</b>	2,28	1,58	0,96	3,15	1,99	0,97



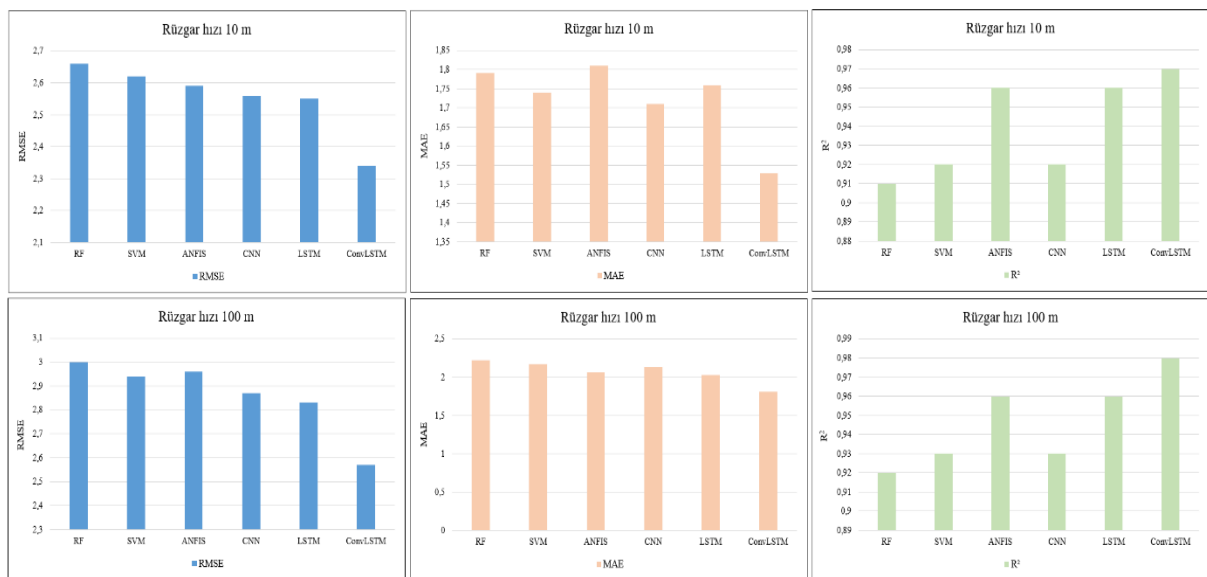
Şekil 10. Puri şehri için deneysel sonuçlar

Tablo 7 ve Şekil 11’de görüldüğü gibi ConvLSTM 10 metre yükseklikte ölçülen rüzgâr hızının tahmininde 0,97 R<sup>2</sup>, 100 metre yükseklikte ölçülen rüzgâr hızının tahmininde ise 0,98 R<sup>2</sup> ile karşılaştırılan

modellerden daha başarılı olmuştur. ConvLSTM’in ardından sırasıyla LSTM, ANFIS, CNN, SVM ve RF başarılı olmuştur.

Tablo 7. Rameswaram için deneysel sonuçlar

Model	Rüzgâr hızı 10 m			Rüzgâr hızı 100 m		
	RMSE	MAE	R <sup>2</sup>	RMSE	MAE	R <sup>2</sup>
RF	2,66	1,79	0,91	3,00	2,22	0,92
SVM	2,62	1,74	0,92	2,94	2,17	0,93
ANFIS	2,59	1,81	0,96	2,96	2,06	0,96
CNN	2,56	1,71	0,92	2,87	2,13	0,93
LSTM	2,55	1,76	0,96	2,83	2,03	0,96
ConvLSTM	2,34	1,53	0,97	2,57	1,81	0,98



Şekil 11. Rameswaram için deneysel sonuçlar

ConvLSTM modeli RF, SVM, ANFIS, CNN ve LSTM ile kapsamlı bir şekilde karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, ConvLSTM'in hem mekânsal hem de zamansal bağımlılıkları aynı anda işleyebilme yeteneği sayesinde diğer yöntemlerden üstün olduğunu göstermiştir. Özellikle, Jaisalmer ve Rameswaram şehirlerinde elde edilen 0,97 ve 0,98 gibi yüksek R<sup>2</sup> değerleri, diğer modellerin üzerinde bir başarı sunmaktadır. Ayrıca ConvLSTM, RMSE ve MAE değerlerinde en düşük hata oranlarına ulaşarak rüzgâr hızı tahmininde daha doğru ve güvenilir sonuçlar üretmiştir.

Deneysel sonuçlar, ConvLSTM'in ANFIS, LSTM, CNN, RF, SVM'den daha başarılı olduğunu göstermiştir. ConvLSTM, karşılaştırılan modellerin yetersiz kaldığı mekânsal ve zamansal bağımlılıkları birlikte işleyerek tahmin doğruluğunu artırır. Mekânsal ve zamansal verilerin dinamiklerini aynı anda işleyebilme kapasitesi, rüzgâr hızı gibi karmaşık değişkenlerin tahmininde etkinliği sağlar. ConvLSTM'in ANFIS'ten daha başarılı olması, ANFIS'in mekânsal ve zamansal verileri işleme yeteneğinin sınırlı olmasıyla açıklanabilir. ANFIS'in etkinliği yüksek boyuttaki karmaşık veri setlerinde sınırlıdır. ConvLSTM'in LSTM'den daha başarılı olması, ConvLSTM'in LSTM bileşeni yanında sahip olduğu CNN bileşenin etkisiyle yorumlanabilir. ConvLSTM bu sayede mekânsal ve zamansal verilerin dinamiklerini aynı anda yakalayarak daha doğru ve kapsamlı tahminler yapar. ConvLSTM'in CNN'den daha başarılı olması, ConvLSTM'in CNN'e ek olarak LSTM'nin zamansal bağımlılıkları öğrenme kapasitesini kullanması ile açıklanabilir. ConvLSTM'in RF ve SVM'den daha başarılı olması, ConvLSTM'in karmaşık örüntüleri daha iyi öğrenmesi ve modellenmesiyle açıklanabilir. RF ve SVM zaman serisi analizinde yeterince etkin değildir. ConvLSTM ve LSTM için t-istatistiği, p-değeri ve güven aralıkları her bir metrik için hesaplanarak Tablo 8'de sunulmuştur.

**Tablo 8.** ConvLSTM ve LSTM için t-istatistiği, p-değeri ve güven aralıkları

Test	RMSE	MAE	R <sup>2</sup>
t-istatistiği	-5.24	-2.91	-2.58
p-değeri	0.0063	0.0436	0.0412
LSTM güven aralığı	(1.71, 2.89)	(1.65, 1.87)	(1.85, 1.98)
ConvLSTM Güven Aralığı	(1.52, 2.79)	(1.52, 1.79)	(1.88, 1.98)

Tablo 8'de görüldüğü gibi RMSE, MAE ve R<sup>2</sup> metrikleri açısından elde edilen sonuçlar, ConvLSTM ve LSTM modelleri arasındaki farkın istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir (p < 0.05).

## TARTIŞMA

RF ve SVM modelleri, sınırlı mekânsal ve zamansal bağlamda statik özellikler arasında doğrudan ilişkiler kurar. Bu, zaman serisi verilerindeki dinamik değişimleri anlamada yetersiz kalmalarına neden olur. ConvLSTM ise mekânsal ve zamansal bağımlılıkları aynı anda

öğrenerek bu sınırlamayı aşar. ANFIS, bulanık mantık tabanlı çıkarımlar yapabilir ancak yüksek boyutlu, karmaşık zaman serisi verilerinde mekânsal veya zamansal özellikleri yeterince modelleyemez. ConvLSTM'in CNN ve LSTM bileşenleri, bu eksiklikleri tamamlamaktadır. CNN, mekânsal bağımlılıkları öğrenmede başarılıdır; LSTM ise zaman serisi verilerindeki uzun vadeli bağımlılıkları yakalamakta etkilidir. Ancak bu modeller, tek başına her iki bağımlılığı aynı anda işleyemez. ConvLSTM, bu iki yaklaşımı birleştirerek karmaşık ve dinamik verilerde daha yüksek doğruluk ve daha düşük hata oranları sunar. ConvLSTM'in CNN katmanları, rüzgâr hızına etki eden mekânsal özellikleri (örneğin coğrafi farklılıklar, yerel hava olayları) başarıyla öğrenir. LSTM katmanları, zaman serisi verilerindeki uzun vadeli değişimleri etkili bir şekilde modeller. ConvLSTM, bu iki yaklaşımı hibritleştirerek karmaşık verilerde daha kapsamlı bir modelleme sunar. Bu hibrit yapı sayesinde, düşük RMSE ve MAE değerleri ile yüksek R<sup>2</sup> performansına ulaşmıştır.

ConvLSTM'in sınırlılıkları veriye olan bağımlılık, verilerdeki karmaşıklık, donanım kapasitesi ve modelin genelleme kapasitesi açıklarından incelenebilir. ConvLSTM, büyük ve temiz veri setleriyle iyi performans gösterse de, veri kalitesi ve eksiklikleri modelin doğruluğunu etkileyebilir. Eksik veriler veya hatalı ölçümler, modelin tahminlerini olumsuz yönde etkileyebilir. Model, yüksek düzeyde gürültü içeren verilerde aşırı uyum yapabilir, bu da genel performansın düşmesine yol açabilir. Eğitim süresi ve kaynak tüketimi, büyük veri kümeleriyle çalışırken önemli bir zorluk oluşturabilir. Derin öğrenme modelleri, bazen genelleme yapma konusunda zorluk yaşayabilir ve belirli koşullarda aşırı uyum (overfitting) riski taşır. ConvLSTM, özellikle belirli şehirlerde veya spesifik iklim koşullarında eğitildiğinde, farklı coğrafi bölgelerdeki veriler üzerinde düşük performans gösterebilir. ConvLSTM modelinin hiperparametrelerinin yanlış seçilmesi, modelin başarısını olumsuz etkileyebilir.

## SONUÇ

Rüzgâr hızı tahmini, güvenliği ve verimliliği sağlama açısından birçok uygulama alanında kritik öneme sahiptir. Rüzgâr hızı tahmini lojistik, tarım, nakliye, enerji üretimi, afet yönetimi ve çevresel izleme uygulamalarında faydaları maksimize ederek toplumsal ve ekonomik hayatın birçok yönünü olumlu yönde etkiler. Doğru tahminler, enerji verimliliğini artırmak, güvenliği sağlamak, ekonomik faydalar sunmak ve çevresel yönetimi iyileştirmek açısından kritik rol oynar. Örneğin, enerji sektöründe rüzgâr türbinlerinin en uygun performansını sağlamak, havacılıkta güvenli uçuşlar düzenlemek veya tarımda ürünleri korumak için rüzgâr hızının doğru bir şekilde tahmin edilmesi gereklidir. Yapay zekâ yöntemleri, rüzgâr hızının dinamiklerini etkili bir şekilde belirleyerek, tahminlerin doğruluğunu artırır. Yapay zekâ yöntemleri, verilerdeki karmaşık örüntüleri öğrenir ve geleneksel yöntemlere göre daha başarılı tahminler üretir. Bu sayede enerji üretiminden

afet yönetimine kadar geniş bir yelpazede toplumsal ve ekonomik hayatın birçok yönünü olumlu yönde etkileyerek verimliliği artırır ve riskleri azaltır.

Bu çalışmada, Hindistan'ın en yüksek rüzgâr hızına sahip şehirlerinden olan Jaisalmer, Kochi, Mangalore, Puri ve Rameswaram şehirlerinin rüzgâr hızlarının tahmin etmek amacıyla hibrit ConvLSTM modeli geliştirilmiştir. ConvLSTM, CNN ve LSTM'in etkin özelliklerini bir araya getirerek mekansal ve zamansal verileri işleyebilme yeteneğine sahiptir. CNN girdi verilerinden özellik çıkarmak için LSTM ise zaman serisi verilerindeki uzun vadeli bağımlılıkların modellenmesi için kullanılmıştır. Şehirlerin saatlik olarak tutulan, 10 metre ve 100 metre yüksekliklerdeki rüzgâr hızı ölçümlerinden oluşan yaklaşık 15 yıllık bir veri seti kullanılmıştır. ConvLSTM, RF, SVM, ANFIS, CNN ve LSTM ile uygulamalı olarak karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, ConvLSTM'in her bir şehir ve rüzgâr hızı parametresinin neredeyse tamamında 0,9'un üzerinde R<sup>2</sup> değerine sahip olduğunu ve karşılaştırılan modellerden daha başarılı olduğunu göstermiştir.

ConvLSTM, zaman serisi verilerindeki uzun vadeli bağımlılıkları öğrenme kapasitesini CNN'in mekansal özellik çıkarma yeteneği ile birleştirerek, karmaşık ve dinamik verilerin tahmininde önemli avantajlar sunar. ConvLSTM'in bu başarısı, rüzgâr hızı gibi karmaşık ve çok boyutlu verilerin tahmininde de potansiyelini ortaya koymaktadır.

ConvLSTM'in mekansal ve zamansal bağımlılıkları birlikte işleyebilme kapasitesi, literatürde benzer çalışmalarda da kullanılmıştır. Ancak literatürde aynı veri setini ve tarih aralıklarını kullanarak yapılmış bir çalışma yoktur. ConvLSTM, CNN ve LSTM bileşenleri sayesinde, literatürdeki çalışmalarda da görüldüğü gibi mekansal ve zamansal özelliklerin etkili bir şekilde işlenmesini sağlamıştır. Elde edilen sonuçlar, bu çalışmadaki bulgularla tutarlıdır. Elde edilen yüksek R<sup>2</sup> değerleri, ConvLSTM'in karmaşık ve dinamik rüzgâr hızı verilerini etkili bir şekilde tahmin etme kapasitesini desteklemektedir. Bu sonuçlar, ConvLSTM'in zaman serisi ve mekansal veri tahminlerinde literatürdeki diğer derin öğrenme yöntemleriyle karşılaştırıldığında nasıl bir avantaja sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Geliştirilen model yenilenebilir enerji, tarım, afet yönetimi, ulaşım ve kentleşme gibi potansiyel uygulama alanlarına sahiptir. Çalışmada geliştirilen ConvLSTM modelinin rüzgâr hızı tahmini, özellikle rüzgâr türbinlerinin verimliliğini artırmak için önemli bir araç olabilir. Doğru rüzgâr hızı tahminleri, rüzgâr santrallerinin daha etkin bir şekilde işletilmesini sağlar, enerji üretiminin optimize edilmesine yardımcı olur ve böylece enerji maliyetlerini düşürür. Ayrıca, rüzgâr enerjisinin şebekeye entegrasyonu için güvenilir tahminler sağlanabilir. Rüzgâr hızı tahminlerinin tarım sektöründe, özellikle açık hava tarımı ve sulama sistemlerinin yönetilmesinde kritik bir rolü vardır. Bu tür tahminler, mahsullerin rüzgârın etkisiyle zarar görmemesi için tarımsal planlamayı iyileştirebilir ve aynı zamanda sulama sistemlerinin daha verimli çalışmasını sağlayabilir. Rüzgâr hızı tahminleri, doğal afetler (örneğin, fırtına ve kasırga tahminleri) konusunda erken uyarı sistemlerinin

geliştirilmesinde de kullanılabilir. Rüzgâr hızı değişimlerini tahmin etmek, uçuş rotalarının ve deniz yollarının daha güvenli bir şekilde planlanmasına yardımcı olabilir. Yapıların rüzgâr yüklerini karşılayabilmesi için bu tür tahminler inşaat mühendisliği alanında karar verme süreçlerine dâhil edilebilir.

Gelecek çalışmalarda, veri kaynaklarının artırılması ve daha geniş bir coğrafi kapsama alanına sahip verilerin eklenmesi, modelin genelleme kapasitesini artırabilir. Özellikle farklı iklim bölgelerinden ve farklı yüksekliklerden alınan ölçümlerle modelin performansı daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilebilir. ConvLSTM'in CNN ve LSTM bileşenlerinden oluşan hibrit yapısı oldukça etkili olsa da, dikkat mekanizmaları (attention mechanisms) veya Transformer tabanlı modeller gibi modern yaklaşımlar ile zenginleştirilmesi, tahmin doğruluğunu artırabilir.

## KAYNAKÇA

- [1] Jaseena K.U., Koor B.C., Deterministic weather forecasting models based on intelligent predictors: A survey, *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*. 34(6): 3393-3412, 2022.
- [2] Xu M., Yu L., Liang K., Vihma T., Bozkurt D., Hu X., Yang Q., Dominant role of vertical air flows in the unprecedented warming on the Antarctic Peninsula in February 2020, *Communications Earth and Environment*. 2(1), 2021.
- [3] Van Haaren R., Fthenakis V.. GIS-based wind farm site selection using spatial multi-criteria analysis (SMCA): Evaluating the case for New York State, *Renewable and sustainable energy reviews*. 15(7): 3332-3340, 2011.
- [4] Jing H., Li W., Su Y., Zhao W., Zhang J., Qiao M., Liu Q., Numerical study of wind characteristics at a long-span bridge site in mountain valley, *Physics of Fluids*. 36(3), 2024.
- [5] Young I.R., Kirezci E., Ribal A., The global wind resource observed by scatterometer, *Remote Sensing*. 12(18), 2020.
- [6] Amini M., Memari A.M., Review of literature on performance of coastal residential buildings under hurricane conditions and lessons learned, *Journal of performance of constructed facilities*. 34(6), 2020.
- [7] Ma L., Bocchini P., Christou V., Fragility models of electrical conductors in power transmission networks subjected to hurricanes, *Structural Safety*. 82, 2020.
- [8] Sibanda S., Workneh T.S., Potential causes of postharvest losses, low-cost cooling technology for fresh produce farmers in Sub-Saharan Africa, *African Journal of Agricultural Research*. 16(5): 553-566, 2020.
- [9] Brune S., Keller J.D., Wahl S., Evaluation of wind speed estimates in reanalyses for wind energy applications, *Advances in Science and Research*. 18: 115-126, 2021.
- [10] Gliksmann D., Averbeck P., Becker N., Gardiner B., Goldberg V., Grieger J., Franzke C.L., Wind and storm damage: From Meteorology to Impacts, *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*. 1-47, 2022.
- [11] Neo E.X., Hasikin K., Lai K.W., Mokhtar M.I., Azizan M.M., Hizaddin H.F., Razak S.A., Artificial intelligence-assisted air quality monitoring for smart city management, *PeerJ Computer Science*. 9, 2023.
- [12] Dranka G.G., Ferreira P., Vaz A.I.F., Integrating supply and demand-side management in renewable-based energy systems, *Energy*. 232, 2021.
- [13] Rosenow J., Lindner M., Scheiderer J., Advanced flight planning and the benefit of in-flight aircraft trajectory optimization, *Sustainability*.; 13(3), 2021.
- [14] Gulpe I., A review on weather impact on aviation operations: Visibility, wind, precipitation, icing, *Journal of*

- Airline Operations and Aviation Management. 2(1): 1-44, 2023.
- [15] De Perez E.C., Berse K.B., Depante L.A.C., Easton-Calabria E., Evidente E.P.R., Ezike T., Van Sant C., Learning from the past in moving to the future: Invest in communication and response to weather early warnings to reduce death and damage, *Climate Risk Management*. 38, 2022.
- [16] Jovanovic N., Pereira L.S., Paredes P., Pôças I., Cantore V., Todorovic M., A review of strategies, methods and technologies to reduce non-beneficial consumptive water use on farms considering the FAO56 methods, *Agricultural water management*. 239, 2020.
- [17] Giovannini L., Ferrero E., Karl T., Rotach M.W., Staquet C., Trini Castelli S., Zardi D., Atmospheric pollutant dispersion over complex terrain: Challenges and needs for improving air quality measurements and modelling, *Atmosphere*. 11(6), 2020.
- [18] Malik P., Gehlot A., Singh R., Gupta L.R., Thakur A.K., A review on ANN based model for solar radiation and wind speed prediction with real-time data, *Archives of Computational Methods in Engineering*. 29(5): 3183-3201, 2022.
- [19] Aggarwal D., Sharma D., Saxena A.B., Role of AI in cyber security through Anomaly detection and Predictive analysis, *Journal of Informatics Education and Research*. 3(2), 2023.
- [20] Kosovic I.N., Mastelic T., Ivankovic D., Using Artificial Intelligence on environmental data from Internet of Things for estimating solar radiation: Comprehensive analysis, *Journal of cleaner production*. 266, 2020.
- [21] Dewitte S., Cornelis J.P., Müller R., Munteanu A., Artificial intelligence revolutionises weather forecast, climate monitoring and decadal prediction, *Remote Sensing*. 13(16), 2021.
- [22] Subbiah S.S., Paramasivan S.K., Arockiasamy K., Senthivel S., Thangavel M., Deep Learning for Wind Speed Forecasting Using Bi-LSTM with Selected Features, *Intelligent Automation and Soft Computing*. 35(3), 2023.
- [23] Chen P., Han D., Effective wind speed estimation study of the wind turbine based on deep learning, *Energy*. 247, 2022.
- [24] Chen X., Yu R., Ullah S., Wu D., Li Z., Li Q., Zhang Y., A novel loss function of deep learning in wind speed forecasting, *Energy*. 238, 2022.
- [25] Han Y., Mi L., Shen L., Cai C.S., Liu Y., Li K., Xu G., A short-term wind speed prediction method utilizing novel hybrid deep learning algorithms to correct numerical weather forecasting, *Applied Energy*. 312, 2022.
- [26] Khodayar M., Saffari M., Williams M., Jalali M.J., Interval deep learning architecture with rough pattern recognition and fuzzy inference for short-term wind speed forecasting, *Energy*. 254, 2022.
- [27] Hao Y., Yang W., Yin K., Novel wind speed forecasting model based on a deep learning combined strategy in urban energy systems, *Expert Systems with Applications*. 219, 2023.
- [28] Indian Cities Weather 2010-2024: Dive In!. <https://www.kaggle.com/datasets/mukeshdevrath007/indian-5000-cities-weather-data> (Erişim tarihi: 15.04.2024)
- [29] Karabadi N.E.I., Korba A.A., Assi A., Seridi H., Aridhi S., Dhifli W., Accuracy and diversity-aware multi-objective approach for random forest construction, *Expert Systems with Applications*. 225, 2023.
- [30] Bansal M., Goyal A., Choudhary A., A comparative analysis of K-nearest neighbor, genetic, support vector machine, decision tree, and long short term memory algorithms in machine learning, *Decision Analytics Journal*. 3, 2022.
- [31] Canbay, Y., Adsiz, S., Canbay, P., Privacy-Preserving Transfer Learning Framework for Kidney Disease Detection, *Applied Sciences*, 14(19), 8629, 2024.
- [32] Kaya, M., Bilge, H. Ş., Benzerlik Tabanlı Öğrenme Kullanarak Histopatolojik Görüntülerin Sınıflandırılması. *EMO Bilimsel Dergi*, 14(2): 49-58, 2024.
- [33] Utku, A., Hindistan'daki Turistik Şehirlerin İklim Değişkenlerinin Tahminine Yönelik Hibrit ConvGRU Modeli. *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, 6(2): 165-176, 2024.
- [34] Utku, A., Hybrid CNN-LSTM Model for Air Quality Prediction: A Case Study for Gurugram. *Journal of Soft Computing and Artificial Intelligence*, 5(1): 33-40, 2024.
- [35] Mohammadi B., Mehdizadeh S., Ahmadi F., Lien N.T.T., Linh N.T.T., Pham Q.B., Developing hybrid time series and artificial intelligence models for estimating air temperatures, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 35: 1189-1204, 2021.

**MAUNFBD**  
**Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**  
**Mus Alparslan University Journal of Science**

**Yazım Kuralları**

*Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Haziran ve Aralık sayısı olmak üzere yılda iki defa yayımlanan uluslararası hakemli bir dergidir. Derginin asıl amacı fen bilimleri, temel alanlar ve mühendislik alanlarında nitelikli akademik çalışmaların yayımlanmasına katkı yapmaktır.*

*Dergide yayımlanan makaleler yazı işlerinin izni olmaksızın başka hiç bir yerde yayımlanamaz veya bildiri olarak sunulamaz. Kısmen veya tamamen yayımlanan makaleler kaynak gösterilmeden hiçbir yerde kullanılamaz. Dergiye gönderilen makalelerin içerikleri özgün, daha önce herhangi bir yerde yayımlanmamış veya yayımlanmak üzere gönderilmemiş olmalıdır. Makaledeki yazarlar isim sırası konusunda fikir birliğine sahip olmalıdır.*

*Makalenin hazırlanması sırasında yardımcı olması amacıyla, internet sitemizde yazarlar için linkinin altında yer alan **MAUNFBD** Dergisi yazım kurallarına göre hazırlanmış "örnek\_makale" dosyasını bilgisayarınıza indirmeniz ve makalenizi bu makaleyi örnek alarak hazırlamanız, düzenlemelerde kolaylık ve zaman tasarrufu sağlayacaktır. Bu makaleyi bilgisayarınıza Word programında şablon (template) olarak kaydederek de makalenizi hazırlayabilirsiniz.*

- Makaleler MS Word 2007 veya üstü bir sürümde hazırlanarak gönderilmelidir.
- Sayfa yapısı özel boyutta (15.5x23 cm), MS Word programında, Times New Roman veya benzeri bir yazı karakteri ile 10 punto, tek satır aralığıyla yazılmalıdır. Sayfa kenarlarında üst 2.5 cm olmak üzere diğer kenarlar için 2.5 cm boşluk bırakılmalı ve sayfalar numaralandırılmalıdır.
- Yazar(lar)ın ad(lar) ve soyad(lar), kurumsal unvanları; yazar(lar)ın görev yaptığı kurum(lar) ve e-posta adres(ler) bilgileri verilmelidir. Ayrıca makalelerde sorumlu yazar belirtilmelidir. Times New Roman 10 punto, tek satır aralığıyla yazılmalıdır.
- Makale başlığı, içerikle uyumlu, içeriği en iyi ifade eden bir başlık olmalıdır. Başlık, kalın ve 12 punto büyüklüğünde olmalı ve ilk harfler büyük olacak şekilde sayfa ortalanarak yazılmalıdır. Makaleler aynı özellikte İngilizce bir başlık/title içermelidir.
- Makalenin başında, konuyu kısa ve öz biçimde ifade eden ve en az 75, en fazla 150 kelimedenden oluşan Türkçe "Öz" bulunmalıdır. Öz içinde, yararlanılan kaynaklara, şekil ve çizelge numaralarına değinilmemelidir. Adres/ler den 2 satır boşluk bırakıldıktan sonra, Times New Roman 10 punto, tek satır aralığıyla yazılmalıdır. Özün altında bir satır boşluk bırakılarak, en az 3, en çok 6 sözcükten oluşan anahtar kelimeler verilmelidir. Anahtar kelimeler makale içeriği ile uyumlu ve kapsayıcı olmalıdır. Aynı şekilde makaleler İngilizce bir başlık/title, anahtar sözcükler/keywords ve öz/abstract içermelidir.
- **MAUNFBD**'in yayın dili Türkçe ve İngilizcedir.
- Herhangi bir sempozyum veya kongrede sunulmuş olan çalışmalar kongrenin adı, yeri ve tarihi belirtilerek yayımlanabilir. Bir araştırma kurumu veya fonu tarafından desteklenen çalışmalarda desteği sağlayan kuruluşun adı ve proje numarası verilmelidir.
- Makaleler Giriş, Materyal ve Metod, Deneysel Kısım, Gereç ve Yöntem, Tartışma, Sonuç vb. yer alacak şekilde hazırlanmalı ve alt başlıklar ikinci derece başlıklar Times New Roman 10 punto ile sağa hizalı olarak düzenlenmelidir.
- Formüller ve denklemler Math Type ya da Word Denklem Düzenleyici kullanılarak yazılmalıdır.
- Çalışma, dil bilgisi kurallarına uygun olmalıdır. Makalede noktalama işaretlerinin kullanımında, kelime ve kısaltmaların yazımında en son çıkan TDK Yazım Kılavuzu esas alınmalı, açık ve yalın bir anlatım yolu izlenmeli, amaç ve kapsam dışına taşan gereksiz bilgilere yer verilmemelidir. Makalenin hazırlanmasında geçerli bilimsel yöntemlere uyulmalı, çalışmanın konusu, amacı, kapsamı, hazırlanma gerekçesi vb. bilgiler yeterli ölçüde ve belirli bir düzen içinde verilmelidir.
- Bir makalede sırasıyla özet, ana metnin bölümleri, kaynakça ve (varsa) ekler bulunmalıdır. Makalenin bir "Giriş" ve bir "Sonuç" bölümü bulunmalıdır. "Giriş" çalışmanın amacı, önemi, dönemi, kapsamı, veri metodolojisi ve planını mutlaka kapsamalıdır. Konu gerektiriyorsa literatür tartışması da bu kısımda verilebilir. "Sonuç" araştırmanın amaç ve kapsamına uygun olmalı, ana çizgileriyle ve öz olarak verilmelidir. Metinde sözü edilmeyen hususlara "Sonuç"ta yer verilmemelidir. Belli bir düzen sağlamak amacıyla ana, ara ve alt başlıklar kullanılabilir.
- Tablo/Şekillerin numarası ve başlığı bulunmalıdır. Tablo çiziminde dikey çizgiler kullanılmamalıdır. Yatay çizgiler ise sadece tablo içindeki alt başlıkları birbirinden ayırmak için kullanılmalıdır. Tablo/Şekil numarası üste, tam sola dayalı olarak Times New Roman 10 punto yazılmalı; tablo/şekil adı ise, her sözcüğün ilk harfi büyük olacak şekilde yazılmalıdır. Ayrıca tablo/şekiller siyah beyaz baskıya uygun hazırlanmalıdır.
- Makalede, düzenli bir bilgi aktarımı sağlamak üzere ana, ara ve alt başlıklar kullanılabilir. Makale başlığı dışındaki diğer tüm başlıklar 10 punto yazılmalıdır. Birinci derece başlıklar büyük ve koyu karakterde; ikinci derece başlıklar, yalnız ilk harfleri büyük ve koyu olmayan; üçüncü derece başlıklar ise yalnız ilk harfleri büyük, koyu olmayan ve italik harflerle yazılmalıdır. Ayrıca başlıklar, öncesi ve sonrası 6 nk olacak şekilde ayarlanmalıdır.

**MAUNFBD**  
**Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**  
**Mus Alparslan University Journal of Science**

**BİRİNCİ DERECE BAŞLIK**

İkinci Derece Başlık

*Üçüncü Derece Başlık*

- Kaynak göstermede makale içerisinde “köşeli parantez içerisinde numara” ile yazılmalıdır. Her kaynak kendi orijinal dilinde verilmelidir. Kaynaklar Times New Roman 9 punto ile yazılmalıdır. Kaynaklar yazılırken sıralama aşağıdaki şekilde olmalıdır:
- Chen Y. R., Chao K., Kim M. S. Machine vision technology for agricultural applications, Computers and Electronics in Agriculture, 36, 173-191, 2002.
- Kumar A. Computer vision based fabric defect detection: a survey, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 55, 348-363, 2008.
- Yetis H., Baygin M., Karaköse M. A New Micro Genetic Algorithm Based Image Stitching Approach for Camera Arrays at Production Lines, The 5th International Conference on Manufacturing Engineering and Process (ICMEP 2016), 25-27 May, 2016.
- Aydın I., Karaköse E., Karaköse M., Gençoğlu M.T., Akin E., A New Computer Vision Approach for Active Pantograph Control, IEEE International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (IEEE INISTA 2013), Albena, Bulgaria, 2013.
- Lim S. H. Video-processing applications of high speed cmos image sensors, The Degree of Doctor of Philosophy, Stanford University, 2003.
- **MAUNFBD'e** yazım kurallarına uygun olarak gönderilen makaleler, daha sonraki aşamada intihal denetiminden geçirilir. Dergide intihal denetimi iThenticate programı ile yapılmaktadır ve intihal denetiminde kabul edilebilir benzerlik oranı en fazla %20 olmalıdır.
- Yayım aşamasının ilk adımı için makaleler Online Başvuru Sistemi aracılığıyla yollanmalıdır. Başvurunun hemen ardından elektronik posta adresinize otomatik olarak bir onay mesajı gönderilecektir. Daha fazla bilgi için <http://dergipark.gov.tr/MAUNfbd> elektronik adresi aracılığıyla editörümüzle bağlantıya geçilebilir.



## Instructions for Authors

**MAUNFBD** is an international peer-reviewed journal that is published two times a year. The purpose of the journal is to make contributions to publishing qualified academic studies in sciences, basic and engineering areas.

The articles that are published in the journal cannot be published or presented anywhere else unless permission is granted from the editorial board. The articles that are published either partially or completely cannot be used anywhere else unless reference is given. The content of the articles that are sent to the journal has to be authentic, not previously published or sent to be published. The authors of the articles have to have a consensus regarding the list of the names in the article.

If you download the "sample article" that was prepared according to spelling rules and format of the **MAUNFBD** Journal from our website through the link for authors to help you prepare the article, this will save your time and facilitate the preparation process. You can also prepare your article by saving this sample as a template on the Microsoft Word program.

- The articles should be in MS Word 2007 or higher version.
- The layout has to be custom-designed (15.5x23 cm). The file format has to be MS Word. The font has to be Times New Roman or a similar one with a size of 10. The file has to have single-line spacing. Page margins have to be 2.5 cm on the top and 2.5 cm for all the other sides. The pages have to be numbered.
- The articles need to include the name(s), surname(s), institutional title(s), institution name(s), and e-mail address(es) of the author(s). In addition, the corresponding author has to be indicated in the articles. The font has to be Times New Roman with a size of 10 and single line spacing.
- The title of the article has to be consistent with the content and must reflect the content in the best way possible. The title has to be boldface with a font size of 12. The first letter of all the words has to be uppercase. The title has to be centered. The articles need to have an English title with the same properties.
- The article needs to include an "Abstract" at the beginning not less than 75 words nor longer than 150 words summarizing the content in the most precise and concise way. The abstract must not include references, figures, and table numbers. Leaving a space under the abstract, the author has to add keywords including at least 3 and utmost 6 words. The keywords have to be consistent with the content and need to be comprehensive. Similarly, the articles have to include an English title, keywords, and abstract.
- **MAUNFBD** is published in Turkish and English.
- The works that are presented in any symposium or congress can be published after specifying the name, place and the date of the congress. The works that are supported by a research organization or fund have to indicate the name of the supportive organization and the number of project.
- The articles have to be organized as introduction, body, experimental, result and discussion and conclusion. Sub-titles and lower-level titles have to have a font size of 10 and be right-aligned.
- Formulas and equations need to be written via Math Type or Word Equation Editor.
- The study has to comply with grammatical rules. The latest Turkish Language Association Spell Check has to be employed regarding the use of punctuation, spelling of the words, and abbreviations. The text is expected to be clear and simple. No expressions out of purpose and scope must be included in the work. The valid scientific methods have to be employed to prepare the article. The content, purpose, scope, justification, etc. of the study have to be provided as much as needed in a certain order.
- An article is expected to include abstract, sections of the main text, references, and appendices (if there is any) respectively. An article has to have an "Introduction" and "Conclusion" sections. The "Introduction" is definitely expected to include the purpose, importance, period, scope, data methodology, and outline of the study. If it is necessary for the subject to be dealt with, literature review can be given in this section as well. The "conclusion" needs to be in compliance with the study's purpose and scope. It needs to be given generally and concisely. The points that are not mentioned within the text must not be included in "conclusion". Headings, titles, and sub-titles can be used to organize the text.
- Tables/Figures need to be numbered and given with their titles. No vertical lines must be used to draw the tables. Horizontal lines can only be used to separate the sub-titles within the table from each other. Table/Figure number has to be at the top left-aligned and non-Italic with Times New Romans 10 font. The name of tables/figures has to be written with each word having its first letter uppercase. In addition, tables/figures have to comply with black and white print. If there is anything in the table that requires reference, the references must be given at the bottom of the table with in-text reference format.
- Headings, titles, and sub-titles can be used to ensure an ordered information transfer. All the other titles except for the title of the article have to have a font size of 10. First-level titles need to be uppercase and boldface; the first letters of

**MAUNFBD**  
**Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**  
**Mus Alparslan University Journal of Science**

all the words in the second-level titles need to be uppercase and not boldface; and only the first letters of the words in the third-level titles need to be uppercase, and these titles have to be italic. In addition, the titles have to be organized with 6 nk before and after the title.

**FIRST-LEVEL TITLE**

Second-Level Title

*Third-level Title*

(i) The reference should be marked with "number in square brackets" in the article. Each reference must be given in its original language. The references should be written in Times New Roman 9 point. When writing the references, the sequence should be as follows:

- Chen Y. R., Chao K., Kim M. S. Machine vision technology for agricultural applications, Computers and Electronics in Agriculture, 36, 173-191, 2002.
  - Kumar A. Computer vision based fabric defect detection: a survey, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 55, 348-363, 2008.
  - Yetis H., Baygin M., Karaköse M. A New Micro Genetic Algorithm Based Image Stitching Approach for Camera Arrays at Production Lines, The 5th International Conference on Manufacturing Engineering and Process (ICMEP 2016), 25-27 May, 2016.
  - Aydin I., Karakose E., Karaköse M., Gençoğlu M.T., Akin E., A New Computer Vision Approach for Active Pantograph Control, IEEE International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (IEEE INISTA 2013), Albena, Bulgaria, 2013.
  - Lim S. H. Video-processing applications of high speed cmos image sensors, The Degree of Doctor of Philosophy, Stanford University, 2003.
- The manuscripts that comply with the publication principles of anemon are passed through plagiarism checking. The journal uses the Ithenticate software to detect instances of overlapping and similar text in submitted manuscripts. If the similarity level is above %20, the manuscript is not accepted for publication.
  - The articles are sent through Online Application System for the first step of the publication. An automatically-sent confirmation message is sent to your e-mail address upon the completion of the application. For further information, please contact the editor via <http://dergipark.gov.tr/MAUNfbd>.

**MAUNFBD**  
**Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**  
**Mus Alparslan University Journal of Science**

## Değerlendirme Süreci

- **MAUNFBD'**e gönderilen yazılar, önce Yayın Kurulunca dergi ilkelerine uygunluk açısından bir ön değerlendirmeye tabi tutulur. Dergi kapsamına girmeyen veya bilimsel bir yazı formatına içerik ve şekil şartları açısından uymayan yazılar, hakemlik süreci başlatılmadan geri çevrilir ya da bazı değişiklikler istenebilir. Yayın için teslim edilen makalelerin değerlendirilmesinde akademik tarafsızlık ve bilimsel kalite en önemli ölçütlerdir.
- **MAUNFBD'**e yayın kurallarına uygun olarak gönderilen makaleler, daha sonraki aşamada intihal denetiminden geçirilir. Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi'nde intihal denetimi, Ithenticate paket programı aracılığıyla gerçekleştirilmekte ve intihal denetiminde, benzerlik oranının %20'nin üstüne çıkmaması gerekmektedir. İlgili çalışmada herhangi bir intihale rastlanmadığı takdirde değerlendirilmek üzere o alandaki çalışmaları tanınmış iki hakeme gönderilir. **MAUNFBD** Dergisi, sürecin her aşamasında, hakem ve yazarların isimlerinin saklı tutulduğu çift-kör hakemlik sistemini kullanmaktadır. Hakem raporlar beş yıl süreyle saklanır. Makaleyi değerlendiren iki hakemden birisinin olumlu diğerinin olumsuz rapor vermesi durumunda makale üçüncü hakeme gönderilmekte veya Yayın Kurulu, hakem raporlarını inceleyerek nihai kararı vermektedir.
- **MAUNFBD'**e gönderilen çalışmalarda yazarlar, hakem ve Yayın Kurulunun eleştiri ve önerilerini dikkate alırlar. Katılmadıkları hususlar varsa gerekçeleriyle birlikte itiraz etme hakkına sahiptirler. Dergideki hakemlik sürecinde, akademik unvana sahip kişilerin yayınları için ancak eşit ya da üst derecede akademik unvana sahip kişiler hakem olabilir.
- **MAUNFBD'**e hakem değerlendirme süreci, istenilmeyen nedenlerden dolayı bazen uzun sürebilmektedir. Normal koşullarda editör tarafından ön değerlendirme aşaması bir hafta; hakem değerlendirme süreci de 8 hafta olarak planlanmaktadır. Ancak hakemlerden zamanında dönüş olmaması nedeniyle yeniden hakem atama vb. nedenlerden dolayı hakem değerlendirme süreci uzayabilmektedir.
- **MAUNFBD'**e makale gönderen yazar/yazarlar, Derginin söz konusu hakem değerlendirme koşullarını ve sürecini kabul etmiş sayılırlar.
- **MAUNFBD'**de yayımlanmasına karar verilen (kabul edilen) çalışmaların telif hakkı, Muş Alparslan Üniversitesi'ne devredilmiş sayılır.

**MAUNFBD**  
**Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**  
**Mus Alparslan University Journal of Science**

**Peer Review Process**

- The papers that are sent to **MAUNFBD** are subjected to preliminary assessment by the Editorial Board to see whether the work complies with the principles of the journal. The papers that are out of the scope of the journal or do not comply with the format of a scientific text either in terms of content or style are either rejected or demanded to be corrected prior to peer-review process. Academic objectivity and scientific quality are the most important criteria for the assessment of the articles that are submitted to be published.
- The articles that comply with the publication principles of **MAUNFBD** are passed through plagiarism checking. Journal of Social Sciences of Muş Alparslan University uses the iThenticate software to detect instances of overlapping and similar text in submitted manuscripts. The journal allows an overall similarity of 20% for a manuscript to be considered for publication. After determining an acceptable similarity rate, the article is sent to two reviewers who are known for their studies in the relevant field. **MAUNFBD** employs double-blind review system in which the names of neither the reviewers nor the authors are disclosed in any of the phases of the process. Reviewer reports are saved for five years. If one of the reviewers gives positive feedback while the other gives negative feedback, the article is either sent to a third reviewer or Editorial Board examines the reviewer reports to make the final decision.
- The authors submitting papers to **MAUNFBD** take into account the criticisms and suggestions of the reviewers and the Editorial Board. The authors also have the right to object to the points with which they disagree. In the reviewing process, the publications of people with academic titles are only reviewed by academics of either an equal or a higher degree.
- Assessment process of **MAUNFBD** may sometimes take long periods of time due to undesired reasons. Normally, preliminary assessment by the editor takes a week while reviewer's assessment period takes 8 weeks. However, reviewer assessment process may get longer when reviewers do not respond on time or in cases of appointing a new reviewer and so on.
- The author/authors submitting papers to **MAUNFBD** is/are considered to have accepted the aforementioned reviewing conditions and process of the journal.
- The copyrights of the works that are decided to be published (accepted) in **MAUNFBD** is transferred to Muş Alparslan University.

**MAUNFBD**  
**Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**  
**Mus Alparslan University Journal of Science**

**Yayın İlkeleri**

- **MAUNFBD**, ulusal ve uluslararası düzeyde yapılan, fen, temel alanlar ve mühendislik bilimleri alanında özgün ve nitelikli çalışmaları, bilimsel bir yaklaşımla ele alarak fen bilimler alanlarındaki çalışmaların niteliğinin yükselmesine, yöntem ve uygulamaların gelişmesine, kuram ve uygulama alanlarındaki çalışmalar arasında iletişimin güçlenmesine ve fen bilimleri alanındaki literatürün zenginleşmesine katkı sağlamak amacıyla yayımlanmaktadır.
- **MAUNFBD**'e, matematik, fizik, kimya, biyoloji, çevre bilimi, sağlık, eczacılık, mühendislik bilimleri vb. tüm fen bilimlerine ait özgün ve nitelikli bilimsel çalışmaları destekleyerek bilim camiasında üretilen bilgileri akademisyenlerin ve kamuoyunun istifadesine sunmak amacıyla yeni ve özgün çalışmalara yer verilmektedir.
- **MAUNFBD**'e gönderilecek çalışma, alanında bir boşluğu dolduracak özgün bir yazı olmalı ya da daha önce yayımlanmış çalışmaları değerlendiren, konuya dair yeni ve dikkate değer görüşler ortaya koyan inceleme olmalıdır.
- **MAUNFBD**'e gönderilecek yazılar makale, çeviri ve kitap tanıtımı türünde olmalıdır. Dergimize gönderilen çeviri yazılar için, makale sahibinin yayın izni ve orijinal metin gereklidir.
- **MAUNFBD**'e yayın dili Türkçe ve İngilizce'dir.
- **MAUNFBD**'e gönderilen çalışmalar daha önce hiçbir yerde yayımlanmamış ve halihazırda yayımlanmak üzere sunulmamış olmalıdır. Bilimsel bir toplantıda sunulmuş bildiriler, durum açıkça belirtilmek şartıyla dergiye gönderilebilir.
- **MAUNFBD**'e Kış/Aralık ve Yaz/Haziran sayısı olmak üzere yılda iki defa düzenli olarak yayımlanmaktadır.
- **MAUNFBD**'e gönderilen yazılara telif hakkı ödenmez. Yayımlanan makalelerin telif hakkı Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimler Dergisi'ne aittir.
- **MAUNFBD**'de yayımlanan yazıların bilimsel ve hukuki sorumluluğu yazarlarına aittir.
- **MAUNFBD**'de yer alan yazılardaki görüş ve düşünceler yazarlarının kişisel görüşleri olup derginin ve bağlı olduğu kurumların görüşlerini yansıtmaz.
- **MAUNFBD**'e gönderilen çalışmalar, TÜBİTAK ULAKBİM'in DergiPark Sistemi (UDS) üzerinden elektronik ortamda gönderilmektedir. Bu sisteme <http://dergipark.gov.tr/MAUNfbd> da yer alan "Kullanıcı Sayfası/Yeni Gönderi" linkinden ulaşılabilir. Söz konusu sisteme kayıt yapıp makale gönderildikten sonra hakem süreciyle ilgili gelişmeler ve hakem değerlendirme raporları yazarlar tarafından kolaylıkla takip edilebilir.

**MAUNFBD**  
**Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**  
**Mus Alparslan University Journal of Science**

**Editorial Principles**

- **MAUNFBD** is a national and international peer-reviewed journal that publishes authentic and qualified works with a scientific approach in the fields of science, basic and engineering sciences. It is published to contribute to raising the quality of the social sciences studies, development of methods and practices, to strengthen the communication between theoretical and practical studies, and to enrich the science literature.
- **MAUNFBD** supports all the authentic and qualified scientific studies in the science fields including maths, physic, chemistry, biology, health, pharmacy, engineering sciences *etc*. It publishes new and authentic works to offer the knowledge produced by scientific circles for the benefit of academics and public.
- The works that are sent to **MAUNFBD** must be both an authentic work to eliminate a lack in the literature or a review assessing the previously-published works and suggesting relevant, new, and noteworthy opinions.
- The texts that are sent to **MAUNFBD** include articles, translations, and book promotions. For the translated texts, publication permission of the owner of the article and the source text are required.
- Publication languages of **MAUNFBD** are Turkish and English.
- The works that are sent to **MAUNFBD** must not be published previously anywhere. They have to be ready for publication. The papers that have previously been presented in a scientific meeting can be sent to the journal if it is clearly indicated.
- **MAUNFBD** is regularly published in Winter/December and Summer/June per year.
- No copyright payment is made for the papers that are sent to **MAUNFBD**. The copyrights of the works that are published in **MAUNFBD** are transferred to Mus Alparslan University Journal of Science.
- Scientific and legal liabilities of the articles published in **MAUNFBD** belong to the authors.
- All the opinions and ideas indicated in the articles that are published in **MAUNFBD** are authors' personal opinions and do not reflect the opinions of the Journal or the affiliated institutions by any means.
- The works that are sent to **MAUNFBD** are sent to TUBITAK ULAKBIM's DergiPark System (UDS) in electronical environment. This system can be accessed via <http://dergipark.gov.tr/MAUNfbd> under the link "User Page/New Submission". After registering in the system and submitting the paper, the developments regarding the reviewing process and reviewer reports can be followed by the authors.

**MAUNFBD**  
**Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi**  
**Mus Alparslan University Journal of Science**

**Yazışma Adresi / Address**

Muş Alparslan Üniversitesi  
MAUNFBD Dergi Editörlüğü

Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
49250 – MUŞ/TÜRKİYE

Tel: 0 436 249 49 49 / 3671 - Fax: 0 436 213 00 28

Web: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/msufbd>

e-mail: [msufbd@alparslan.edu.tr](mailto:msufbd@alparslan.edu.tr)