



Muş Alparslan Üniversitesi

MUŞ ALPARSLAN ÜNİVERSİTESİ / MUŞ ALPARSLAN UNIVERSITY

www.alparslan.edu.tr

e-ISSN: 2149-6455

Haziran/June 2025

Cilt/Volume 13

Sayı/Issue 01

FEN BİLİMLERİ DERGİSİ THE JOURNAL of SCIENCE





MAUNFBD

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

YIL/YEAR: 2025 • CİLT/VOLUME: 13 • SAYI/NUMBER: 1

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	: 30/06/2025
Cilt	: 13
Sayı	: 1
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	: https://dergipark.org.tr/tr/pub/msufbd

MAUNFBD

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

Yıl/Year: 2025 • Cilt/Volume: 13 • Sayı/Number: 1

Yayın Kurulu • Editorial Board

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

Muş Alparslan Üniversitesi / Türkiye
Prof. Dr. Ekrem ALMAZ
Muş Alparslan Üniversitesi / Türkiye
Prof. Dr. Talat KÖRPINAR
Muş Alparslan Üniversitesi / Türkiye
Prof. Dr. Muhammed ÇINAR
Muş Alparslan Üniversitesi / Türkiye
Doç. Dr. Furkan ORHAN
Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi/ Türkiye
Doç. Dr. Selçuk SAĞIR
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: 2025 • Cilt: 13 • Sayı: 1

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 yayınlanan 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 gelişimlerine 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**
- **EBSCO**
- 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: 2025 • Cilt/Volume: 13 • Sayı/Number: 1

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. Mus Alparslan University Journal of Science is included in the following abstracting and indexing services:

- **TR Dizin**
- **EBSCO**
- 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: 2025 • Cilt/Volume: 13 • Sayı/Number: 1

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 gerçekleştirmelidir.

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 yönergelerle 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 adresine e-posta yoluyla bildiriniz.

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

Yıl/Year: 2025 • Cilt/Volume: 13 • Sayı/Number: 1

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
Çiğdem Bektaş, Tuba Dinç (Δ_v^m) _u -Statistical Boundedness and Convergence of Order α (Δ_v^m) _u -Statistical Boundedness and Convergence of Order α	1-6
Filiz Özgen, Ayşe Dayan, Uğurcan Yardımcı, Celal Kıstak, Nevin Çelik Energy And Exergy Analysis Of An Absorber Plate With Stainless Steel Scourers <i>Paslanmaz Çelik Telli Bir Yutucu Plakanın Enerji ve Ekserji Analizi</i>	7-14
Yasin Özkan, Sibel Barin Özkan Effect of Hybrid Activation and Loss Functions for Pneumonia Classification in Chest X-ray Images <i>Chest X-Ray Görüntülerinde Pnömoni Sınıflandırması İçin Hibrit Aktivasyon ve Kayıp Fonksiyonlarının Etkisi</i>	15-25
Bilal Şenol, Uğur Demiroğlu Integrating Pretrained Deep Neural Networks with Traditional Classification Techniques for Enhanced Oral Cancer Diagnosis <i>Gelişmiş Ağız Kanseri Tanısı İçin Önceden Eğitilmiş Derin Sinir Ağlarının Geleneksel Sınıflandırma Teknikleriyle Entegre Edilmesi</i>	26-36
Selvi Altun Durmuş Optical soliton solutions of the higher-order nonlinear Schrödinger equation with Kerr law nonlinearity of self-phase modulation <i>Öz faz modülasyonunun Kerr Yasası formuna sahip yüksek mertebeden doğrusal olmayan Schrödinger denkleminin optik soliton çözümleri</i>	37-45
Şeyda Karcı, Fatih Okumuş Analytical Validation of the Malatya Dominating Set Algorithm: Constructing Optimal Dominating Sets Without Redundant Nodes <i>Malatya Hakim Küme Algoritmasının Analitik Doğrulaması: Artık Düğüm Olmadan Optimal Hakim Kümelerin Oluşturulması</i>	46-56
Selma Ekinci, Erhan Onat, Ramazan Astan Cu(II) Adsorption from Aqueous Solution Using K ₂ CO ₃ -Activated Carbon Derived from Chenopodium botrys: A Sustainable Approach <i>Chenopodium botrys'ten Türetilen K₂CO₃-Aktif Karbon Kullanılarak Sulu Çözeltilerden Cu(II) Adsorpsiyonu: Sürdürülebilir Bir Yaklaşım</i>	57-63
Kemal Alp Nalcı, Leyla Güven, Ravza Manto, Nefise Şentürk, Gökhan Dervişoğlu, Fethi Ahmet Özdemir, Umut Furkan Bayram, Muhammed Enes Yılmaz, Seda Nur Yöndeş, Adnan Çetin Investigation of Antiproliferative Effects of Heracleum persicum Extracts on Glioblastoma Multiforme Cell Line <i>Heracleum persicum Ekstraktlarının Glioblastoma Multiforme Hücre Hattı Üzerindeki Antiproliferatif Etkilerinin Araştırılması</i>	64-69
Tuğçe Bilen Integrating Queuing Theory and GBM for Dynamic Resource Allocation in 6G Networks <i>6G Ağlarında Dinamik Kaynak Tahsisi için Kuyruk Teorisi ve GBM'nin Entegrasyonu</i>	70-80
Taner Uçkan, Abdulsamet Aydın A Novel Approach for Graph-based Extractive Text Summarization using Karcı Dominant Set Algorithm and Eigenvector Centrality <i>Karcı Baskın Küme Algoritması ve Özvektör Merkeziliği Kullanarak Çizge Tabanlı Çıkarımsal Metin Özetleme için Yeni Bir Yaklaşım</i>	81-94
Ismail Mohamed Youssouf, Taha Etem Statistical and Machine Learning Approaches for Energy Consumption Forecasting Using Time Series Analysis <i>Zaman Serisi Analizi ile Enerji Tüketim Tahmininde İstatistiksel ve Makine Öğrenimi Yaklaşımları</i>	95-103

Nurşen Aksu Kalmuk Protective Effects of Aqueous Propolis Extract from the Artvin-Hatila Region of Türkiye Against Zinc Oxide-Induced Genotoxicity: Antimutagenic, Antioxidant, and Phytochemical Evaluation <i>Türkiye'nin Artvin-Hatila Bölgesinden Elde Edilen Propolisin Sulu Ekstraktının Çinko Oksit Kaynaklı Genotoksisteye Karşı Koruyucu Etkileri: Antimutajenik, Antioksidan ve Fitokimyasal Değerlendirme</i>	104-114
Abidin Gümrükçüoğlu <i>Glaucium Flavum Bitkisinin Toprak Üstü Kısımlarında Bulunan Fenolik Bileşiklerin, Uçucu Bileşenlerin ve Antioksidan Kapasitenin Analizi</i> <i>Identification Of Phenolic And Volatile Compounds In Aerial Parts Of Glaucium Flavum Crantz. And Determination Of Their Antioxidant Activity</i>	115-127
Burkay Maraş, Serhat Karatorak, Kevser Özdem Karaca, A. Orkun Gedik, M. Ali Akcayol MR Altyazılama için Çoklu Dikkat Tabanlı Derin Öğrenme Modeli <i>Multiple Attention-Based Deep Learning Model for MRI Captioning</i>	128-137
Şeyhmus Tümmür Biyogaz Üretim Süreçlerinde Enerji Verimliliği ve Çevresel Sürdürülebilirliğin Artırılması: Bir Vaka Çalışması <i>Improving Energy Efficiency and Environmental Sustainability in Biogas Production Processes: A Case Study</i>	138-149
Hikmet Tutar Düzlemsel Çelik Çerçeveselerin Performansa Dayalı Optimum Sismik Tasarımının Çok Sınıflı Algoritması MC-TLBO Kullanılarak Karşılaştırmalarının Yapılması <i>Comparative Analysis of Performance-Based Optimal Seismic Design of Planar Steel Frames Using the Multi-Class MC-TLBO Algorithm</i>	150-164
Hasan Polat, Adnan Taygar Polimer Kompozitlerde Siderit Mineralinin Takviye Malzemesi Olarak Kullanımının Fiziksel, Mekanik ve Kalıcılık Özelliklerine Etkisi <i>Effect of Using Siderite Mineral as a Reinforcement Material on the Physical, Mechanical, and Durability Properties of Polymer Composites</i>	165-173
Tuncay Köroğlu Bazı Kongrüans Alt Grupların Normalizasyonlarının Ürettiği Devreler ve Yollar <i>Circuits and Paths Generated by the Normalizers of Some Congruance Subgroups</i>	174-178
Ersan Bektaş , Hüseyin Şahin , Halil İbrahim Güler , Kadriye İnan , Kaan Kaltalıoğlu , Nilhan Elif Uzun Integrated Analysis of the In Vitro Response of <i>Melissa officinalis</i> subsp. <i>officinalis</i> to Copper Oxide Nanoparticles <i>In Vitro Koşullarda Yetiştirilen Melissa officinalis subsp. officinalis L.'nin Bakır Oksit Nanopartiküllerine Karşı Morfolojik, Biyokimyasal ve Moleküler Yanıtlarının Kapsamlı Değerlendirmesi</i>	179-191
DERLEME MAKALE / REVIEW ARTICLE	
Selinay Tayşi , Bülent Çetin Deneysel Beslenme Çalışmaları için Model Organizma: <i>Drosophila melanogaster</i> <i>The Place and Importance of Drosophila melanogaster in Nutrition and Disease Modeling</i>	192-204

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

$(\Delta_v^m)_u$ -Statistical Boundedness and Convergence of Order α

Çiğdem A. BEKTAŞ¹, Tuba DİNÇ²

¹ Department of Mathematics, Firat University, Elazığ, Türkiye

² Graduate School of Natural and Applied Sciences, Firat University, Elazığ, Türkiye

✉: karahan.tuba@gmail.com ¹<https://orcid.org/0000-0003-0397-3193> ²<https://orcid.org/0000-0002-7450-6456>

Received (Geliş): 25.09.2025

Revision (Düzeltilme): 18.03.2025

Accepted (Kabul): 23.04.2025

ABSTRACT

In this paper, we defined the concepts of $(\Delta_v^m)_u$ -statistical convergence and $(\Delta_v^m)_u$ -statistical boundedness for sequences u and v with nonzero terms. Then, we extend these concepts to the concepts of $(\Delta_{\lambda,v}^m)_u$ -statistical convergence and $(\Delta_{\lambda,v}^m)_u$ -statistical boundedness using the sequences (λ_n) satisfying the conditions $\lambda_1 = 1$, $\lambda_{n+1} \leq \lambda_n + 1$ and $\lambda_n \rightarrow \infty$ ($n \rightarrow \infty$). Then, using the concepts of $(\Delta_{\lambda,v}^m)_u$ -statistical convergence and $(\Delta_{\lambda,v}^m)_u$ -statistical boundedness, we defined the sequence spaces $(\Delta_{\lambda,v}^m)_u(S_c^\alpha)$ and $(\Delta_{\lambda,v}^m)_u(S_b^\alpha)$ with the help of numbers α satisfying the condition $0 < \alpha \leq 1$. We also investigated the inclusion relations between these sequence spaces and between the sequence spaces obtained in some special cases.

Keywords: Difference Sequences, Statistical Boundedness, Statistical Convergence

α . Mertebeden $(\Delta_v^m)_u$ -İstatistiksel Sınırlılık ve Yakınsaklık

ÖZ

Bu makalede, terimleri sıfırdan farklı u ve v sayı dizileri için $(\Delta_v^m)_u$ -istatistiksel yakınsaklık ve $(\Delta_v^m)_u$ -istatistiksel sınırlılık kavramlarını tanımladık. Daha sonra bu kavramları $\lambda_1 = 1$, $\lambda_{n+1} \leq \lambda_n + 1$ ve $\lambda_n \rightarrow \infty$ ($n \rightarrow \infty$) şartını sağlayan (λ_n) dizilerini kullanarak $(\Delta_{\lambda,v}^m)_u$ -istatistiksel yakınsaklık ve $(\Delta_{\lambda,v}^m)_u$ -istatistiksel sınırlılık kavramlarına genişlettik. Daha sonra $(\Delta_{\lambda,v}^m)_u$ -istatistiksel yakınsaklık ve $(\Delta_{\lambda,v}^m)_u$ -istatistiksel sınırlılık kavramlarını kullanarak $0 < \alpha \leq 1$ şartını sağlayan α sayıları yardımıyla $(\Delta_{\lambda,v}^m)_u(S_c^\alpha)$ ve $(\Delta_{\lambda,v}^m)_u(S_b^\alpha)$ dizi uzaylarını tanımladık. Ayrıca bu dizi uzayları arasındaki ve bazı özel durumlarında elde edilen dizi uzayları arasındaki kapsama bağıntılarını inceledik.

Anahtar Kelimeler: Fark Dizileri, İstatistiksel Sınırlılık, İstatistiksel Yakınsaklık

INTRODUCTION

Statistical convergence was studied independently by Fast and Steinhaus in 1951 [1,2]. Then, in 1953, Buck introduced the concept of statistical convergence for real and complex number sequences and its relationship with the theory of summability [3]. The same subject was introduced by Schoenberg as a method of summability [4].

The natural density of a set K is defined by $\delta(K) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} |\{k \leq n: k \in K\}|$, where $|\{k \leq n: k \in K\}|$, denotes the number of elements of the set K not greater than n .

A sequence $x = (x_k)$ if satisfies that: $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} |\{k \leq n: |x_k - l| \geq \varepsilon\}| = 0$, for all $\varepsilon > 0$ and some l , we say x is statistically convergent to l and denote it by $S - \lim x_k = l$ or $x_k \rightarrow l(S)$. The space

of all statistically convergent sequences is denoted by Sc . If $l = 0$ then x is called statistically null sequence and the space of all statistically null sequences is denoted by Sc_0 . The space of statistically convergent sequences is a sequence algebra so; if $x = (x_k), y = (y_k) \in Sc$ then $xy = (x_k y_k) \in Sc$. If $S - \lim x_k = l_x$ and $S - \lim y_k = l_y$, then $S - \lim x_k y_k = l_x l_y$. It is known that classical convergence implies statistical convergence, namely $c \subset Sc$.

In 2000, Mursaleen introduced the concept of λ -statistical converge, which is a more general form of statistical convergence, using the concept of $\lambda = (\lambda_n)$ sequence [5]. Such that if $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\lambda_n} |\{k \in I_n: |x_k - l| \geq \varepsilon\}| = 0$ is satisfied for all $\varepsilon > 0$ and some l , then the sequence x is said to be λ -statistically convergent or S_λ -convergent to l , and the space of all λ -statistically convergent sequences is

denoted by S_λ . It can easily be seen that the λ -statistical convergence is same as the statistical convergence for $\lambda_n = n$, where all sequence $\lambda = (\lambda_n) \in \Gamma$ satisfies $\lambda_1 = 1$ and $\lambda_{n+1} \leq \lambda_n + 1$ conditions and diverges to infinity, and $I_n = [n - \lambda_n + 1, n]$. In this study, we will take the same.

Then Gadjiev and Orhan [6] first introduced the idea of order α of statistical convergence. This concept has attracted more attention after Çolak's works [7, 8]. After these Çolak and Bektaş [9] combined the concepts λ -statistical convergence and statistical convergence of order α together and defined λ -statistical convergence of order α , a more general form of both ideas, as follows: $x = (x_k)$ is λ -statistically convergent to l of order α if satisfies that: $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{(\lambda_n)^\alpha} |\{k \in I_n: |x_k - l| \geq \varepsilon\}| = 0$, for $\lambda = (\lambda_n) \in \Gamma$ and all $\varepsilon > 0$, where $0 < \alpha \leq 1$.

The difference sequence concept defined by Kızılmaz [10], was generalized to difference of order m by Et and Çolak [11]. Upon this Et and Nuray [12] generalized the statistical convergence concept to Δ^m -statistical convergence. According to this. $(\Delta^m x_k) = (\Delta^{m-1} x_k - \Delta^{m-1} x_{k+1})$ so $\Delta^0 x = x$ and $\Delta x = (\Delta x_k) = (x_k - x_{k+1})$ for the sequence $x = (x_k)$ and $\Delta^m(X) = \{x = (x_k): \Delta^m x \in X\}$, for any sequence space X . Here, $m \in \mathbb{N}$ is a finite number and we will use m as a finite natural number in this paper.

Çolak [13] defined generalized sequence space $\Delta_v(X)$ for any sequence spaces X and $v = (v_k)$ sequences consisting of nonzero complex numbers as follows.

$$\Delta_v(X) = \{x = (x_k): \Delta_v(x) \in X\}$$

and examined the topological properties of these spaces, where $\Delta_v(x) = (\Delta_v(x_k)) = (v_k x_k - v_{k+1} x_{k+1})$. Then these sequence spaces was generalized to Δ_v^m by Et and Esi [14]. According to this,

$$\Delta_v^m(X) = \{x = (x_k): \Delta_v^m(x) \in X\},$$

for $X = l_\infty, c, c_0$, where $\Delta_v^0(x) = (v_k x_k)$, $\Delta_v^m(x) = (\Delta_v^{m-1} x_k - \Delta_v^{m-1} x_{k+1})$ and such that

$$\Delta_v^m(x_k) = \sum_{i=0}^m (-1)^i \binom{m}{i} v_{k+i} x_{k+i}.$$

Statistical boundedness is a much newer and less studied compared to statistical convergence. A real or complex statistically bounded sequence $x = (x_k)$ defined by Fridy and Orhan [15] for some $B \geq 0$ satisfies that; $\delta(\{k: |x_k| > B\}) = 0$. Space of all statistically bounded sequences is denoted by S_b . Then Bhardwaj and Gupta [16] generalized the concept of statistical boundedness as follows. If a sequence $x = (x_k)$ is statistically bounded of order α , then there is some $B \geq 0$ such that

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n^\alpha} |\{k \leq n: |x_k| > B\}| = 0.$$

The space of all statistically bounded of order α sequences is denoted by S_b^α . Note that $S_b^\alpha = S_b$ for

$\alpha = 1$ and $S_b^\alpha = w$ for $\alpha > 1$. So, throughout this article we will take α less than or equal to 1.

Later Temizsu and Et [17] defined statistical convergence in terms of Δ^m -difference sequences and $\lambda = (\lambda_n) \in \Gamma$ sequences as follows and gave some inclusion theorems related to these concepts. If a sequence $x = (x_k)$ is Δ^m -statistically bounded of order α , then there is some $B \geq 0$ such that $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n^\alpha} |\{k \leq n: |\Delta^m x_k| > B\}| = 0$. The space of all such sequences $x = (x_k)$ is denoted by $\Delta^m(S_b^\alpha)$ and it is obvious that $x \in w$ for $\alpha > 1$. A sequence $x = (x_k)$ is Δ_λ^m -statistically bounded of order α if there is some $B \geq 0$ such that

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\lambda_n^\alpha} |\{k \in I_n: |\Delta^m x_k| > B\}| = 0 \text{ for } \lambda = (\lambda_n) \in \Gamma. \text{ The space of all } \Delta_\lambda^m\text{-statistically bounded sequences of order } \alpha \text{ is denoted by } \Delta_\lambda^m(S_b^\alpha). \text{ For } \alpha=1, \text{ it turns into } \Delta_\lambda^m\text{-statistically bounded and the space of such these sequences is } \Delta_\lambda^m(S_b) [17].$$

MAIN RESULTS

In this section we will define $(\Delta_v^m)_u$ -statistically bounded and $(\Delta_v^m)_u$ -statistically convergent of order α and examine some inclusion relations.

Definition 1. Let $X = l_\infty, c, c_0$ and $u = (u_k), v = (v_k)$ any fixed nonzero complex numbers' sequences. We define:

$$(\Delta_v^m)_u(X) = \{x = (x_k): (\Delta_v^m)_u(x) \in X\},$$

where $(\Delta_v^m)_u(x) = (u_k \Delta_v^m x_k)$.

Throughout this paper we consider the sequences $u = (u_k), v = (v_k)$ as sequences of nonzero complex numbers.

Definition 2. If there exists some $B \geq 0$ such that $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n^\alpha} |\{k \leq n: |u_k \Delta_v^m x_k| > B\}| = 0$, then the sequence $x = (x_k)$ is $(\Delta_v^m)_u$ -statistically bounded of order α and we denote the space of such sequences with $(\Delta_v^m)_u(S_b^\alpha)$.

It can easily be seen that if we take $\alpha > 1$ then the $(\Delta_v^m)_u u(S_b^\alpha)$ turns into w . If we take $\alpha = 1$, then the $x = (x_k)$ become $(\Delta_v^m)_u$ -statistically bounded and we will denote this sequences' space by $(\Delta_v^m)_u(S_b)$.

Theorem 1. Let $\alpha, \beta \in (0,1]$ such that $\alpha < \beta$. Then $(\Delta_v^m)_u(S_b^\alpha) \subset (\Delta_v^m)_u(S_b^\beta)$ and this inclusion is strict.

Proof: Let $x \in (\Delta_v^m)_u(S_b^\alpha)$. Therefore, we know $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n^\alpha} |\{k \leq n: |u_k \Delta_v^m x_k| > B\}| = 0$. Since $\alpha < \beta$ implies $n^\alpha < n^\beta$ and thus $\frac{1}{n^\alpha} > \frac{1}{n^\beta}$,

$$\frac{1}{n^\alpha} |\{k \leq n: |u_k \Delta_v^m x_k| > B\}| > \frac{1}{n^\beta} |\{k \leq n: |u_k \Delta_v^m x_k| > B\}|.$$

We take the limit of both sides of the above inequality as $n \rightarrow \infty$ and find that $x \in (\Delta_v^m)_u(S_b^\beta)$. To prove the strictness of the inclusion we can choose as $x = (x_k) = (-k)$ and $v = (v_k) = (k - 1)$. At that rate for $m = 1$, $\Delta_v^m x = \Delta_v x = (\Delta_v x_k) = (x_k v_k - x_{k+1} v_{k+1}) = (2k)$ is found. If we define u by

$$u_k = \begin{cases} \frac{1}{2k}, & k \neq n^3 \\ \frac{1}{2}, & k = n^3 \end{cases} \quad (n = 0, 1, 2, 3, \dots),$$

then we write

$$u_k \Delta_v x_k = \begin{cases} 1, & k \neq n^3 \\ k, & k = n^3 \end{cases} \quad (n = 0, 1, 2, 3, \dots).$$

For $B = 1$, we can easily see

$$|\{k \leq n: |u_k \Delta_v x_k| > 1\}| = \llbracket \sqrt[3]{n} \rrbracket - 1 \leq \sqrt[3]{n} - 1 < \sqrt[3]{n}.$$

Where $\llbracket \cdot \rrbracket$ denotes greatest integer function. Therefore, we have:

$$\frac{1}{n^\beta} |\{k \leq n: |u_k \Delta_v x_k| > 1\}| < \frac{\sqrt[3]{n}}{n^\beta}.$$

Let $0 < \alpha < \frac{1}{3} < \beta \leq 1$. By taking the limit as $n \rightarrow \infty$, we obtain $x \in (\Delta_v^m)_u(S_b^\beta)$. From the property greatest integer function, we know $\sqrt[3]{n} - 1 < \llbracket \sqrt[3]{n} \rrbracket \leq \sqrt[3]{n}$ which implies:

$$\frac{\sqrt[3]{n} - 2}{n^\alpha} < \frac{1}{n^\alpha} |\{k \leq n: |u_k \Delta_v^m x_k| > 1\}|.$$

By taking the limit, we obtain $x \notin (\Delta_v^m)_u(S_b^\alpha)$.

From Theorem 1 by setting $\beta = 1$, we obtain $(\Delta_v^m)_u(S_b^\alpha) \subset (\Delta_v^m)_u(S_b)$. Note that this inclusion is strict for $\alpha \in (0, 1)$.

Proposition 1. $(\Delta_v^m)_u(l_\infty) \subset (\Delta_v^m)_u(S_b^\alpha)$, and this inclusion is strict.

Proof: If $x \in (\Delta_v^m)_u(l_\infty)$, then there exists some $B \geq 0$ such that $|(\Delta_v^m)_u x_k| = |u_k \Delta_v^m x_k| \leq B$ for all $k \in \mathbb{N}$. Thus $\{k \leq n: |u_k \Delta_v^m x_k| > B\} = \emptyset$ and hence

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n^\alpha} |\{k \leq n: |u_k \Delta_v^m x_k| > B\}| = 0.$$

This implies that $x \in (\Delta_v^m)_u(S_b^\alpha)$. To show that the converse inclusion does not always hold, we can take $u_k = v_k = 1$ for all $k \in \mathbb{N}$ and sequence x like this,

$$x = (x_k) = \begin{cases} k^3, & k \text{ is prime number,} \\ k, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

For $m = 2$, we have:

$$\Delta_v^2 x = \begin{cases} 6k + 6, & k \text{ is prime number,} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

Since the density of prime numbers is zero, we conclude that $(\Delta_v^2)_u x$ is statistically bounded. However, it is clear that this sequence is not bounded.

Corollary 1. $(\Delta_v^m)_u(l_\infty) \subset (\Delta_v^m)_u(S_b)$ and this inclusion is strict.

Theorem 2.

(i) If $u = (u_k) \in S_b$, then $\Delta_v^m(S_b) \subset (\Delta_v^m)_u(S_b)$,

(ii) If $v = (v_k) \in S_b$, then $(\Delta^m)_u(S_b) \subset (\Delta_v^m)_u(S_b)$ and these inclusions are strict.

Proof: (i) Let $u \in S_b$ and $x \in \Delta_v^m(S_b)$. Then there exists numbers $B_u, B_x \geq 0$ such that $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} |\{k \leq n: |u_k| > B_u\}| = 0$ and $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} |\{k \leq n: |\Delta_v^m x_k| > B_x\}| = 0$

Let $B_u \cdot B_x = B$. Thus, we have:

$$\begin{aligned} \{k \leq n: |u_k \Delta_v^m x_k| > B\} &\subseteq \{k \leq n: |\Delta_v^m x_k| > B_x\} \\ &\cup \{k \leq n: |u_k| > B_u\} \end{aligned}$$

and therefore,

$$\begin{aligned} \frac{1}{n} |\{k \leq n: |u_k \Delta_v^m x_k| > B\}| &\leq \frac{1}{n} |\{k \leq n: |\Delta_v^m x_k| > B_x\}| \\ &+ \frac{1}{n} |\{k \leq n: |u_k| > B_u\}| \end{aligned}$$

is obtained. Taking the limit as $n \rightarrow \infty$ on both sides of the above inequality, $x \in (\Delta_v^m)_u(S_b)$ is obtained.

(ii) The proof is similar to that of (i).

Corollary 2. If $u, v \in S_b$ then following inclusions are strict.

$$(i) \Delta^m(S_b) \subset (\Delta_v^m)_u(S_b),$$

$$(ii) \Delta^m(l_\infty) \subset (\Delta_v^m)_u(S_b).$$

Theorem 3. (i) If $|u_k| \leq |u'_k|$ for all $k \in \mathbb{N}$, then $(\Delta_v^m)_{u'}(S_b) \subseteq (\Delta_v^m)_u(S_b)$,

(ii) If $|v_k| \leq |v'_k|$ for all $k \in \mathbb{N}$, then $(\Delta_{v'}^m)_u(S_b) \subseteq (\Delta_v^m)_u(S_b)$.

Proof: (i) Let $|u_k| \leq |u'_k|$ for all $k \in \mathbb{N}$ and $x \in (\Delta_v^m)_{u'}(S_b)$. So there exists a number $B \geq 0$ such that:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} |\{k \leq n: |u'_k \Delta_v^m x_k| > B\}| = 0.$$

Since $|u_k| \leq |u'_k|$ for all $k \in \mathbb{N}$, we have the following inclusion

$$\begin{aligned} \{k \leq n: |u_k \Delta_v^m x_k| > B\} &\subseteq \{k \leq n: |u'_k \Delta_v^m x_k| > B\} \end{aligned}$$

and thus

$$\begin{aligned} |\{k \leq n: |u_k \Delta_v^m x_k| > B\}| &\leq |\{k \leq n: |u'_k \Delta_v^m x_k| > B\}| \end{aligned}$$

and

$$\begin{aligned} \frac{1}{n} |\{k \leq n: |u_k \Delta_v^m x_k| > B\}| &\leq \frac{1}{n} |\{k \leq n: |u'_k \Delta_v^m x_k| > B\}|. \end{aligned}$$

Taking the limit as $n \rightarrow \infty$ on both sides of the inequality, we find that $x \in (\Delta_v^m)_u(S_b)$.

(ii) The proof is similar to that of (i).

Corollary 3. It is obvious from Theorem 3 that:

- (i) If $|u_k| \geq 1$ for all $k \in \mathbb{N}$, then $(\Delta_v^m)_u(S_b) \subseteq \Delta_v^m(S_b)$,
- (ii) If $|v_k| \geq 1$ for all $k \in \mathbb{N}$, then $(\Delta_v^m)_u(S_b) \subseteq (\Delta_v^m)_u(S_b)$,
- (iii) If $|v_k| \leq |v'_k|$ and $|u_k| \leq |u'_k|$ for all $k \in \mathbb{N}$, then $(\Delta_{v'}^m)_{u'}(S_b) \subseteq (\Delta_v^m)_u(S_b)$.

Theorem 4. The inclusion $(\Delta_v^{m+1})_u(S_b) \subset (\Delta_v^m)_u(S_b)$ is strict.

Proof: For the strictness we can use example which we gave in proof of the Proposition 1. Let $u = v = (1)$ and define the sequence x as follows:

$$x = (x_k) = \begin{cases} k^3, & k \text{ is prime number,} \\ k, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

For $m = 1$, $(\Delta_v)_u x$ is statistically bounded, but for $m = 0$, is not statistically bounded.

Corollary 4. For $0 < \alpha \leq \beta \leq 1$, the strict inclusion $(\Delta_v^m)_u(S_b^\alpha) \subset (\Delta_v^{m+1})_u(S_b^\beta)$ follows from Theorem 4 and Theorem 1.

Definition 3. If a sequence $x = (x_k)$ satisfies $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n^\alpha} |\{k \leq n: |u_k \Delta_v^m x_k - l| \geq \varepsilon\}| = 0$, for all $\varepsilon > 0$ and some l , then x is called $(\Delta_v^m)_u$ -statistically convergent of order α . The space of such sequences is denoted by $(\Delta_v^m)_u(Sc^\alpha)$. If in above equation we take $\alpha = 1$, then $x = (x_k)$ is called $(\Delta_v^m)_u$ -statistically convergent and we will denote this sequences' space by $(\Delta_v^m)_u(Sc)$. It is obvious that $(\Delta_v^m)_u(Sc^\alpha)$ turns into w for $\alpha > 1$.

Theorem 5. Let $\alpha, \beta \in (0, 1]$ such that $\alpha < \beta$. Then $(\Delta_v^m)_u(Sc^\alpha) \subset (\Delta_v^m)_u(Sc^\beta)$ and this inclusion is strict for certain α and β .

The proof is trivial.

Corollary 5. From Theorem 5, we obtain $(\Delta_v^m)_u(Sc^\alpha) \subset (\Delta_v^m)_u(Sc)$ and this inclusion is strict when $0 < \alpha < 1$.

Proposition 2. $(\Delta_v^m)_u(Sc^\alpha) \subset (\Delta_v^m)_u(S_b^\alpha)$ and this inclusion is strict.

Proof: Let $x \in (\Delta_v^m)_u(Sc^\alpha)$. In this case, there exists a number l such that

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n^\alpha} |\{k \leq n: |u_k \Delta_v^m x_k - l| \geq \varepsilon\}| = 0 \quad (1)$$

for a fixed $\varepsilon > 0$. Using the properties of the absolute value,

$$\begin{aligned} \{k \leq n: |u_k \Delta_v^m x_k| \geq \varepsilon + |l|\} \\ \subseteq \{k \leq n: |u_k \Delta_v^m x_k - l| \geq \varepsilon\} \end{aligned}$$

and thus

$$\begin{aligned} |\{k \leq n: |u_k \Delta_v^m x_k| \geq \varepsilon + |l|\}| \\ \leq |\{k \leq n: |u_k \Delta_v^m x_k - l| \geq \varepsilon\}| \end{aligned}$$

holds. If we multiply both side of the above inequality by $\frac{1}{n^\alpha}$ and taking the limit for $n \rightarrow \infty$, we obtain from (1), $x \in (\Delta_v^m)_u(S_b^\alpha)$. To show that the converse inclusion does not always hold, let $m = 1$, $u = (u_k) = (\frac{1}{k+1})$, $v = (v_k) = (k+1)$ and define the sequence $x = (x_k)$ as:

$$x_k = \begin{cases} k, & k \text{ is odd number,} \\ -k, & k \text{ is even number.} \end{cases}$$

It is easy to see that for $m = 1$;

$$(\Delta_v)_u x = \begin{cases} -2, & k \text{ is odd number,} \\ 2, & k \text{ is even number.} \end{cases}$$

This sequence is statistically bounded but not statistically convergent.

Proposition 3. $(\Delta_v^m)_u(c) \subset (\Delta_v^m)_u(Sc)$ and this inclusion is strict.

Theorem 6. If $u = (u_k) \in Sc$, then $\Delta_v^m(Sc) \subset (\Delta_v^m)_u(Sc)$ and this inclusion is strict.

Proof: Since (Sc) is a sequence algebra, the proof is obvious. To show the strictness of the inclusion, let $m = 2$, and define $x = (x_k) = (k^2)$, $v = (v_k) = (k)$, and the statistically convergent sequence $u = (u_k)$ as

$$u_k = \begin{cases} (-1)^k, & k \text{ is square,} \\ \frac{1}{k}, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

Then, we have $\Delta_v^2 x = (6k+6)$, and thus

$$(\Delta_v^2)_u x_k = \begin{cases} (-1)^k(6k+6), & k \text{ is square,} \\ 6 + \frac{6}{k}, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

This sequence is statistically convergent, but $\Delta_v^2 x$ is not statistically convergent.

As a common consequence of Proposition 3 and Theorem 6, we can obtain the following result:

Corollary 6. If $u \in Sc$, then $\Delta_v^m(c) \subseteq (\Delta_v^m)_u(Sc)$.

Definition 4. Let $\alpha \in (0, 1]$ and $\lambda \in \Gamma$. We say that a sequence $x = (x_k)$ is $(\Delta_{\lambda, v}^m)_u$ -statistically bounded of order α if there exists a number $B \geq 0$ such that:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\lambda_n^\alpha} |\{k \in I_n: |u_k \Delta_v^m x_k| > B\}| = 0.$$

The set of all such sequence is denoted by $(\Delta_{\lambda, v}^m)_u(S_b^\alpha)$.

Note that this concept reduces to $(\Delta_v^m)_u$ -statistical boundedness of order α for $\lambda_n = n$ for all $n \in \mathbb{N}$.

Definition 5. Let $\alpha \in (0, 1]$ and $\lambda \in \Gamma$. A sequence $x = (x_k)$ is $(\Delta_{\lambda, v}^m)_u$ -statistically convergent of order α if there exists a number l such that:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\lambda_n^\alpha} |\{k \in I_n : |u_k \Delta_v^m x_k - l| > \varepsilon\}| = 0.$$

By $(\Delta_{\lambda,v}^m)_u(Sc^\alpha)$, we will denote the space of $(\Delta_{\lambda,v}^m)_u$ -statistically convergent sequences.

If we get $\lambda_n = n$ for all $n \in \mathbb{N}$, this concept turns into $(\Delta_v^m)_u$ -statistical convergence of order α .

Proposition 4. The inclusion $(\Delta_{\lambda,v}^m)_u(Sc^\alpha) \subset (\Delta_{\lambda,v}^m)_u(S_b^\alpha)$ is strict.

Proof: Let $x \in (\Delta_{\lambda,v}^m)_u(Sc^\alpha)$. In this case, there exists a number l such that

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\lambda_n^\alpha} |\{k \in I_n : |u_k \Delta_v^m x_k - l| > \varepsilon\}| = 0$$

for fixed $\varepsilon > 0$.

Using the properties of the absolute value, we can write:

$$\begin{aligned} \{k \in I_n : |u_k \Delta_v^m x_k| > |l| + \varepsilon\} \\ \subseteq \{k \in I_n : |u_k \Delta_v^m x_k - l| > \varepsilon\} \end{aligned}$$

and thus

$$\begin{aligned} \frac{1}{\lambda_n^\alpha} |\{k \in I_n : |u_k \Delta_v^m x_k| > |l| + \varepsilon\}| \\ \leq \frac{1}{\lambda_n^\alpha} |\{k \in I_n : |u_k \Delta_v^m x_k - l| > \varepsilon\}|. \end{aligned}$$

Taking the limit as $n \rightarrow \infty$ and setting $|l| + \varepsilon = B$, we obtain $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\lambda_n^\alpha} |\{k \in I_n : |u_k \Delta_v^m x_k| > B\}| = 0$.

Thus, $x \in (\Delta_{\lambda,v}^m)_u(S_b^\alpha)$. To prove the strictness, by taking $(\lambda_n) = (n)$, we can reconsider the example in Proposition 2.

Theorem 7. Let $\lambda, \mu \in \Gamma$, $\lambda_n \leq \mu_n$ for all $n \in \mathbb{N}$ and $0 < \alpha \leq \beta \leq 1$.

(i) If $\liminf_{n \rightarrow \infty} \frac{\lambda_n^\alpha}{\mu_n^\beta} > 0$, then $(\Delta_{\mu,v}^m)_u(S_b^\beta) \subset (\Delta_{\lambda,v}^m)_u(S_b^\alpha)$,

(ii) If $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\lambda_n^\alpha}{\mu_n^\beta} = 1$ and $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\mu_n}{\mu_n^\beta} = 1$, then $(\Delta_{\mu,v}^m)_u(S_b^\beta) = (\Delta_{\lambda,v}^m)_u(S_b^\alpha)$.

Proof: The proof can be referred to Temizsu and Et, Theorem 4 [17].

From Theorem 7 we obtain the following results:

Corollary 7. Let $\lambda, \mu \in \Gamma$, $\lambda_n \leq \mu_n$ for all $n \in \mathbb{N}$ and $\alpha \in (0,1]$.

(i) If $\liminf_{n \rightarrow \infty} \frac{\lambda_n}{\mu_n} > 0$, then $(\Delta_{\mu,v}^m)_u(S_b) \subset (\Delta_{\lambda,v}^m)_u(S_b)$

(ii) If $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\lambda_n}{\mu_n} = 1$, then $(\Delta_{\mu,v}^m)_u(S_b) = (\Delta_{\lambda,v}^m)_u(S_b)$.

Corollary 8. Let $\lambda \in \Gamma$, $\lambda_n \leq n$ for all $n \in \mathbb{N}$ and $\alpha \in (0,1]$.

(i) If $\liminf_{n \rightarrow \infty} \frac{\lambda_n^\alpha}{n} > 0$, then $(\Delta_v^m)_u(S_b) \subset (\Delta_{\lambda,v}^m)_u(S_b^\alpha)$,

(ii) If $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\lambda_n^\alpha}{n} = 1$, then $(\Delta_v^m)_u(S_b) = (\Delta_{\lambda,v}^m)_u(S_b^\alpha)$.

Theorem 8. Let $\lambda, \mu \in \Gamma$, $\lambda_n \leq \mu_n$ for all $n \in \mathbb{N}$ and $0 < \alpha \leq \beta \leq 1$.

(i) If $\liminf_{n \rightarrow \infty} \frac{\lambda_n^\alpha}{\mu_n^\beta} > 0$, then $(\Delta_{\mu,v}^m)_u(Sc^\beta) \subseteq (\Delta_{\lambda,v}^m)_u(Sc^\alpha)$,

(ii) If $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\lambda_n^\alpha}{\mu_n^\beta} = 1$ and $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\mu_n}{\mu_n^\beta} = 1$, then $(\Delta_{\mu,v}^m)_u(Sc^\beta) = (\Delta_{\lambda,v}^m)_u(Sc^\alpha)$.

The proof is trivial.

From Theorem 8 we can get the following result:

Corollary 9. Let $\lambda \in \Gamma$, $\lambda_n \leq n$ for all $n \in \mathbb{N}$ and $\alpha \in (0,1]$.

(i) If $\liminf_{n \rightarrow \infty} \frac{\lambda_n^\alpha}{n} > 0$, then $(\Delta_v^m)_u(Sc) \subseteq (\Delta_{\lambda,v}^m)_u(Sc^\alpha)$,

(ii) If $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\lambda_n^\alpha}{n} = 1$, then $(\Delta_v^m)_u(Sc) = (\Delta_{\lambda,v}^m)_u(Sc^\alpha)$.

Proposition 5. $(\Delta_v^m)_u(l_\infty) \subset (\Delta_{\lambda,v}^m)_u(S_b^\alpha)$.

Proof: Let $x \in (\Delta_v^m)_u(l_\infty)$. Thus there exists $B \geq 0$ such that $\{k : |u_k \Delta_v^m x_k| > B\} = \emptyset$. Thus, we have

$$\{k : |u_k \Delta_v^m x_k| > B\} \supseteq \{k \in I_n : |u_k \Delta_v^m x_k| > B\}.$$

Therefore, we obtain

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{\lambda_n^\alpha} |\{k \in I_n : |u_k \Delta_v^m x_k| > B\}| = 0.$$

ACKNOWLEDGEMENT

The second author was supported by scholarship-2211/A of TUBITAK (The Scientific and Technological Research Council of Turkey).

This article was produced from the Phd's thesis prepared under the supervision of Çiğdem BEKTAŞ.

REFERENCES

- [1] Fast H. Sur la convergence statistique, in Colloquium Mathematicae, 1951.
- [2] Steinhaus H. Sur la convergence ordinaire et la convergence asymptotique, in Colloq. math, 1951
- [3] Buck R. C. Generalized Asymptotic Density. American Journal of Mathematics, 75 335-346, 1953.
- [4] Schoenberg I.J. The integrability of certain functions and related summability methods, The American Mathematical Monthly, 66 361-775, 1959.
- [5] Mursaleen M. λ -statistical convergence, Mathematica Slovaca, 50 111-115, 2000.
- [6] Gadjiev A., Orhan C. Some approximation theorems via statistical convergence, The Rocky Mountain Journal of Mathematics, 129-138, 2002.
- [7] Çolak R. Statistical convergence of order α , Modern Methods in Analysis and Its Applications, Anamaya Pub., New Delhi, India, 121-129, 2010.
- [8] Çolak R. On λ -statistical convergence, in Conference on Summability and Applications, Turkey, 2011.
- [9] Çolak R., Bektaş Ç. A. λ -Statistical convergence of order α , Acta Mathematica Scientia, 31 953-959, 2011.

- [10] Kizmaz H. On certain sequence spaces, Canadian Mathematical Bulletin, 24 169-176, 1981.
- [11] Et M., Çolak R. On some generalized difference sequence spaces, Soochow Journal of Mathematics, 21 377-386, 1995.
- [12] Et M., Nuray F. Delta (m)-Statistical convergence, Indian Journal of Pure & Applied Mathematics, 32, 2001.
- [13] Çolak R. On some generalized sequence spaces, Communications Faculty Of Science University of Ankara Series A1 Mathematics and Statistics, 035-046, 1989.
- [14] Et M., Esi A. On Köthe-Toeplitz duals of generalized difference sequence spaces, Bull. Malays. Math. Sci. Soc., 23 25-32, 2000.
- [15] Fridy J., Orhan C. Statistical limit superior and limit inferior, Proceedings of the American Mathematical Society, 125 3625-3631, 1997.
- [16] Bhardwaj V. K., Gupta S. On some generalizations of statistical boundedness, Journal of Inequalities and Applications, 12, 2014.
- [17] Temizsu F., Et M. Some results on generalizations of statistical boundedness, Mathematical Methods in the Applied Sciences, 44 7471-7478, 2021.

Energy and Exergy Analysis of an Absorber Plate With Stainless Steel Scourers

Filiz OZGEN¹, Ayse DAYAN¹, Ugurcan YARDIMCI², Celal KISTAK³ and Nevin CELIK³

¹ Firat University, Technology Faculty, 23279 Elazig, Turkey

² Bingol University, Vocational School of Technical Sciences, 12100, Bingol, Turkey

³ Firat University, Department of Mechanical Engineering, 23119 Elazig, Turkey

✉: nevincelik23@gmail.com  [0000-0003-2278-2093](https://orcid.org/0000-0003-2278-2093)  [0000-0001-7056-5574](https://orcid.org/0000-0001-7056-5574)  [0000-0001-6511-4058](https://orcid.org/0000-0001-6511-4058)
 [0000-0003-4621-5405](https://orcid.org/0000-0003-4621-5405)  [0000-0003-2456-5316](https://orcid.org/0000-0003-2456-5316)

Received (Geliş): 03.01.2025

Revision (Düzeltilme): 14.03.2025

Accepted (Kabul): 29.04.2025

ABSTRACT

In this study, energy and exergy efficiencies of collectors with stainless steel scourers as the surface enhancing elements were evaluated. Three surface types were tested according to the scourers' arrangement. T1 has the highest number of scourers in irregular arrangement. T2 has less scourers in regular row. T3 is the surface without scourers. Experiments were carried out at air flow rates of $\dot{m}=0,025$ kg/s and $\dot{m}=0,05$ kg/s. Ambient temperature, surface temperature, solar radiation, inlet-outlet temperatures of air were measured. The exergy efficiencies at $\dot{m}=0,025$ kg/s are 50%, 48% and 40%, for T1, T2 and T3, respectively. These values reach up 66%, 55% and 52% at $\dot{m}=0,05$ kg/s, for T1, T2 and T3 respectively. The results show that the flat plate collector (T3) has the lowest efficiency and highest irreversibility. It is also found that the increase in air flowrate improves the collector performance in general.

Keywords: Energy, Exergy, Surface-enhancing elements, Solar Energy Systems, Thermal Performance

Paslanmaz Çelik Telli Bir Yutucu Plakanın Enerji ve Ekserji Analizi

ÖZET

Bu çalışmada, farklı emici yüzey düzenine sahip kolektörlerin enerji ve ekserji verimlilikleri karşılaştırmalı bir analizle değerlendirilmiştir. Emici yüzeyler üzerlerindeki tel yoğunluğuna göre üç tipe ayrılmıştır; düz ve gözeneksiz (T3), orta derecede gözenekli (T2) ve daha karmaşık gözenekli (T1). Deneyler, $\dot{m}=0,025$ kg/s ve $\dot{m}=0,05$ kg/s hava debisinde gerçekleştirilmiş, çevre sıcaklığı, emici yüzey sıcaklığı, güneş ışıması, hava giriş-çıkış sıcaklıkları gibi parametreler ölçülmüştür. $\dot{m}=0,025$ kg/s debide T1, T2 ve T3 için enerji verimlilikleri sırasıyla %45, %42 ve %36 olarak elde edilmiştir. $\dot{m}=0,05$ kg/s iken verimliliklerde belirgin artışlar gözlenmiştir. Benzer bir artış eğilimi ekserji verimliliklerinde de gözlenmiştir; $\dot{m}=0,025$ kg/s'de ekserji verimlilikleri sırasıyla %50, %48 ve %40 iken, $\dot{m}=0,05$ kg/s'de bu değerler %66, %55 ve %52'ye ulaşmıştır. Sonuçlar, düz plaka kolektörünün (T3) en düşük verimlilik ve en yüksek tersinmezlikle çalıştığını ortaya koymuştur. Ayrıca, hava debisindeki artışın kolektör performansını genel olarak iyileştirdiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler Enerji, Ekserji, Yüzey Geliştirici Elemanlar, Güneş Enerjisi Sistemleri, Termal Performans

INTRODUCTION

Improving the performance of solar air heaters (SAHs) is a significant focus area in advancing energy systems. To address the challenge, various strategies involving surface modifications have been developed to enhance heat transfer efficiency on absorber surfaces [2–6]. Among these approaches, dual-flow SAHs have emerged as a particularly effective solution, as they substantially increase the heat transfer area, thereby improving thermal performance. Furthermore, incorporating flow-altering obstacles within the air ducts has proven to be a highly effective method for optimizing airflow distribution, which in turn significantly improves the thermal performance of the system [7–9].

The literature presents a wide array of configurations for SAHs, reflecting ongoing efforts to optimize their design and performance. Esen [10] performed comprehensive exergy and energy analyses of SAH systems equipped with obstacle-modified absorber surfaces, evaluating the impact of various obstacle placements on system efficiency. Similarly, Akpınar and Kocyigit [11] conducted experimental investigations on four different absorber surface types, examining their performance under two distinct air mass flow rates to determine optimal operating conditions. Ozgen et al. [12] explored the use of cylindrical tin-can absorber plates in SAHs, systematically testing three different configurations to assess their thermal and aerodynamic performance. Arabhosseini et al. [13] developed an innovative porous SAH integrated with a recycling system, achieving

notable maximum exergy and energy efficiencies of 22.3% and 63.4%, respectively. Ucar and Inalli [14] investigated the performance of SAHs equipped with graduated plates and fins, revealing that conventional SAHs exhibited the lowest efficiency among the designs studied. Meanwhile, Albizzati [15] conducted an in-depth analysis of porous absorber surfaces, emphasizing their potential to enhance energy gains and improve overall thermal performance.

Karim et al. [16] compared flat sheet, finned, and V-fold SAHs, with V-pleated designs achieving superior efficiency. Moumni et al. [17] demonstrated increased efficiency using rectangular absorber surfaces placed perpendicular to airflow, while Yeh et al. [18] enhanced efficiency and air mass flow rates by employing double-pass fins in reversible flat-layer of SAHs. Sahu and Bhagoria [19] used inclined transverse beams to improve performance, and Alvarez et al. [20] achieved better thermal efficiency with absorber surfaces made of recycled aluminum cans. Kreith and Kreider [21] proposed flow baffles and enlarged heat transfer areas to create turbulence, while Ghoneim [22] emphasized the efficiency benefits of square-section honeycomb configurations.

In this study, thermal performance is improved by integrating stainless steel scourers as surface-modifying elements into solar collectors. The absorber surfaces are categorized as T1, with complex porous arrangements; T2, with scourers in regular rows; and T3, a flat surface without scourers. Energy and exergy efficiencies are employed as primary metrics to evaluate the performance of these designs.

EXPERIMENTAL STUDY

Setup

The experimental design used in this work has been previously applied by the co-authors in earlier research [23, 24], confirming its dependability and suitability for evaluating SAH performance. An graphic illustration of the experimental setup is given in Figure 1. The collector housing has dimensions of 400 mm (height), 800 mm (width), and 1200 mm (length). Insulation is achieved using a 3 cm thick strap layer, while the primary structural framework of the case is constructed from chipboard, a 4 mm thick transparent glass cover is integrated to facilitate solar energy absorption. The collector is positioned with its rear facing south, inclined at a 37° angle to the horizontal plane, ensuring optimal sun exposure for the experimental investigation.

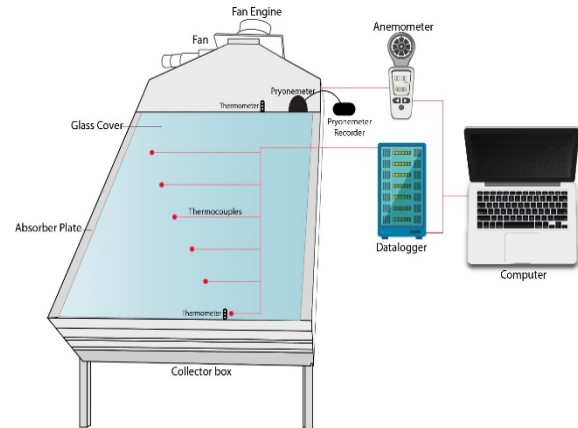


Fig. 1 Schematic of the experimental setup [23, 24]

The absorber surface of a solar air collector is a key component that significantly influences system performance. In order to promote airflow on both sides, this study investigates three potential absorber surface configurations, each of which includes unique surface-enhancing components. It is well established that dual-channel airflow designs can enhance solar collector efficiency [18]. A total of 180 stainless steel scourers were affixed using silicone adhesive to both sides of a 1.5 mm galvanized sheet to create the absorber surfaces. After that, black matte paint was applied to the sheet to maximize its sunlight absorption capabilities.

The first absorber surface (T1) includes 102 stainless steel scourers arranged in a complex and non-uniform pattern, as displayed in Fig. 2a. The second absorber surface (T2) is designed with 78 scourers organized in a structured and uniform layout, as illustrated in Fig. 2b. The third absorber surface (T3), which serves as the flat plate does not have any scourers, as seen in Fig. 2c.

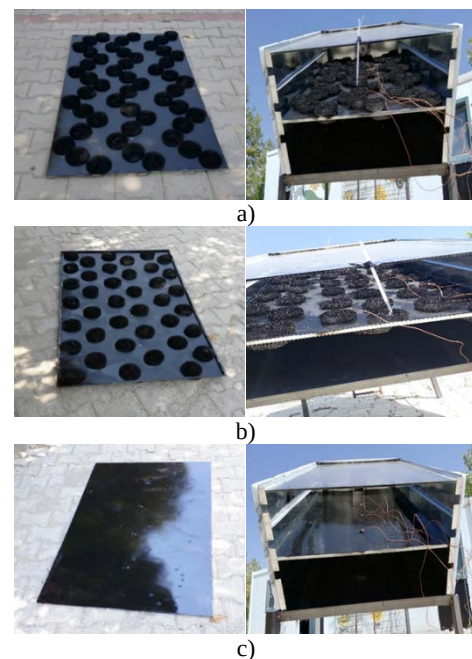


Fig. 2 Absorber surface types a) T1, b) T2, c) T3 [23, 24]

A Pyranometer (Kipp Zonen CM3) is utilized to measure solar radiation. Solar collector is linked to the suction outlet of an air fan (800 m³/h) through a conduit. Airflow was measured using a digital anemometer (AM-4206M) with a metal fan head for improved accuracy. The air temperatures at the collector's outlet and inlet are recorded using a digital thermometer (0-100°C)

To assess temperature distribution on the absorber surfaces, T-type thermocouples are installed at four evenly spaced points, 24 cm apart. Thermocouples are connected to Data Logger (CR 510), which records temperature readings. A manometer is used to measure pressure losses between the outlet and inlet of collector. Additionally, a dimmer is utilized to adjust the mass flow rate at the fan outlet, allowing for effective air suction through the collector, and a rotameter is positioned at the collector's outlet to monitor the mass flow rate.

Data Reduction

The experiments were conducted in Elazığ, Turkey, between 9:00 AM and 4:00 PM, focusing on days with highest observed efficiency. The study involved testing three different absorber surface geometries at two air mass flow rates, $\dot{m}=0,025$ kg/s and $\dot{m}=0,05$ kg/s.

A theoretical model based on unsteady-state conditions was developed based on a thermal energy balance approach [10].

$$[Accumulated\ energy] + [Energy\ gain] = [Absorbed\ energy] - [Lost\ energy]$$

According to the energy balance the equation can be written as follows:

$$\left[m C_p \left(\frac{dT_w}{dt} \right) \right] + [\dot{m} C_p (T_o - T_i)] = [\eta_0 I A_c] - [U_c (T_w - T_\infty) A_c] \quad (1)$$

where m and $\dot{m}$ represent the mass and mass flow rate of air respectively. C_p is the specific heat capacity of the air. T_w is the average of all measured wall temperatures, T_∞ is the surrounding ambient temperature, T_o and T_i are the air temperatures at the outlet and inlet of the collector, I is the radiation, A_c is the surface area of the collector. The optical yield (η_0) and the energy loss coefficient U_c are the parameters that characterize the behavior of the collector. Note that (η_0) represents the fraction of solar radiation absorbed by the panel and depends mainly on the transmittance of the transparent covers and the absorptivity of the panel [10]. Thermal efficiency η_t of collectors is characterized as the proportion of energy gained to radiation at the collector plane:

$$\eta_t = \dot{m} C_p (T_o - T_i) / (I A_c) \quad (2)$$

The 1st law of thermodynamics lays the groundwork for examining thermal systems' energy balance with an emphasis on energy transfer and conservation. When combined with standard thermal design procedures, the second law of thermodynamics provides a more comprehensive understanding of system performance by

addressing the directional nature of energy transformations and irreversibility.

Exergy analysis, integrating the principles of laws of thermodynamics, evaluates not just the amount of energy transferred throughout a system, but also its quality. This approach is essential for identifying thermodynamic inefficiencies and areas of irreversibility, known as exergy losses, in thermal and chemical processes. By highlighting these inefficiencies, exergy analysis aids in minimizing entropy generation and optimizing the performance of energy systems. In this study, the solar collector is analyzed as a closed system under several assumptions: steady-state flow, negligible kinetic and potential energy effects, air behaving as an ideal gas with constant specific heat, and positive directions for heat transfer to the system and work transfer from the system. These assumptions simplify the analysis while providing valuable insights into system performance and efficiency. The mass conservation is:

$$\Sigma \dot{m}_i = \Sigma \dot{m}_o \quad (3)$$

The overall energy and exergy balance can be expressed as follows [14]:

$$\Sigma \dot{E} x_i - \Sigma \dot{E} x_o = \Sigma \dot{E} x_{dest} \quad (4)$$

where the subscripts i , o and $dest$ represent the inlet, outlet and destructed terms respectively. then the exergy balance including heat, work and mass flows can be written as:

$$\Sigma \dot{E} x_{heat} - \Sigma \dot{E} x_{work} + \Sigma \dot{E} x_{mass,i} - \Sigma \dot{E} x_{mass,o} = \Sigma \dot{E} x_{dest} \quad (5)$$

The velocity form of the general exergy balance is:

$$\Sigma \left(1 - \frac{T_\infty}{T_w} \right) \dot{Q} - \dot{W} + \Sigma \dot{m}_i \psi_i - \Sigma \dot{m}_o \psi_o = \dot{E} x_{dest} \quad (6)$$

where ψ_i and ψ_o are given as:

$$\psi_i = (h_i - h_e) - T_\infty (s_i - s_e) \quad (7a)$$

$$\psi_o = (h_o - h_e) - T_\infty (s_o - s_e) \quad (7b)$$

When Eq.s (7a) and (7b) are replaced in Eq. (6), the equation is rearranged as follows [25].

$$\left(1 - \frac{T_\infty}{T_w} \right) \dot{Q} - \dot{m} (h_o - h_i) - T_\infty (s_o - s_i) = \dot{E} x_{dest} \quad (8)$$

where $\dot{Q}$ is the solar energy absorbed by the collector surface:

$$\dot{Q} = I(\tau\alpha)A_c \quad (9)$$

The enthalpy difference and entropy difference of the air in the collector can be written as follows.

$$\Delta h = h_o - h_i = C_p (T_o - T_i) \quad (10)$$

$$\Delta s = s_o - s_i = C_p \ln \frac{T_o}{T_i} - R \ln \frac{p_o}{p_i} \quad (11)$$

By substituting Eqs (9), (10) and (11) into Eq. (8):

$$\left(1 - \frac{T_w}{T_o}\right) I(\tau\alpha) A_c - \dot{m} C_p (T_o - T_i) + \dot{m} C_p T_o \ln \frac{T_o}{T_i} - \dot{m} R T_o \ln \frac{P_o}{P_i} = \dot{E}x_{dest} \quad (12)$$

where $\dot{E}x_{dest}$ is defined as irreversibility:

$$\dot{E}x_{dest} = T_o \dot{S}_{gen} \quad (13)$$

Then the exergy efficiency can be found by:

$$\eta_{II} = \frac{\dot{E}x_o}{\dot{E}x_i} = \frac{\dot{m} [h_o - h_i - T_o (s_o - s_i)]}{\left(1 - \frac{T_w}{T_o}\right) Q} \quad (14)$$

The bulk temperature is used to choose thermophysical properties of air.

Uncertainty Analysis

In this study, the uncertainties in the measured values are evaluated using the Kline and McClintock [26] methodology. This method offers a structured and reliable approach for quantifying measurement uncertainties, ensuring the accuracy and credibility of the experimental results. According to this method, in a measurement with n independent variables, R is the dimension to be measured; $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ are the variables affecting the measurement; and $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n$ are the uncertainties related to the independent variables.

$$\omega_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \omega_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \omega_2\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_3} \omega_3\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \omega_n\right)^2} \quad (15)$$

The independent parameters measured during the experiments included the outlet and inlet air temperatures, air velocity, solar radiation and ambient temperature. According to the instruments' catalog information the accuracy values of the thermocouples, anemometer and pyrometer are 0.018 °C, with $\pm 2\%$, and 1% respectively. Hence the total uncertainties in estimating the dependent parameters are 4.5% for the mass flow rate of air, 1.8% for the thermal efficiency and 2% for the 2nd law efficiency.

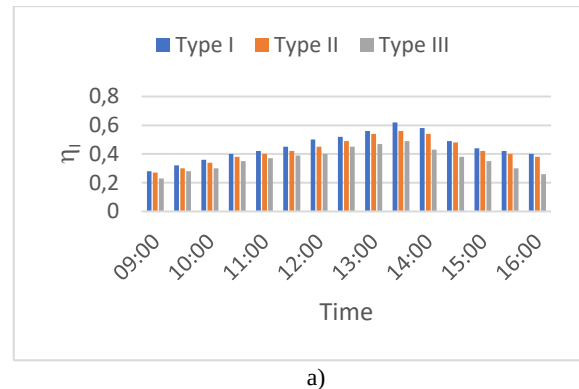
RESULTS AND DISCUSSIONS

One effective method to enhance heat extraction from the absorber surface is to introduce flow obstacles into the air path. These obstacles, placed above the absorber surface, promote turbulence within the collector and consequently improve efficiency with minimal thermal loss. In this study, scourers were placed both above and below the absorbing surface in Collector T1 and T2 to achieve higher efficiency. This design enables a double-pass airflow, which, compared to single-pass airflow, increases the heat transfer area and turbulence, further improving collector efficiency. The findings suggest that stainless steel scourers present a practical and scalable solution for enhancing solar air collector performance, especially in applications such as residential heating, industrial drying, and greenhouse thermal management.

Graphs are used to display the experimental results and computed values. These graphs illustrate the temperature distribution obtained from thermocouples placed at regular intervals on the absorber surface over time, the variation in efficiency, and the changes in air temperature at the collector's input and output for mass flow rates of 0.025 kg/s and 0.05 kg/s.

The first-law efficiencies, namely the energy efficiencies of the three collector types over time, are presented in Fig. 3a and Fig. 3b for air mass flow rates of 0.025 kg/s and 0.05 kg/s, respectively. According to the bar graphs, at an air mass flow rate of 0.025 kg/s, the maximum energy efficiency values for T1, T2, and T3 are 62%, 56%, and 49%, respectively. When the air mass flow rate is increased to 0.05 kg/s, these efficiencies rise to 74%, 63%, and 62%, respectively. As the air mass flow rate increases, the temperature rise across the collector decreases, which leads to a reduction in absorber surface temperature, thereby minimizing thermal losses to the ambient environment and enhancing overall efficiency.

T3, which lacks turbulence-inducing surface elements, consistently demonstrates the lowest efficiency among all configurations. In contrast, T1 outperforms both T2 and T3, owing to its distinct absorber surface geometry. The superior performance of the T1 configuration is attributed to its irregular and densely packed distribution of stainless steel scourers, which significantly enhances turbulence within the collector's airflow. This elevated turbulence disrupts the thermal boundary layer, thereby increasing the convective heat transfer coefficient and improving the thermal energy exchange between the air and the absorber surface. Moreover, the placement of scourers on both sides of the absorber plate enables a dual-pass airflow mechanism that effectively enlarges the heat transfer surface area. This configuration not only reduces thermal losses but also promotes a more uniform temperature distribution across the collector surface, ultimately improving both energy and exergy efficiencies. These findings align with previous studies by Esen [10] and Akpınar and Koçyiğit [11], who also reported enhanced thermal performance with the integration of turbulence-inducing features in solar air collector designs.



a)

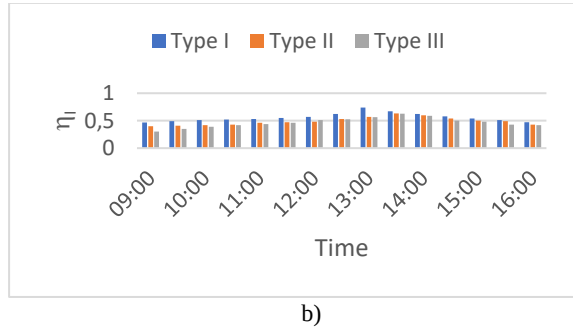


Fig. 3 Variation of thermal efficiency over time for different types of absorbing surfaces **a)** $\dot{m} = 0.025 \text{ kg/s}$, **b)** $\dot{m} = 0.05 \text{ kg/s}$

Exergy analysis is utilized to identify the system's irreversible processes and assess how these destructive processes impact overall performance. This analysis is conducted for each absorbing surface, with calculations performed for destroyed exergy (irreversibility), exergy loss, and exergy efficiency. The max and min values for each parameter are summarized in Table 1. Exergy losses may occur due to thermal dissipation and optical inefficiencies [9]. In present study the highest lost exergy is seen when using the T3 collector (71.34% for 0.025 kg/s). The lowest lost exergy is obtained when T1 collector is used (34.2% for 0.05 kg/s). It is important to note that, under certain operating conditions, the exergy efficiency was observed to be slightly higher than the thermal efficiency. This outcome can be attributed to reduced irreversibility and lower entropy generation in configurations such as T1, where enhanced turbulence improves the quality of heat transfer. Since exergy analysis accounts not only for the quantity but also the quality of energy, the effective utilization of high-grade thermal energy can lead to higher exergy efficiency under favorable conditions.

Furthermore, the results indicate that the highest exergy loss occurs in the flat plate absorber surface (i.e., the collector without scourers), primarily due to significant thermal losses. The main contributors to energy destruction in SAH systems include heat transfer between the absorber and the environment, radiation losses to ambient air, and pressure drop within the collector duct [9]. These factors collectively reduce the overall system performance. The extent of energy destruction becomes particularly significant during midday, when absorber surface temperatures peak and thermal interactions intensify. Among the three collector configurations, the T1 design exhibits the highest levels of exergy destruction, which highlights the thermal management challenges associated with complex surface geometries. This limitation stems from its partial inability to utilize the absorbed solar energy efficiently. Therefore, there remains a need for further improvements in absorber geometry and system integration to enhance both energy and exergy performance in SAH applications.

Table 1. Exergy analysis

T1				
Flowrate $\dot{m}$, kg/s	0.025		0.05	
	Min.	Max.	Min.	Max.
Exergy loss, %	50.00	67.94	34.20	44.35
Irreversibility $\dot{E}x_{dest}$, kW	0.225	0.255	0.249	0.355
Exergy efficiency η_{II} , %	27.8	72	52	89
T2				
Flowrate $\dot{m}$, kg/s	0.025		0.05	
	Min.	Max.	Min.	Max.
Exergy loss, %	53.14	65.00	48.01	51.42
Irreversibility $\dot{E}x_{dest}$, kW	0.221	0.287	0.180	0.264
Exergy efficiency η_{II} , %	32	64	42	59
T3				
Flowrate $\dot{m}$, kg/s	0.025		0.05	
	Min.	Max.	Min.	Max.
Exergy loss, %	66.98	71.34	48.11	64.28
Irreversibility $\dot{E}x_{dest}$, kW	0.173	0.236	0.265	0.285
Exergy efficiency η_{II} , %	25	54	32	70

It is important to note that the scourers have a significant impact on the system's energy and exergy efficiency. Regardless of the air mass flow rate, T1 yields the highest exergy efficiency, while T3 exhibits the lowest under most conditions. Fig. 4a and Fig. 4b display the hourly energy efficiencies for $\dot{m} = 0.025 \text{ kg/s}$ and $\dot{m} = 0.05 \text{ kg/s}$, respectively. For the flat absorber plate (T3), the average daily exergy efficiencies are 40% and 51%, respectively. However, in the presence of scourers, these values improve by 10–15%, reaching 50% and 66%, respectively, for $\dot{m} = 0.025 \text{ kg/s}$ and $\dot{m} = 0.05 \text{ kg/s}$.

Although T2 includes surface roughness to enhance heat transfer, the increased flow resistance it introduces can lead to higher entropy generation. In contrast, the smoother surface of T3 results in lower pressure drop and less irreversibility, which may explain its slightly higher exergy efficiency compared to T2 under some conditions. This highlights the delicate trade-off between enhanced turbulence and fluid friction losses when evaluating exergy performance. As outlined, the main aim of this study is to evaluate the performance of stainless steel scourers attached to the absorber plate of a solar collector. The findings reveal that absorber surfaces equipped with scourer-type obstacles achieve higher energy and exergy efficiencies compared to flat surfaces. A summary of exergy and energy efficiencies reported in previous publications is presented in Table 2. It should be noted that direct comparisons with other studies are difficult due to variations in experimental and structural conditions. Nevertheless, the results of this experiment demonstrate strong agreement with the trends observed in the literature.

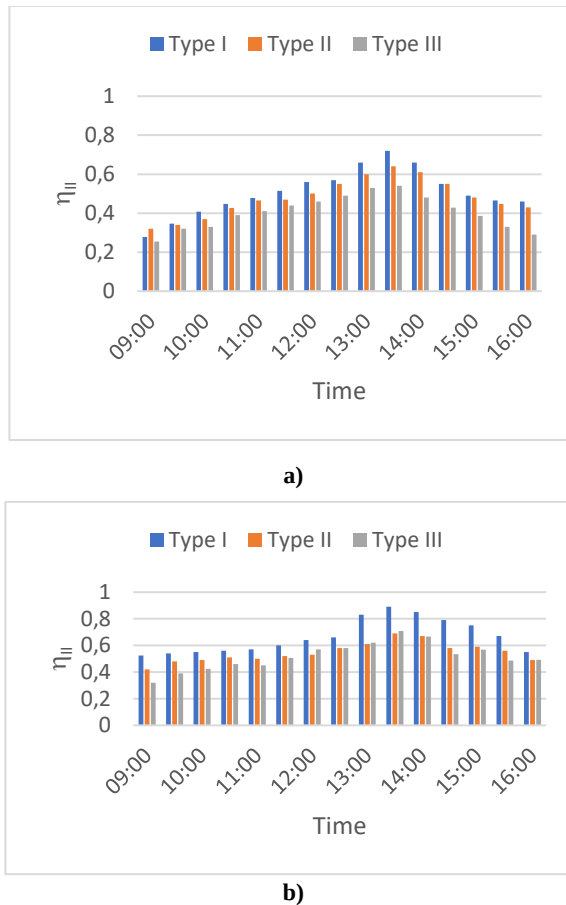


Fig. 4 Variation of exergy efficiency over time for different types of absorbing surfaces **a)** $\dot{m} = 0.025 \text{ kg/s}$, **b)** $\dot{m} = 0.05 \text{ kg/s}$

Table 2 Comparison to the literature

	Absorber type	Energy efficiency %	Exergy efficiency %
Ucar and İnallı [14]	Flat single-pass	30.5	35.61
	Finned surface	35.2	49.37
Esen [10]	Flat double-pass	67.5	60.97
	Flat single-pass	48.12	33.83
Akpınar and Kocyigit [11]	Flat single-pass	25.51	10.15
	Rectangular obstacles	50.55	33.96
Present work	Stainless steel scourers	46-74	55.04

As shown in Table 2, the energy efficiencies achieved in this study, particularly for T1, exceed those of flat single-pass collectors studied by Ucar & İnallı [14] and are comparable to the double-pass systems analyzed by Esen [10]. The T1 design, which incorporates a complex arrangement of stainless steel scourers, achieves a maximum energy efficiency of 74% and an exergy efficiency of 66%, showcasing its ability to optimize heat

transfer while minimizing thermal losses. Similar trends have been observed in studies such as Ali et al. [27], where passive flow control methods such as optimizing turbulence patterns demonstrated significant efficiency improvements in solar thermal systems.

The incorporation of turbulence-inducing elements in the form of scourers has proven effective in enhancing the thermal performance of SAHs. As Hroub et al. [28] emphasized, increasing the absorber surface area through innovative designs significantly reduces thermal losses and enhances efficiency, a principle also observed in this study. This complements the findings of Karim & Hawlader [16], who noted that V-corrugated and finned collectors outperformed flat plate designs by optimizing turbulence and heat transfer coefficients, similar to the enhancements seen with T1 in this study. These results confirm the critical role of obstacle design and complexity in improving thermal system performance. Additionally, Sanaka et al. [29] demonstrated that sustainable, high-conductivity materials significantly improve absorber performance in solar air collectors, offering insights into the benefits of the stainless steel scourers used in this study. Such strategies align with the double-pass airflow designs of T1 and T2 tested here, where airflow paths above and below the absorber plate maximize heat transfer. Yeh et al. [18] also emphasized the benefits of such configurations, further validating the effectiveness of the T1 and T2 designs in this context.

The findings from this study highlight that innovative absorber surface designs, such as those tested here, can achieve superior thermal performance while maintaining simplicity and scalability. The stainless steel scourer configuration offers a practical and cost-effective solution for residential and industrial applications, particularly in regions with high solar radiation. Moreover, as noted by Ali et al. [27], integrating turbulence-enhancing designs can significantly boost system efficiency, providing opportunities for further optimization.

CONCLUSIONS

Maximizing heat extraction from the absorber surface of a solar air collector can be effectively achieved through the use of strategically placed airflow obstacles. These elements enhance internal turbulence, thereby increasing heat transfer rates and improving overall thermal efficiency while minimizing energy losses. In this study, stainless steel scourers were installed both above and below the absorber plate in T1 and T2 configurations, forming a double-pass airflow system. This design enlarges the heat transfer area, induces beneficial turbulence, and markedly improves collector performance.

The study evaluated three different collector types distinguished by their absorber surface geometries. T1 features a complex and irregular wire arrangement, T2 includes a simpler row-based configuration, while T3 employs a flat absorber surface with no enhancement elements. Experimental tests were conducted at air mass

flow rates of 0.025 kg/s and 0.05 kg/s. The findings show that T1 outperforms T2 in both energy and exergy efficiencies, primarily due to its irregular scourer placement that promotes turbulence, enhances heat transfer, raises absorber temperatures, and reduces thermal losses. Conversely, T3 exhibits the lowest efficiency owing to its flat geometry, which limits turbulence and reduces effective heat transfer area.

When compared to data reported in the literature, the study confirms that well-designed collectors like T1 can achieve notable efficiency, with energy efficiencies reaching up to 74%, a level considered satisfactory for solar air collectors. However, the flat-plate absorber surface (T3) exhibited the greatest irreversibility, as only a small portion of the absorbed solar energy contributes effectively to the exergy analysis. The findings of this study have notable implications for industrial applications, particularly in the fields of sustainable thermal energy systems. The enhanced thermal and exergy performance observed in the T1 and T2 configurations indicates their suitability for practical use in low- to medium-temperature industrial processes. Potential applications include agricultural drying of fruits, vegetables, and herbs; greenhouse heating; and preheating of ventilation air in residential or industrial buildings. These configurations offer the potential for improved energy efficiency and reduced operational costs, contributing to cleaner and more cost-effective thermal energy solutions in various sectors.

Nomenclatures

Symbol	Description	Unit
$\dot{m}$	Air mass flow rate	kg/s
h	Specific enthalpy	J/kg
u	Internal energy	J/kg
U	Overall heat transfer coefficient	W/(m ² ·K)
L	Collector length	m
W	Collector width	m
V	Air velocity	m/s
Re	Reynolds number	–
Nu	Nusselt number	–
Pr	Prandtl number	–
k	Thermal conductivity coefficient	W/(m·K)

REFERENCES

[1] Varun, Saini R. P., Singal S. K. A review on roughness geometry used in SAHs, *Solar Energy*, 81, 1340–1350, 2007.
[2] Ekramian E., Etemad S. Gh., Haghshenasfard M. Numerical analysis of heat transfer performance of flat plate solar collectors, *Journal of Fluid Flow Heat and Mass Transfer*, 1, 38–46, 2014.
[3] Kalogirou S. A. Environmental benefits of domestic solar energy systems. *Solar Energy*, 85(1), 118–133, 2011.
[4] Pathak P. K., Chandra P., Raj G. Energy and exergy analysis of corrugated plate solar collector by forced convection using two different absorber plate material, *Heat and Mass Transfer*,

57,565–581, 2021.

[5] Esen H., Ozgen F., Esen M., Sengur A. Artificial neural network and wavelet neural network approaches for modelling of a SAH, *Expert Systems with Applications*, 36, 11240–11248, 2009.
[6] Gürtürk M., Benli H., Ertürk N. K. Effects of different parameters on energy – exergy and power conversion efficiency of PV modules, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 426–439, 2018.
[7] Darici S., Kilic A. Comparative study on the performances of solar air collectors with trapezoidal corrugated and flat absorber plates, *Heat and Mass Transfer*, 24, 1–1, 2020.
[8] Facão J. Optimization of flow distribution in flat plate solar thermal collectors with riser and header arrangements, *Solar Energy*, 120, 104–112, 2015.
[9] Avargani V. M., Zendejboudi S., Rahimi A., Soltani S. Comprehensive energy, exergy, enviro-exergy, and thermo-hydraulic performance assessment of a flat plate SAH with different obstacles, *Applied Thermal Engineering*, 203, 117907, 2022.
[10] Esen H. Experimental energy and exergy analysis of a double-flow SAH having different obstacles on absorber plates, *Building and Environment*, 43, 1046–1054, 2008.
[11] Akpinar E., Koçyiğit F. Energy and exergy analysis of a new flat-plate SAH having different obstacles on absorber plates, *Applied Energy*, 87, 3438–3450, 2010.
[12] Ozgen F., Esen M., Esen H. Experimental investigation of thermal performance of a double-flow SAH having aluminium cans, *Renewable Energy*, 34, 2391–2398, 2009.
[13] Arabhosseini A., Samimi-Akhijahani H., Motahayyer M. Increasing the energy and exergy efficiencies of a collector using porous and recycling system, *Renewable Energy*, 132, 308–325, 2019.
[14] Ucar A., Inalli M. Thermal and exergy analysis of solar air collectors with passive augmentation techniques, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 33, 1281–1290, 2006.
[15] Albizzati E. D. Solar collector for air heater, *International Solar nEnergy Society*, 22, 663–666, 2000.
[16] Karim M. A., Hawlader M. N. A. Performance investigation of flat plate, v-corrugated and finned air collectors, *Energy*, 31, 452–470, 2006.
[17] Moummi N., Youcef Ali S., Moummi A., Desmons J. Y. Energy analysis of a solar air collector with rows of fins, *Renewable Energy*, 29, 2053–2064, 2004.
[18] Yeh H. M., Ho C. D., Hou J. Z. The improvement of collector efficiency in SAHs by simultaneously air flow over and under the absorbing plate, *Energy*, 24, 857–871, 1999.
[19] Sahu M. M., Bhagoria J. L. Augmentation of heat transfer coefficient by using 90° broken transverse ribs on absorber plate of SAH, *Renewable Energy*, 30, 2057–2073, 2005.
[20] Alvarez G., Arce J., Lira L., Heras M. R. Thermal performance of an air solar collector with an absorber plate made of recyclable aluminium cans, *Solar Energy*, 77, 107–113, 2004.
[21] Kreith F., Kreider J. F. Principles of Solar Engineering, McGraw-Hill, New York, 1978.
[22] Ghoneim A. A. Performance optimization of solar collector equipped with different arrangements of square-celled honeycomb, *International Journal of Thermal Sciences*, 44, 95–105, 2005.
[23] Ozgen F., Dayan A. Energy analysis of a SAH with an absorber plate made of porous material, *Thermal Science*, 25, 333–337, 2021.
[24] Can O. F., Celik N., Ozgen F., Kistak C., Taskiran A. Experimental and numerical analysis of the solar collector with stainless steel scourers added to the absorber surface, *Applied*

- Sciences-Basel, 14, Article number: 2629,2024.
- [25] Torres-Reyes E., Navarrete-Gonzalez J. J., Zaleta-Aguilar A., Cervantes-de Gortari J. G. Optimal process of solar to thermal energy conversion and design of irreversible flat-plate solar collectors, Energy, 28, 99–113,2003.
- [26] Kline S. J., McClintock F. A. Describing uncertainties in single-sample experiments, Mechanical Engineering, 75, 3–8, 1953.
- [27] Ali, M. H., Kurjak, Z., Beke, J. The Effect of Forced Airflow Inside the Solar Chimney on the Photovoltaic Module Power Generation. 29th Workshop on Energy and Environment, 2023.
- [28] Hroub, Q., Drira, Y., Jribi, S., Bentaher, H. Advancing Solar Thermal Energy Systems: Comparative Study of Low-Cost Receivers in Parabolic Trough Collectors. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 16(6), 063704, 2024.
- [29] Sanaka, S. P., Mareedu, N. D., et al. Characterization of Sustainable Solar Absorbing Materials for Solar Thermal Applications. IEEE Xplore, 2024.

Effect of Hybrid Activation and Loss Functions for Pneumonia Classification in Chest X-Ray Images

Yasin ÖKKAN¹, Sibel BARIN ÖZKAN²

¹ Department of Computer Technologies, Zonguldak Bülent Ecevit University, Zonguldak, Turkey

² Department of Computer Technologies, Zonguldak Bülent Ecevit University, Zonguldak, Turkey

✉: yasin.ozkan@beun.edu.tr



¹0000-0002-2029-0856



²0000-0001-8302-7441

Received (Geliş): 22.01.2025

Revision (Düzeltilme): 07.04.2025

(Kabul): 22.04.2025

ABSTRACT

Pneumonia is a major infectious disease that causes significant deaths worldwide and early diagnosis is crucial. Chest X-ray images, widely used in diagnosis, require detailed analysis for accurate results. In this study, deep learning-based models are used to classify chest X-ray images as normal or pneumonia. A publicly available chest X-ray dataset was used and five models (MobileNetV2, ResNet50, VGG19, Xception and ViT) were compared. Among them, VGG19 achieved the highest accuracy of 88.14%. Moreover, a proposed hybrid activation function integrated into the VGG19 model improved the classification performance, reaching an accuracy of 91.67%. Moreover, performance evaluations with different loss functions showed that the proposed hybrid loss function gave the best result with an accuracy of 94.71%. Unlike previous studies, this research provides a new perspective for pneumonia detection based on deep learning models by presenting a novel combination of hybrid activation and loss functions.

Keywords: Chest X-Ray, Deep learning, Hybrid activation function, Loss function, Pneumonia

Chest X-Ray Görüntülerinde Pnömoni Sınıflandırması İçin Hibrit Aktivasyon ve Kayıp Fonksiyonlarının Etkisi

ÖZ

Pnömoni, dünya çapında önemli ölümlere neden olan önemli bir enfeksiyon hastalığıdır ve erken tanı çok önemlidir. Teşhiste yaygın olarak kullanılan göğüs röntgeni görüntüleri, doğru sonuçlar için ayrıntılı analiz gerektirir. Bu çalışmada, göğüs röntgeni görüntülerini normal veya pnömoni olarak sınıflandırmak için derin öğrenme tabanlı modeller kullanılmıştır. Halka açık bir göğüs röntgeni veri kümesi kullanılmış ve beş model (MobileNetV2, ResNet50, VGG19, Xception ve ViT) karşılaştırılmıştır. Bunlar arasında VGG19 %88,14 ile en yüksek doğruluğu elde etmiştir. Ayrıca, VGG19 modeline entegre edilen önerilen bir hibrit aktivasyon fonksiyonu, sınıflandırma performansını artırarak %91,67'lik bir doğruluğa ulaşmıştır. Ayrıca farklı kayıp fonksiyonlarıyla yapılan performans değerlendirmeleri, önerilen hibrit kayıp fonksiyonunun %94,71 doğrulukla en iyi sonucu verdiğini göstermiştir. Önceki çalışmalardan farklı olarak bu araştırma, hibrit aktivasyon ve kayıp fonksiyonlarının yeni bir kombinasyonunu sunarak derin öğrenme modellerine dayalı pnömoni tespiti için yeni bir bakış açısı sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Göğüs röntgeni, Derin öğrenme, Hibrit aktivasyon fonksiyonu, Kayıp fonksiyonu, Zatiirre

INTRODUCTION

Chest X-Ray (CXR) is a cornerstone diagnostic tool in medical imaging, extensively utilized for detecting a wide range of pulmonary and cardiovascular conditions. It plays a pivotal role in the identification of lung diseases, including pneumonia, which, if left undiagnosed or untreated, can result in severe complications [1]. In this regard, CXR are particularly effective for diagnosing conditions like pneumonia, as they enable the detection of infiltrates and opacities within the lungs [2]. Despite their effectiveness, the interpretation of traditional CXR images can be labor-intensive and prone to human error, even for seasoned radiologists, particularly when dealing with large

volumes of data. To mitigate these challenges and enhance diagnostic efficiency, the adoption of digital imaging technologies has become increasingly prevalent, offering a means to accelerate the diagnostic process while minimizing the risk of oversight.

Digital CXR offers many advantages over traditional film-based methods. Digital systems allow high-resolution images to be obtained, while at the same time facilitating the process of storing and sharing images digitally. This is particularly advantageous for healthcare facilities in remote areas, as digital images can be quickly transferred over the internet and reviewed by remote specialists [3]. With the availability of digital images, image analysis processes have become automated, saving

time and labor, especially when working with large patient data.

At this point, artificial intelligence techniques have an important place in the analysis of CXR images. In this field, especially deep learning methods and CNNs, which stand out among these methods, are used effectively. Thanks to their ability to learn and classify complex patterns in images, CNNs have achieved highly successful results in medical imaging [4]. In early diagnosis of diseases such as pneumonia, CNNs can ease the workload of radiologists and improve accuracy. However, training deep learning models requires large amounts of labeled data. In this study, the “Chest X-Ray dataset” containing a total of 5,856 labeled images classified as normal and pneumonia was used. The labeling process was carried out by expert radiologists. This is where transfer learning comes into play as an approach that allows training models with high accuracy even with limited labeled data. Transfer learning is the process of adapting a model that has been trained on larger datasets to smaller datasets, which provides a significant advantage in the field of medical imaging [5]. Although various deep learning models have been applied to pneumonia detection in previous studies, there is still a gap in the literature regarding the combined effect of specially designed activation and loss functions on classification performance.

This paper provides an in-depth study of the effectiveness of deep learning methods, specifically CNN and transfer learning approaches, for analyzing CXR images. In this context, the performance of different architectures such as MobileNetV2, ResNet50, VGG19, Xception and ViT is evaluated. The aim of the study is to optimize these methods to accurately classify diseases such as pneumonia. The choice of activation and loss functions, which play a critical role in improving model performance, significantly affects the overall performance of the model. Accordingly, the evaluation of how different combinations of activation functions and loss functions can improve the classification accuracy of CXR images is one of the main focuses of this study. In conclusion, this study aims to demonstrate how different deep learning techniques and functional structures contribute to more accurate and efficient diagnostic processes in healthcare.

The remaining sections of this paper are presented in a systematic structure. In the second section, a literature review is given, comprehensively reviewing the previous research that forms the basis of the study. In the third section, the dataset used in the study, model development, transfer learning, ViT, the proposed activation function and the proposed loss functions are explained in detail and this content is presented under the heading materials and methods. In the fourth section, the obtained findings are evaluated, their relation with the literature is discussed and the contributions of the study are discussed under the title of results and discussion. Finally, in the fifth section, general conclusions are summarized, the scientific outputs of the study are

highlighted, and suggestions for future work are presented under the conclusion heading.

LITERATURE REVIEW

Pneumonia is a disease caused by inflammation of the lungs and early diagnosis is critical. CXR are widely used to accurately diagnose pneumonia. These images play an important role in the early detection of diseases such as pneumonia by providing rapid information about the condition of the lungs. Nowadays, the use of artificial intelligence and deep learning techniques has led to a significant improvement in the analysis of CXR images. In the literature, it is emphasized that these techniques have improved the success in pneumonia classification and new methods should be explored for more effective solutions in the future.

Khan et al. [6] proposed a technique based on deep learning to distinguish COVID-19 infections from other infections. Three distinct pre-trained architectures EfficientNetB1, NasNetMobile, and MobileNetV2 were utilized for the classification of COVID-19. The training phase was conducted using an expanded dataset, and two separate learning strategies were implemented for classification. To enhance performance, not only were the models optimized, but also the hyperparameters were meticulously adjusted. Additionally, refining the classification layer further contributed to improved accuracy. The proposed approach effectively distinguished four categories—COVID-19, viral pneumonia, lung opacity, and normal—achieving an impressive accuracy rate of 96.13%.

Shelke et al. [7] proposed a classification model that analyzes CXR images for accurate diagnosis of COVID-19. The model classifies X-rays into four classes: normal, pneumonia, tuberculosis (TB), and COVID-19, and classifies COVID-19 images as mild, moderate, and severe based on severity. The VGG-16 model was used for pneumonia, TB and normal classification and 95.9% accuracy was achieved. For normal, pneumonia and COVID-19 discrimination, 98.9% accuracy was achieved using DenseNet-161, and for severity classification, ResNet-18 model performed the best and achieved 76% accuracy.

Ibrahim et al. [8] used an AlexNet-based deep learning model to classify COVID-19, bacterial pneumonia, non-COVID-19 viral pneumonia and normal CXR images. The model was evaluated under two-class, three-class, and four-class classification setups, yielding high accuracy rates. Specifically, it attained 94.43% accuracy in distinguishing non-COVID-19 viral pneumonia from normal cases, 91.43% for bacterial pneumonia versus normal, 99.16% for COVID-19 against normal, and 99.62% for COVID-19 versus bacterial pneumonia. Furthermore, the model achieved 94.00% accuracy in the three-class scenario and 93.42% in the four-class classification task.

Abbas et al. [9] proposed a deep CNN model called DeTraC to classify CXR images for the diagnosis of COVID-19. DeTraC incorporates a class decomposition

mechanism that effectively addresses irregularities in image datasets by analyzing class boundaries. Experimental findings confirmed its capability to identify COVID-19 cases using an extensive dataset compiled from multiple hospitals globally. The model achieved an accuracy of 93.1% in distinguishing COVID-19 X-ray images from normal and severe acute respiratory syndrome cases, along with a precision rate of 100%.

Gielczyk et al. [10] proposed a machine learning-based method for classifying CXR images for COVID-19 diagnosis. In addition, some preprocessing methods such as thresholding, blurring and histogram equalization were also examined. As a result of the analysis, 97%, 96% and 99% F1-scores were obtained for three classes (healthy, COVID-19 and pneumonia) respectively.

Alshmrani et al. [11] designed a deep learning architecture integrating VGG19 and CNN for multi-class classification of COVID-19, pneumonia, lung cancer, tuberculosis (TB) and lung opacity. The model was trained on a comprehensive dataset containing 3,615 COVID-19, 6,012 lung opacity, 5,870 pneumonia, 20,000 lung cancer, 1,400 tuberculosis, and 10,192 normal CXR images. The results of the experiments showed exceptional performance, with an accuracy of 96.48%, 93.75% recall, 97.56% precision, 95.62% F1-score, and an AUC of 99.82%.

Asif et al. [12] proposed an Inception V3-based Deep CNN (DCNN) model for automatic detection of COVID-19 pneumonia from CXR images. The dataset used for training included 864 COVID-19, 1,345 viral pneumonia, and 1,341 normal X-ray images. Using transfer learning, the model achieved a classification accuracy of more than 98%, with 97% training accuracy and 93% validation accuracy, demonstrating its effectiveness in detecting COVID-19 pneumonia.

Zhao et al. [13] proposed the AM_DenseNet model to classify 14 different chest diseases using X-ray images. By incorporating dense connections and attention mechanisms, the model enhanced feature extraction while mitigating class imbalance through the Focal Loss function. Experimental evaluations demonstrated its effectiveness, achieving an AUC of 0.8537 for multi-class classification.

Okolo et al. [14] developed a Transformer-based deep learning model for the classification of CXR images. Initially, the ViT model was examined, and subsequently, an improved version called Input Enhanced ViT (IEViT) was proposed to boost performance. Experimental results across four datasets showed that the IEViT model surpassed ViT, yielding up to 5.82% improvement in F1-score, a 3% increase in recall, and a 6.41% rise in precision.

Kolonne et al. [15] developed a deep learning framework based on CXR analysis to distinguish between normal cases, pneumonia and COVID-19 pneumonia. By augmenting the MobileNetV2 architecture with additional layers, the model's capacity was enhanced. The system's performance, assessed through 5-fold

cross-validation, demonstrated high reliability, achieving 98.65% accuracy and 98.15% recall.

Soud et al. [16] used a modified version of the MobileNetV2 model to detect lung abnormalities from CXR images. The model was trained on the NIH Chest X-Ray 14 dataset, where it delivered an average AUC of 0.811 and an accuracy exceeding 90%, confirming its effectiveness in medical image classification.

These studies highlight the advancements in deep learning-driven diagnostic tools for lung diseases, pneumonia, COVID-19, and other infections. The integration of sophisticated architectures not only supports fast and precise diagnoses but also facilitates early disease detection, ultimately accelerating treatment procedures.

MATERIALS AND METHODS

Dataset

CXR is an essential, widely accessible imaging technique used in diagnosing various lung conditions. It is particularly crucial for detecting respiratory infections, including pneumonia and COVID-19, enabling healthcare professionals to diagnose patients early and accurately. In this study, we utilized the publicly available CXR dataset [17], which consists of 5,840 CXR images representing both healthy individuals and those with pneumonia. This dataset was obtained from the Kaggle platform and is openly accessible for research purposes. The dataset is organized into two primary folders: train and test, each containing two subfolders labeled normal and pneumonia. All images in the dataset were pre-processed and resized to a fixed resolution of 600×600 pixels. Images are in grayscale and JPEG format. Sample images from these classes are shown in Figure 1. A detailed breakdown of the training and testing datasets can be found in Table 1.

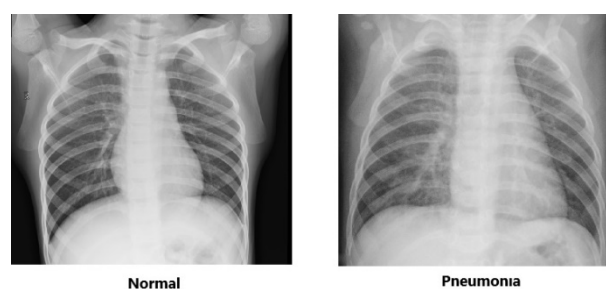


Figure 1. Example images of normal and pneumonia classes in the CXR dataset [17].

Table 1. Summary of the CXR dataset.

	Normal	Pneumonia	Total
Test	234	390	624
Train	1341	3875	5216
Total	1575	4265	5840

Table 1 shows the distribution of test and training data in the CXR dataset. There are 5840 images in total, of which 1575 are normal and 4265 are pneumonia cases. The training data contains more samples than the test data.

Model Development

Deep learning has emerged as an important tool in medical image analysis. This method automatically extracts meaningful information from complex image data, enabling fast and accurate diagnosis of diseases. At the core of deep learning lies CNN, which play an important role especially in visual recognition tasks. CNNs are highly effective in automatically classifying patterns in medical images by using convolutional layers and pooling operations to extract hierarchical features from images. In many studies, CNNs have been shown to successfully detect diseases such as pneumonia, tuberculosis and COVID-19 from CXR images and provide important support to healthcare professionals in the diagnosis process [4]. This demonstrates the benefits of deep learning-based systems, especially in emergency medicine and similar fields where rapid diagnosis is critical.

However, transfer learning plays an important role to further improve the performance of deep learning models and make them more efficient. Transfer learning allows for faster and more accurate training on smaller data sets by using pre-trained models that have been trained on large and labeled data sets (e.g. ImageNet) [5]. This increases the ability of the model to generalize to smaller data sets. In recent years, the ViT architecture has also gained an important place in the deep learning community. Unlike traditional CNNs, ViT has a transformer-based structure and excels in modeling long-range dependencies, especially on large datasets [18]. In this study, ViT-based models are used for the classification of CXR images, and the performance of the model is further improved by transfer learning and the aim is to accurately detect diseases. In this context, the combination of ViT and transfer learning offers a significant advantage over previously used CNN methods.

In this study, experiments were conducted on various deep learning architectures to classify pneumonia diseases. In the first stage, a comprehensive performance evaluation was performed on the CXR dataset using deep learning architectures such as MobileNetV2, ResNet50, VGG19, Xception and ViT. As a result of the experiments, it was observed that the VGG19 model achieved the highest accuracy. This finding led to the decision to use the VGG19 model for the rest of the study. In the second stage, the performances of ReLU, Softmax, Sigmoid, LeakyReLU activation functions as well as new activation functions developed on VGG19 were analyzed. Each function is analyzed in terms of model accuracy and learning capacity and the best performing activation function is identified. In the third

section, the performances of different loss functions (MSE, MAE, Binary Cross-Entropy and the proposed loss function) are compared in the output layer of VGG19. These steps aim to increase the applicability and efficiency of deep learning-based models in the classification of pneumonia diseases. Figure 2 presents a diagram showing the general workflow of the study. The parts marked in red indicate the methods with the most successful classification results. We continue with the models and combinations with the highest performance in the workflow.

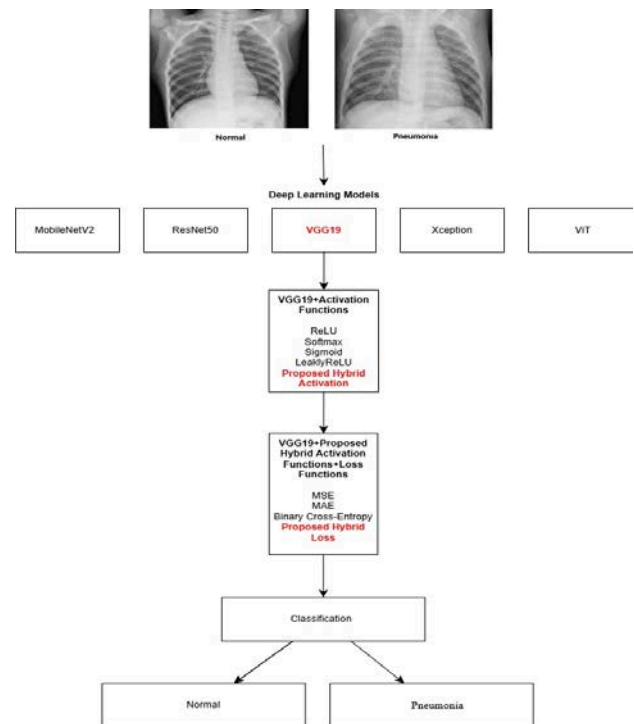


Figure 2. Workflow diagram of the presented architecture

During the training of the deep learning-based models used in this study, the underlying hyperparameters were carefully selected. In order to maximize the performance of the models during the training process, the same hyperparameters were used for each model. The hyperparameters used in the study are presented in Table 2.

Table 2. Hyperparameters used in training models.

Hyperparameters	Values
Epochs	200
Learning Rate	0.001
Batch Size	32

Optimization Method	Adam
Early Stopping	Yes, early stop on loss of validation
Dropout	0.3

Transfer Learning Models

Transfer learning enables a model to use previously learned knowledge in a new task, helping to achieve strong performances with limited data. In this study, we investigate the performance of four different models based on transfer learning: MobileNetV2, ResNet50, VGG19 and Xception.

MobileNetV2 is a lightweight model designed to work efficiently on mobile devices with low resource requirements. By using depthwise separable convolutions, it keeps performance high while reducing the number of parameters [19]. ResNet50 enables training deep networks with the residual learning principle, making it ideal for deeper and more complex networks [20]. VGG19 performs powerful feature extraction with successive convolution layers and is widely used for transfer learning [21]. Xception provides more efficient feature extraction using decomposed convolutions and provides high accuracy on large datasets [22].

Vision Transformer (ViT)

ViT is a model based on the transformers architecture, different from the traditional CNN for image processing tasks. First introduced by Dosovitskiy et al., this method processes images into fixed-size patches and converts each patch into a vector. These vectors are then passed to a transformer model, which learns local and global features from the image [18]. The success of ViT is especially evident when optimized with large data sets and powerful computational resources. Unlike traditional CNNs, the self-attention mechanism underlying ViT can model the relationships between different parts in images much more efficiently [23].

Recently, ViT has demonstrated high performance in image classification tasks, outperforming CNNs. This is mainly because transformer-based structures learn more comprehensive and flexible features based on global information. The use of ViT in areas such as medical imaging has made a huge impact, especially in applications that are considered to have limited data. For example, the ViT model has been shown to provide successful results in the diagnosis of diseases such as COVID-19 [24]. However, the challenges of ViT, such as large data requirements and training times, may require the effective use of transfer learning methods on smaller data sets. In this context, the successful applications of ViT provide a significant advancement in the field of medical imaging.

Proposed Activation Function

The activation functions used in neural networks significantly affect the learning capacity and overall performance of the network. Activation functions increase the network's ability to model nonlinear relationships, allowing for better results on complex data [25]. ReLU (Rectified Linear Unit) is a function commonly used in deep networks that allows the network to learn fast by converting sub-zero inputs to zero [26]. Sigmoid and tanh (hyperbolic tangent) functions keep the output of the model within a certain range by limiting its output; however, these functions can cause problems such as gradient disappearance [27]. The Softplus function, on the other hand, provides a linear growth similar to ReLU, but alleviates the problem of gradient fading by offering a smoother transition [28]. Each of these activation functions offers various advantages and limitations according to the different learning processes and needs of the network.

The proposed hybrid activation function is a combination that exhibits different behavior in positive and negative regions. For positive values, the Softplus function is preferred because Softplus provides a smooth transition for zero and small positive inputs and increases slowly without increasing the gradients. This feature helps to make learning stable and robust when the model has negative gradients. The mathematical representation of the Softplus activation function is presented in Equation 1.

$$\text{Softplus}(x) = \ln(1 + e^x) \quad (1)$$

For negative values, the Tanh function is used, since Tanh provides a symmetric output between -1 and 1, giving a wider range of activation for negative inputs. In this way, the model follows a stronger and more balanced learning process in negative regions. The mathematical representation of the Tanh activation function is presented in Equation 2.

$$\text{Tanh}(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (2)$$

This combination of Softplus and Tanh offers advantages in both positive and negative regions, allowing the model to learn in a more flexible and balanced way. Promoting stable learning for both small and large values, this hybrid function offers an ideal solution for adapting to larger data ranges and complex problems. The mathematical representation of the hybrid function combining Softplus and Tanh activations is presented in Equation 3.

$$f(x) = \begin{cases} \ln(1 + e^x) & \text{if } x \geq 0 \\ \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} & \text{if } x < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Proposed Loss Function

In image classification tasks, one of the most important elements that guide the learning process of the model is the loss functions. Loss functions calculate the model's errors by measuring the difference between the model's predicted values and the actual labels and ensure that these errors are minimized [29]. A loss function plays a critical role in the optimization process so that the model can classify correctly. Traditionally, among the loss functions used in classification problems, Cross-Entropy loss (CE) is widely preferred to improve the model's ability to predict the correct class [30], while methods such as contrastive loss allow the model to become more generalizable by learning the similarities and differences between images [31]. The mathematical representations of the cross-entropy loss and contrastive loss functions are presented in Equations (4) and (5) respectively.

$$L_{CE}(y, \tilde{y}) = -\sum_{i=1}^C y_i \log(\tilde{y}_i) \quad (4)$$

$$L_{contrastive} = \frac{1}{2} [y \cdot D^2(x_1, x_2) + (1 - y) \cdot \max(0, m - D(x_1, x_2))^2] \quad (5)$$

In this context, Hybrid Contrastive-CrossEntropy Loss (HCCEL) is proposed as a new loss function. HCCEL aims to optimize both class accuracy and visual similarities by combining cross-entropy loss and contrastive loss. HCCEL includes two components: First, CE improves the model's ability to predict the correct class [30]. This component aims for the model to predict the correct probability for each class. Secondly, contrastive loss (CL) helps the model learn visual similarities between images by making the model zoom in on similar images and zoom out on images belonging to different classes [31]. By combining these two components, HCCEL optimizes class accuracy and similarity-driven learning at the same time. The mathematical representation of the new hybrid activation function formed by the combination of the two loss functions is presented in Equation (6).

$$L_{HCCEL} = L_{CE} + \lambda \cdot L_{contrastive} \quad (6)$$

The parameter λ is a hyperparameter that determines the weight of the Contrastive Loss component. In the HCCEL function, this parameter balances between class

accuracy and visual similarity-based learning. The value of λ should be set so that the model both makes accurate class predictions and learns visual similarities. A high λ value increases the effect of contrastive loss, allowing the model to learn more similarities, which often helps to learn better visual representations. However, too high a λ can lead the model to neglect class accuracy. A low λ can only optimize class accuracy, with less emphasis on learning visual similarities. Therefore, the correct setting of λ is critical for the model to successfully learn both objectives.

The λ value was determined by Grid Search, a systematic hyperparameter search method. Grid Search involves trying different values of λ with fixed steps in a given range (e.g. between 0.1 and 1.0) and evaluating the model performance for each value. As a result of the comparisons, the highest accuracy was obtained at a value of 0.5.

RESULT AND DISCUSSION

CXR images are an important imaging modality often used for medical diagnosis and early detection of diseases. These images are used to visually assess the condition of the lungs, heart and other chest organs. CXR play a critical role in the diagnosis of conditions such as lung infections, cancer, heart disease and pneumonia. However, these images often contain complex structures and are difficult to interpret accurately as many diseases with similar symptoms can be visually very close to each other. Therefore, the use of artificial intelligence and deep learning methods offers great potential for detecting subtle differences in CXR images and making accurate diagnoses.

In this study, different deep learning architectures were used to classify normal and pneumonia labeled data in CXR images. These architectures include MobileNetV2, ResNet50, VGG19, Xception and ViT. In the first part of the study, the classification performance of these five different models on the dataset is comprehensively evaluated and presented in Table 3.

The model's performance is evaluated using critical metrics such as True Positive (TP), True Negative (TN), False Positive (FP), and False Negative (FN). TP refers to the number of correctly identified positive instances, TN represents the correctly classified negative cases, FP denotes instances that were incorrectly predicted as positive, and FN indicates positive samples that were incorrectly classified as negative.

Table 3. Performance metrics on the CXR dataset.

Models	True Positive	False Positive	False Negative	True Negative	Accuracy (%)	Recall (%)	Precision (%)	F1-score (%)
MobileNetV2	161	73	10	380	86.70	94.15	68.80	79.51
ResNet50	113	121	26	364	76.44	81.29	48.29	60.59
VGG19	183	51	23	367	88.14	88.83	78.21	83.18
Xception	75	159	146	244	51.12	33.94	32.05	32.97

Vit	123	111	0	390	82.21	100.00	52.56	58.91
-----	-----	-----	---	-----	-------	--------	-------	-------

These values are essential for calculating key performance metrics, including accuracy, precision, recall, and the F1-score, which provide a more nuanced evaluation of the model's performance. Accuracy represents the proportion of correctly classified instances out of all predictions. Precision measures the proportion of predicted positive cases that are truly positive, while recall assesses the model's ability to identify actual positive instances. The F1-score combines both precision and recall to give a balanced view of the model's overall predictive performance. These metrics are especially valuable when working with imbalanced datasets, ensuring a more reliable evaluation of the model's effectiveness in classification tasks [32]. The mathematical formulas for these metrics are outlined in Equations (7), (8), (9), and (10).

$$\text{Accuracy} = \frac{(TP+TN)}{(TP+TN+FP+FN)} \quad (7)$$

$$\text{Precision} = \frac{TP}{(TP + FP)} \quad (8)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{(TP + FN)} \quad (9)$$

$$\text{F1 - Score} = 2 \times \frac{\text{Precision} \times \text{Recall}}{(\text{Precision} + \text{Recall})} \quad (10)$$

In the evaluations performed on the models in Table 4, Sigmoid was used as the activation function and

binary_crossentropy as the loss function. With this combination, the classification performances of the model were evaluated and performance metrics were calculated according to the results obtained. According to the accuracy values, VGG19 achieved the highest accuracy rate with 88.14%. This model was very successful in pneumonia detection. MobileNetV2 ranked second with 86.70% accuracy, while ViT performed well with 82.21% accuracy. ResNet50 had an average performance with 76.44% accuracy, while Xception was the least successful with 51.12% accuracy. These results show that VGG19 and MobileNetV2 have the best classification performance, while Xception performs poorly with very low accuracy. The high accuracy and balanced performance of VGG19 demonstrates its effective classification ability on CXR data. Therefore, after comparisons with other models, the VGG19 architecture was chosen for more in-depth analysis and improvements.

In the second part of the study, the proposed hybrid activation function was integrated into the VGG19 model in addition to the ReLU, Softmax, Sigmoid, LeakyReLU activation functions. With this integration, the classification performance of the model is tested with different activation functions. The results obtained are presented in Table 4.

Table 4. Performance metrics of various activation functions on the VGG19 model.

Activation Functions	True Positive	False Positive	False Negative	True Negative	Accuracy (%)	Recall (%)	Precision (%)	F1-score (%)
ReLU	161	73	52	338	79.97	75.59	68.80	72.04
Softmax	177	57	32	358	85.74	84.69	75.64	79.91
Sigmoid	183	51	23	367	88.14	88.83	78.21	83.18
LeakyReLU	152	82	68	322	75.96	69.09	64.69	66.96
Proposed Hybrid	197	37	15	375	91.67	92.92	84.19	88.34

Table 4 clearly shows the differences between the classification performance of the different activation functions used on the VGG19 model. The sigmoid activation function performs the best with strong metrics such as 88.14% accuracy, 88.83% recall and 78.21% precision, indicating that the model shows high success in true positive predictions. Softmax activation ranked second with an accuracy of 85.74% and an F1 score of 79.91%, again providing a successful classification performance. The other activation functions ReLU and LeakyReLU achieved lower results with 79.97% and 75.96% accuracy respectively. These results indicate that both functions lead to more errors in classification performance and false positive predictions. The proposed hybrid activation function provides the highest

performance with 91.67% accuracy, allowing the model to outperform in all metrics. These findings reveal that the hybrid activation function offers a significant advantage, especially in terms of true positive classifications and improving the overall performance of the model. The study will continue with the hybrid activation function integrated into the VGG19 model, which yields the most successful results.

In the third part of the study, in addition to the hybrid activation function integrated into the VGG19 model, performance evaluations were performed using MSE, MAE, Binary Cross-Entropy and the proposed loss function. The performance metrics obtained with each loss function are presented in Table 5.

Table 5. Performance metrics of various loss functions on the model obtained with VGG19+proposed hybrid loss function.

Loss Functions	True Positive	False Positive	False Negative	True Negative	Accuracy (%)	Recall (%)	Precision (%)	F1-score (%)
MSE	189	45	28	362	88.30	87.10	80.77	83.81
MAE	172	62	38	352	83.97	81.90	73.50	77.48
Binary Cross-Entropy	197	37	15	375	91.67	92.92	84.19	88.34
Proposed Hybrid loss	210	24	9	381	94.71	95.89	89.74	92.72

When Table 5 is analyzed, the Proposed Hybrid loss function provides the most successful results with 94.71% accuracy. The Binary Cross-Entropy loss function ranks second with 91.67% accuracy and shows a very strong performance. The MSE loss function has a lower accuracy with 88.30% accuracy, while the MAE loss function shows the lowest accuracy with 83.97% accuracy. These results show that the Proposed Hybrid loss function is more effective than the other loss functions and provides a better overall performance in the classification task.

In conclusion, this study highlights the effectiveness of the developed hybrid activation function and the

Proposed Hybrid loss function. Both functions improve the overall classification performance of the model, leading to significant improvements in key performance metrics such as accuracy. These findings suggest that hybrid structures offer an effective approach for performance improvements in deep learning models.

The contributions of the study to the literature enrich the field by providing a new perspective to existing research. In Table 6, the findings of previous studies in this field are examined comparatively with a systematic approach and presented in detail.

Table 6. Summary of studies with CXR in the literature.

Study	Year	Dataset	Objective	Method	Accuracy (%)
Khan et al. [6]	2022	COVID-19 Radiography Database	Classifying viral pneumonia, lung opacity and normal images.	Three pre-trained models (EfficientNetB1, NasNetMobile, MobileNetV2) were used with fine-tuning on an augmented dataset.	EfficientNetB1:96.13 NasNetMobile:94.81 MobileNetV2:93.96
Shelke et al. [7]	2021	Dataset of 2271 images from Clinico Diagnostic Lab in India.	Classifying normal, pneumonia, tuberculosis and COVID-19 images.	DenseNet-161	98.9
Ibrahim et al. [33]	2024	Novel Corona Virus 2019 Dataset	To classify CXR images into four categories COVID-19, non-COVID-19 viral pneumonia, bacterial pneumonia, and normal	AlexNet	93.42
Saraiva et al. [34]	2019	CXR Dataset	Classify pneumonia and normal images	CNN model is proposed.	94.40
Gulgun and Erol [35]	2020	CXR Dataset	Classify pneumonia and normal I mages	The performance of three different models is compared: CNN model,	CNN Model: 80.4 CNN Model with Data

				CNN Applying Augmentation Technique, VGG16	Model Data	Augmentation Technique: 93.4 VGG16: 85.6
Proposed Model	2025	CXR Dataset	Classify pneumonia and normal images	The proposed VGG19 transfer learning architecture integrating activation and loss function is implemented on the original dataset.		94.71

Table 6 provides a summary of various studies that highlight the effectiveness of deep learning models in diagnosing COVID-19 and other pulmonary diseases. These studies illustrate significant advancements in CXR image classification, leveraging diverse datasets and model architectures. The findings emphasize the continuous progress in developing robust and accurate deep learning approaches for medical image analysis.

Khan et al. [6] examined EfficientNetB1, NasNetMobile and MobileNetV2 models on COVID-19 Radiography Database and reported that EfficientNetB1 model provided 96.13% accuracy rate. Shelke et al. [7], the highest success was achieved with 98.9% accuracy using the DenseNet-161 model on a dataset containing 2271 images. Ibrahim et al. [33], 93.42% accuracy was achieved using the AlexNet model.

Saraiva et al. [34], Gulgun and Erol [35] and the proposed work were performed on the same CXR dataset. Saraiva et al. [34], 94.40% accuracy was achieved with the proposed CNN model. Gulgun and Erol [35], the performances of the standard CNN model, the CNN model with data augmentation, and the VGG16 model were compared, and 80.4%, 93.4%, and 85.6% accuracy rates were obtained, respectively. In the proposed study, the VGG19 transfer learning architecture was applied with a special activation and loss function and achieved an accuracy of 94.71%. In particular, the proposed model outperformed the other methods and demonstrated that transfer learning as well as customized functions can improve the classification performance. This achievement is due to the significant impact of the combination of loss function and activation function on improving the model performance. In the proposed work, the customized activation and loss functions used in combination with the VGG19 transfer learning architecture improved the accuracy of the model to 94.71%. This combination provides an effective strategy to overcome the local minimum problems often encountered in deep learning models and enables the model to gain stronger generalization capability.

The customized loss function minimized the classification errors, while the activation functions helped the model to make more precise and accurate decisions during the learning process. This interaction enhanced the model's capacity to provide better discrimination and accuracy and played a critical role in improving the results. In conclusion, these findings show

that the combination of loss function and activation function is an important tool for optimizing the performance of deep learning models and clearly demonstrate why the proposed model is more successful than other methods.

CONCLUSION

Artificial intelligence and deep learning techniques play a crucial role in medical imaging, particularly in the early diagnosis and classification of lung diseases. This study evaluates the effectiveness of various deep learning architectures in distinguishing between normal and pneumonia-labeled CXR images. Performance analyses were conducted on multiple transfer learning models, including MobileNetV2, ResNet50, VGG19, Xception, and ViT, to compare their classification capabilities. The findings indicate that VGG19 achieved the highest accuracy (88.14%), making it the most suitable model for further exploration. In the next phase, different activation functions ReLU, Softmax, Sigmoid, and LeakyReLU along with a proposed hybrid activation function were integrated into the VGG19 model. The hybrid activation function outperformed others, enhancing the model's accuracy to 91.67%, demonstrating its effectiveness in improving classification performance. Further, various loss functions, including MSE, MAE, Binary Cross-Entropy, and the proposed hybrid loss function, were incorporated into the VGG19 model alongside the hybrid activation function. The proposed hybrid loss function yielded the best results, achieving 94.71% accuracy. These findings suggest that hybrid loss functions are more effective in classification tasks, significantly enhancing the model's overall performance and true positive detection rates.

This study shows that deep learning architectures and hybrid structures offer an effective approach to improve classification accuracy in medical imaging applications. The developed hybrid activation function and loss function combinations can be a powerful tool for accurate diagnosis and early detection by improving the classification accuracy of the model. Future work should test these hybrid structures on larger datasets and evaluate them more extensively in real-world applications. Furthermore, combinations of different deep learning architectures and loss functions can be explored to further improve the accuracy and

generalization ability of the model. However, the study also has certain limitations. The models and combinations used in the study were only evaluated on a single dataset. In addition, the models were only tested on static images, and the performance in real-time clinical settings has not yet been validated. These limitations should be addressed in future studies to better validate the robustness and clinical applicability of the proposed methods.

REFERENCES

- [1] Ruuskanen, O., Lahti, E., Jennings, L. C., & Murdoch, D. R. (2011). Viral pneumonia. *The Lancet*, 377(9773), 1264-1275.
- [2] Hammoudi, K., Benhabiles, H., Melkemi, M., Dornaika, F., Arganda-Carreras, I., Collard, D., & Scherpereel, A. (2021). Deep learning on chest X-ray images to detect and evaluate pneumonia cases at the era of COVID-19. *Journal of medical systems*, 45(7), 75.
- [3] MacMahon, H. (2003). Digital chest radiography: practical issues. *Journal of thoracic imaging*, 18(3), 138-147.
- [4] Rajpurkar, P. (2017). CheXNet: Radiologist-Level Pneumonia Detection on Chest X-Rays with Deep Learning. *ArXiv abs/1711.5225*.
- [5] Pan, S. J., & Yang, Q. (2009). A survey on transfer learning. *IEEE Transactions on knowledge and data engineering*, 22(10), 1345-1359.
- [6] Khan, E., Rehman, M. Z. U., Ahmed, F., Alfouzan, F. A., Alzahrani, N. M., & Ahmad, J. (2022). Chest X-ray classification for the detection of COVID-19 using deep learning techniques. *Sensors*, 22(3), 1211.
- [7] Shelke, A., Inamdar, M., Shah, V., Tiwari, A., Hussain, A., Chafekar, T., & Mehendale, N. (2021). Chest X-ray classification using deep learning for automated COVID-19 screening. *SN computer science*, 2(4), 300.
- [8] Ibrahim, A. U., Ozsoz, M., Serte, S., Al-Turjman, F., & Yakoi, P. S. (2024). Pneumonia classification using deep learning from chest X-ray images during COVID-19. *Cognitive computation*, 16(4), 1589-1601.
- [9] Abbas, A., Abdelsamea, M. M., & Gaber, M. M. (2021). Classification of COVID-19 in chest X-ray images using DeTraC deep convolutional neural network. *Applied Intelligence*, 51, 854-864.
- [10] Giełczyk, A., Marciniak, A., Tarczewska, M., & Lutowski, Z. (2022). Pre-processing methods in chest X-ray image classification. *Plos one*, 17(4), e0265949.
- [11] Alshmrani, G. M. M., Ni, Q., Jiang, R., Pervaiz, H., & Elshennawy, N. M. (2023). A deep learning architecture for multi-class lung diseases classification using chest X-ray (CXR) images. *Alexandria Engineering Journal*, 64, 923-935.
- [12] Asif, S., Wenhui, Y., Jin, H., & Jinhai, S. (2020, December). Classification of COVID-19 from chest X-ray images using deep convolutional neural network. In 2020 IEEE 6th international conference on computer and communications (ICCC) (pp. 426-433). IEEE.
- [13] Zhao, J., Li, M., Shi, W., Miao, Y., Jiang, Z., & Ji, B. (2021, April). A deep learning method for classification of chest X-ray images. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1848, No. 1, p. 012030). IOP Publishing.
- [14] Okolo, G. I., Katsigiannis, S., & Ramzan, N. (2022). IEViT: An enhanced vision transformer architecture for chest X-ray image classification. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 226, 107141.
- [15] Kolonne, S., Fernando, C., Kumarasinghe, H., & Meedeniya, D. (2021, December). MobileNetV2 based chest X-rays classification. In 2021 International Conference on Decision Aid Sciences and Application (DASA) (pp. 57-61). IEEE.
- [16] Souid, A., Sakli, N., & Sakli, H. (2021). Classification and predictions of lung diseases from chest x-rays using mobilenet v2. *Applied Sciences*, 11(6), 2751.
- [17] Kaggle, Available at: <https://www.kaggle.com/datasets/alifrahman/chestxraydataset/data>, Accessed: 02 December 2024.
- [18] Dosovitskiy, A., Springenberg, J. T., Riedmiller, M., & Brox, T. (2014). Discriminative unsupervised feature learning with convolutional neural networks. *Advances in neural information processing systems*, 27.
- [19] Sandler, M., Howard, A., Zhu, M., Zhmoginov, A., & Chen, L. C. (2018). Mobilenetv2: Inverted residuals and linear bottlenecks. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 4510-4520).
- [20] 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).
- [21] Simonyan, K., & Zisserman, A. (2014). Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. *arXiv preprint arXiv:1409.1556*.
- [22] Chollet, F. (2017). Xception: Deep learning with depthwise separable convolutions. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 1251-1258).
- [23] Vaswani, A. (2017). Attention is all you need. *Advances in Neural Information Processing Systems*.
- [24] Touvron, H., Cord, M., Douze, M., Massa, F., Sablayrolles, A., & Jégou, H. (2021, July). Training data-efficient image transformers & distillation through attention. In *International conference on machine learning* (pp. 10347-10357). PMLR.
- [25] Akalın, F. (2024). Survival Classification in Heart Failure Patients by Neural Network-Based Crocodile and Egyptian Plover (CEP) Optimization Algorithm. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49(3), 3897-3914.
- [26] Nair, V., & Hinton, G. E. (2010). Rectified linear units improve restricted boltzmann machines. In *Proceedings of the 27th international conference on machine learning (ICML-10)* (pp. 807-814).
- [27] Hochreiter, S. (1998). The vanishing gradient problem during learning recurrent neural nets and problem solutions. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 6(02), 107-116.
- [28] Sun, K., Yu, J., Zhang, L., & Dong, Z. (2020). A convolutional neural network model based on improved softplus activation function. In *International Conference on Applications and Techniques in Cyber Intelligence ATCI 2019: Applications and Techniques in Cyber Intelligence 7* (pp. 1326-1335). Springer International Publishing.
- [29] Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep Learning*. MIT Press.
- [30] Mao, A., Mohri, M., & Zhong, Y. (2023, July). Cross-entropy loss functions: Theoretical analysis and applications. In *International conference on Machine learning* (pp. 23803-23828). PMLR.
- [31] Hadsell, R., Chopra, S., & LeCun, Y. (2006, June). Dimensionality reduction by learning an invariant mapping. In 2006 IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition (CVPR'06) (Vol. 2, pp. 1735-1742). IEEE.
- [32] Akalın, F. (2024). Değiştirilmiş Yapay Arı Kolonisi Optimizasyon Algoritması ve İstatistiksel Modelleme ile Sentetik Veri Üretimi. *Journal of the Institute of Science & Technology/Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 14(4).
- [33] Ibrahim, A. U., Ozsoz, M., Serte, S., Al-Turjman, F., & Yakoi, P. S. (2024). Pneumonia classification using deep

learning from chest X-ray images during COVID-19. *Cognitive computation*, 16(4), 1589-1601.

- [34] Saraiva, A. A., Santos, D. B. S., Costa, N. J. C., Sousa, J. V. M., Ferreira, N. M. F., Valente, A., & Soares, S. (2019, February). Models of learning to classify X-ray images for the detection of pneumonia using neural networks. In *Bioimaging* (pp. 76-83).
- [35] Gülgün, O. D., & Erol, H. (2020). Classification performance comparisons of deep learning models in pneumonia diagnosis using chest x-ray images. *Turkish Journal of Engineering*, 4(3), 129-141.

Integrating Pretrained Deep Neural Networks with Traditional Classification Techniques for Enhanced Oral Cancer Diagnosis

Bilal ŞENOL¹, Uğur DEMİROĞLU²

¹ Department of Software Engineering, Faculty of Engineering, Aksaray University, Aksaray, Türkiye

² Department of Software Engineering, Faculty of Engineering, Architecture and Design, Kahramanmaraş İstiklal University, Kahramanmaraş, Türkiye

✉: bilal.senol@aksaray.edu.tr ¹ [0000-0002-3734-8807](https://orcid.org/0000-0002-3734-8807) ² [0000-0002-0000-8411](https://orcid.org/0000-0002-0000-8411)

Received (Geliş): 01.02.2025

Revision (Düzeltilme): 07.04.2025

Accepted (Kabul): 22.04.2025

ABSTRACT

This research aims to introduce a hybrid method for the classification of oral cancer images. This methodology integrates conventional classification techniques, including Support Vector Machines (SVM), K-Nearest Neighbors (KNN), and Decision Trees, with sophisticated feature extraction from pretrained deep neural networks, including GoogleNet and MobileNetV2. The suggested strategy collects information from deep learning models to construct a robust hybrid model that enhances diagnostic accuracy. The hybrid model attains a classification accuracy of 90.01% using Quadratic SVM, reflecting a 22.36% enhancement compared to individual deep learning models. Comparative assessments demonstrate the significant performance benefits attained by the hybrid approach. The findings underscore the possibility of integrating modern deep learning techniques with traditional methods to enhance the accuracy and reliability of medical image classification, notably in the diagnostic evaluation of oral cancer.

Keywords: Oral Cancer, Image Classification, Hybrid Model, GoogleNet, MobileNet-v2

Gelişmiş Ağız Kanseri Tanısı İçin Önceden Eğitilmiş Derin Sinir Ağlarının Geleneksel Sınıflandırma Teknikleriyle Entegre Edilmesi

ÖZ

Bu çalışma, ağız kanseri görüntülerinin sınıflandırılması için hibrit bir yöntem önermektedir. Bu yöntem, GoogleNet ve MobileNetV2 gibi önceden eğitilmiş derin sinir ağlarından sofistike özellik çıkarımı ile birlikte Destek Vektör Makineleri (SVM), K-En Yakın Komşu (KNN) ve Karar Ağaçları gibi geleneksel sınıflandırma tekniklerini birleştirir. Önerilen strateji, tanısal doğruluğu artıran sağlam bir hibrit model oluşturmak için derin öğrenme modellerinden bilgi toplar. Hibrit model, Quadratic SVM kullanarak %90.01 sınıflandırma doğruluğu elde eder ve bu, bireysel derin öğrenme modellerine kıyasla %22.36'lık bir iyileşmeyi yansıtır. Karşılaştırmalı değerlendirmeler, hibrit yaklaşımın sağladığı önemli performans avantajlarını göstermektedir. Bulgular, modern derin öğrenme tekniklerinin geleneksel yöntemlerle entegre edilmesinin, özellikle ağız kanserinin tanısal değerlendirilmesinde tıbbi görüntü sınıflandırmasının doğruluğunu ve güvenilirliğini artırma olasılığını vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Ağız Kanseri, Görüntü Sınıflandırma, Hibrit Model, GoogleNet, MobileNet-v2

GİRİŞ

Oral cancer is the atypical proliferation and dissemination of cells in any region of the mouth, including the floor of the mouth, beneath the tongue, the soft palate, the hard palate, the gums, or the lips. Oral cancer impacts individuals of all ages, races, and ethnicities. Approximately fifty-four thousand Americans will receive a diagnosis of oral or oropharyngeal cancer this year, resulting in over nine thousand fatalities. Despite treatment advances, more than half of diagnosed patients die within five years. The concerning increase in early mortality rates is chiefly

attributable to the absence of pain or symptoms in the initial stages of oral cancer. Consistent professional oral health assessments are essential and can identify alterations in oral health that may signify the onset of cancer prior to disease advancement. Public awareness of oral cancer is essential and may help reduce mortality. [2]. The prospects for treating oral cancer improve with early detection, and the likelihood of long-term survival is typically favorable. Educational interventions and the augmentation of public awareness and comprehension concerning early symptoms and hazards can influence early detection and final results [3]. Promoting and supporting community-based research aimed at reducing

morbidity and death associated with oral cancer is essential. Alongside enabling individuals to adopt preventive measures to mitigate risk, grassroots initiatives can also counter fatalism and challenge the assumption of inevitable illness among laypersons who disregard health-related communications from authorities. This information may enhance public welfare in the long term. The subsequent content sections provide an in-depth analysis of the disease, encompassing the several forms of oral cancer, their prevalence and effects, high-risk populations, and the complex etiology involved in their development [4].

Timely identification is essential, and fostering this awareness is the principal objective of oral cancer screening initiatives. Individuals want to consistently examine the following regions for indicative indicators of oral cancer: lips, neck, floor of the mouth, ventral surface of the tongue, buccal mucosa, palate, and places associated with heightened salivary secretion. Regrettably, symptoms are often erratic and unpredictable, hence patients are highly advised to familiarize themselves with their own bodies [5]. An exhaustive strategy for the early identification and treatment of oral and oropharyngeal cancer is essential for enhancing the survival rates of patients with oral cancer. Timely identification of oral cancer significantly diminishes the physical, mental, and financial burdens of the illness, along with the mortality rates linked to the disease [6, 7]. Recently, computational methods are extensively employed to diagnosis various cancer kinds via classification algorithms.

Image classification techniques have a large application in the healthcare industry. For effective treatment, it is necessary to provide a fast and accurate diagnosis. Most often, medical imaging analysis is opted for diagnosing any disease. With the introduction of big data technologies in healthcare, a huge number of medical images are recorded on a daily basis [8]. Therefore, efficient algorithms are necessary for the analysis and classification of medical images. Medical image analysis includes various methods that analyze and detect the structure within the images, while medical image classification is used for labeling and healthcare informatics. The reason for classifying the medical images is that classification is the first step in the examination process [9]. Therefore, we need to understand what is available in a current dataset. If the current image has a diagnosis of some sort, then it is easier to look for similar datasets for research. Also, having a label on the image makes it easier to look for different ways to serve a diagnosis and can be integrated with health informatics to form an automated diagnosing model [10]. With the evolution of the area of deep learning-based computer vision, there has been significant progress in building automatic classification models for a wide array of applications in engineering, computer science, and the health care field [11-13]. Advancements in healthcare have benefited significantly from the adoption of machine learning and deep learning approaches for image classification. Traditional machine

learning analysis of structured and small datasets does not fully harness the complex and high-dimensional information embedded in images. With deep learning, however, features are extracted on a learnable basis rather than predetermined, which results in better performance when dealing with high-dimensional data prevalent in imagery [14]. Especially in the healthcare field, convolutional neural networks have been effectively used to process and classify medical images and vital signals. Several researchers are currently exploring the possibilities of using convolutional neural networks to diagnose oral cancer by examining and classifying oral image data [15].

This paper aims to categorize oral cancer images utilizing pretrained deep neural networks (DNNs) with traditional classification techniques. Consequently, the benefits of DNN algorithms are integrated with the efficacy of classical approaches. The deployed pretrained deep neural networks are GoogleNet and MobileNet-v2. The feature extraction phase is conducted using these DNNs, followed by classification with several traditional classification methods. Their performances have been evaluated as the conclusion. GoogleNet, also known as Inception v1, is a convolutional neural network (CNN) architecture created by Google researchers, which achieved significant acclaim by winning the 2014 ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge (ILSVRC). The architecture incorporated the Inception module, enabling the network to record features at numerous scales within each layer by concurrently applying convolutional filters of varying sizes. This design innovation markedly enhanced accuracy and computing efficiency by optimizing parameter utilization, yielding fewer parameters than numerous deep networks of its time. The success of GoogleNet facilitated the development of succeeding models within the Inception family, each enhancing the modular design to address more intricate patterns and further augment efficiency, frequently incorporating batch normalization and other enhancements in later iterations [16].

MobileNetV2 is a streamlined and efficient deep neural network architecture created by Google in 2018, primarily designed for mobile and embedded vision applications. MobileNetV2 enhanced the original MobileNet by incorporating significant advancements that increased accuracy and computational efficiency, rendering it suitable for resource-limited settings. A significant advancement in MobileNetV2 is the implementation of inverted residuals and linear bottlenecks. Unlike conventional residual connections that transmit high-dimensional features via shortcut connections, MobileNetV2 employs a lower-dimensional (bottleneck) representation. The inverted residual structure allows MobileNetV2 to preserve extensive feature information with less parameters, hence improving both speed and accuracy. Moreover, it utilizes depthwise separable convolutions, a method that disaggregates conventional convolutions to diminish computational expenses while maintaining model efficacy. MobileNetV2 is extensively utilized in

applications necessitating real-time image processing, including object detection, facial recognition, and various on-device AI tasks, owing to its equilibrium of efficiency and performance [17].

GoogleNet and MobileNetV2 were specifically chosen for their complementary characteristics: GoogleNet offers high representational power with optimized computational complexity, while MobileNetV2 is designed for efficient inference, making it ideal for resource-constrained environments such as mobile diagnostics. These models represent two ends of the efficiency-performance trade-off, aligning with our goal to develop a scalable and robust diagnostic framework.

The literature study indicates the existence of numerous valuable studies addressing oral cancer diagnosis by categorization methodologies. For instance, [18] presents an exhaustive analysis of recent progress in dental, oral, and craniofacial imaging, highlighting the imperative of differentiating tumor-associated tissues from imaging data. The authors emphasize the application of several deep convolutional neural network (CNN) models for the automation of histological lesion grading, acknowledging that despite their potential, obstacles including insufficient training datasets impede wider implementation. Similarly, [19] highlight the urgent necessity for efficient early detection of oral cancer, especially in marginalized areas. Their research demonstrates the capability of smartphone-derived photos evaluated by deep learning to enable prompt identification of oral squamous cell carcinoma (OSCC), which represents the predominant form of oral cancer. The work in [20] elaborates on this concept by examining diverse machine learning methodologies that complement noninvasive diagnosis of oral precancer and cancer. Their findings indicate that the incorporation of AI techniques can markedly decrease diagnostic delays and enhance the precision of identifying potentially cancerous conditions. Offering an alternative perspective, [21] enhances this discourse by examining the utilization of image recognition algorithms in the detection of oral cancer. The discourse centers on the progress in computer image processing, highlighting the capacity of artificial neural networks to improve diagnostic precision while alleviating the burden on healthcare practitioners. A systematic evaluation and meta-analysis of automated classification approaches for oral possibly malignant and malignant illnesses is provided in [22]. They emphasize the capability of machine learning algorithms to function as efficient screening instruments, particularly in resource-limited environments where expert analysis may be scarce. Likewise, [23] elaborates on the significance of machine learning and deep learning in cancer diagnosis, highlighting the rapid increase in studies related to computer-aided diagnosis. The author underscores the pressing necessity for swift and precise diagnostic instruments, especially for early cancer identification, which markedly enhances survival rates. Ultimately, [24] and [25] showcase recent progress in the identification of OSCC utilizing diverse deep learning frameworks. Their

research illustrates the effectiveness of these models in precisely detecting malignant lesions from histopathological pictures and various imaging modalities, underscoring the promise of deep learning-based methods to transform oral cancer diagnostics. Table 1 lists the comparisons of the related studies.

The procedural steps of the method presented in this research are outlined as follows.

The dataset comprising photos of oral cancer was obtained from the Kaggle website [26].

- In response to "iCCP: extra compressed data" warnings received while reading certain photos in the dataset, all images were changed from JPEG to PNG format to enhance compatibility. Of the 1,231 Oral Cancer photos in the collection, 40 images (28 malignant and 12 benign) persisted in generating read errors post-conversion. The problematic photographs were eliminated from the dataset, and the remaining images advanced to the subsequent stages of the procedure.

The Oral Cancer dataset was successively trained using the GoogleNet and MobileNet-v2 deep learning models to get results. Each model was sequentially trained on the dataset, and performance parameters were documented to assess and compare their efficacy in classifying oral cancer images.

The characteristics derived from the two models were processed independently prior to the classification layer. Precisely, 1,000 features were retrieved from the loss3-classifier layer of GoogleNet and the Logits layer of MobileNet-v2. The retrieved characteristics were subsequently concatenated to create a hybrid model. This hybrid model was thereafter employed for classification using conventional classifiers, and the results were acquired to evaluate its efficacy.

The study's main contribution is the creation of a hybrid methodology that integrates the feature extraction skills of contemporary deep learning models with the classification precision of conventional machine learning techniques. Utilizing GoogleNet and MobileNetV2 as pretrained feature extractors, followed by classical classifiers such as Quadratic SVM and K-Nearest Neighbors, the method attains a notable enhancement in classification performance, with a maximum accuracy of 90.01%. The methodology exhibits computational efficiency, achieving training durations of less than three minutes for both deep learning models, and offers a thorough assessment of several classical classifiers to choose the most effective combination. The paper presents a scalable and robust diagnostic approach, appropriate for resource-constrained environments, by integrating modern deep learning technologies with conventional methodologies. This novel method increases the dependability of oral cancer diagnostics, leading to enhanced diagnostic precision and the possibility of early intervention in medical image analysis.

In this study, Section 2 details the dataset used, including its composition, preprocessing steps, and the challenges encountered during image conversion and cleaning. Section 3 focuses on the case study, describing the

training and evaluation of the deep learning models (GoogleNet and MobileNetV2), feature extraction processes, and the subsequent application of classical classifiers. Detailed training parameters, computational resources, and performance metrics are presented, accompanied by visual representations such as confusion matrices and accuracy plots. The paper concludes with a

discussion of the results, emphasizing the hybrid model's superior performance, potential applications in medical diagnostics, and avenues for future research. Supporting these sections are relevant references and technical details, ensuring the study's reproducibility and relevance.

Table 1. Comparisons of the method in this paper with some existing methods

Study	Methods Used	Dataset Details	Best Accuracy (%)	Key Contributions
This Study	GoogleNet, MobileNetV2 + Classical Classifiers (SVM, KNN)	1,231 images (Cancer/Non-Cancer)	90.01 (Quadratic SVM)	Hybrid approach combining DNNs and traditional classifiers
Lin et al., 2021 [19]	Smartphone images + Deep Learning	Smartphone images	86.5	Early detection of OSCC using accessible technology
Ren et al., 2021 [18]	CNNs for histological grading	Dental, oral, and craniofacial images	87.0	Automating histological grading of oral cancer lesions
Ferro et al., 2022 [22]	ML for point-of-care classification	Malignant disorders	89.5	Screening tools for low-resource settings
Albalawi et al., 2024 [24]	EfficientNet for histopathology	OSCC histopathological images	89.3	Accurate classification of histopathological images
Zhang et al., 2021 [21]	Image recognition techniques + ANN	Oral cancer cell images	88.6	Improved diagnostic accuracy with ANN-based techniques
Warin et al., 2022 [15]	Deep CNNs for lesion analysis	Oral lesion datasets	87.4	Novel deep learning framework for lesion detection
García-Pola et al., 2021 [20]	AI for early oral cancer diagnosis	Images of precancerous conditions	86.9	Review of AI applications for early detection
Sugeno et al., 2021 [10]	Transfer learning + image processing	Retinopathy images adapted for cancer	85.7	Simple and efficient preprocessing for transfer learning
Hunter et al., 2022 [7]	AI in cancer diagnostics	Comprehensive review	89.0	Overview of AI's role in early detection of oral cancer

MATERIALS AND METHODS

The dataset that was utilized in this investigation was a publically accessible version of an oral cancer image dataset that was obtained from Kaggle [26]. Sample images from the dataset can be seen in Figure 1. The dataset included 1,231 photos that were divided into two categories: cancer and non-cancer. While there are 654 photos that do not include any cancerous cells, there are 577 photographs that contain cancerous cells. The file size of the dataset is roughly 201 megabytes, and the photographs are saved in the JPEG format. The color depth of the images is 24 bits.

Ensuring a minimum resolution of 400×400 pixels provides sufficient detail for classification tasks. All of the photos were converted to the PNG format in order to resolve compatibility concerns and prevent "iCCP: extra compressed data" warnings from appearing while the processing was being done. Despite preprocessing, 40 images (28 cancerous, 12

non-cancerous) still caused read errors and were removed.



Figure 1. Sample images from the dataset

This resulted in a total of 1,191 images being available for training and testing purposes. Eighty percent of the photos in the dataset are used for training, while twenty percent are kept aside for testing. The dataset is divided into an 80/20 split. During the process of resizing each image to the usual dimensions of 224 by 224 pixels, the three RGB color channels are

preserved. In addition, the images are normalized in order to guarantee homogeneity and significantly enhance the performance of the model during both the training and testing phases. This dataset is highly renowned in the field of cancer research and medical imaging investigations. It serves as an invaluable resource for the development and testing of diagnostic frameworks for oral cancer.

RESULTS AND DISCUSSION

The training parameters are listed in Table 2. The network training utilized Stochastic Gradient Descent with Momentum (SGDM) as the optimization algorithm, selected for its capacity to enhance convergence speed and stability. To improve training efficiency, a stochastic solution was employed in conjunction with SGDM, while parallel computing on a GPU facilitated 16 simultaneous workers, hence expediting processing times. The primary training parameters comprised an initial learning rate of 1e-4 and shuffling at each epoch, a measure implemented to reduce overfitting. The training environment was explicitly optimized for GPU processing, fully utilizing hardware acceleration. Table 2 presents the comprehensive characteristics of the computational setup, encompassing hardware capabilities. This optimized architecture guaranteed effective resource consumption, facilitating quicker and more stable convergence during the model's training phase.

Table 2. Specifications of the computer

Processor	12th Gen Intel(R) Core™ i9-12900F 2.40 GHz
Cores, Processors	16, 24
Installed RAM	64.0 GB (63.7 GB usable)
GPU	NVIDIA RTX A4000
DirectX version	12 (FL 12.1)
GPU Memory	47.9 GB (16.0 GB Dedicated, 31.9 GB Shared)

Table 3. The progress of training of GoogleNet

Epoch	Iteration	Time Elapsed (hh:mm:ss)	Mini-batch Accuracy	Validation Accuracy	Mini-batch Loss	Validation Loss
1	1	00:00:12	50.00%	47.90%	16.274	11.974
1	15	00:00:20	56.25%	49.16%	10.379	10.030
1	30	00:00:27	68.75%	57.56%	0.7070	0.9143
1	45	00:00:34	75.00%	59.24%	0.9016	0.9249
1	50	00:00:36	68.75%			0.6000
2	60	00:00:41	75.00%	57.56%	0.3702	0.9833
2	75	00:00:48	93.75%	57.98%	0.3177	0.9708
2	90	00:00:55	68.75%	62.61%	0.5695	0.9064
2	100	00:00:59	81.25%			0.3176
2	105	00:01:03	68.75%	57.14%	0.5188	10.370
3	120	00:01:10	75.00%	67.65%	0.6118	0.8420
3	135	00:01:18	75.00%	58.82%	0.6285	0.9316
3	150	00:01:25	93.75%	63.87%	0.3028	0.8870
3	165	00:01:31	87.50%	65.97%	0.2769	0.8455
4	180	00:01:39	81.25%	63.87%	0.4493	0.8942
4	195	00:01:45	87.50%	70.17%	0.2318	0.7939
4	200	00:01:47	100.00%			0.0953

Upon completion of the training process, the GoogleNet model achieved a training accuracy of 0.6807, with the full procedure finalized in a remarkable duration of 2 minutes and 36 seconds. The short training time reflects the efficiency of the system and the optimized training settings. Figure 2 depicts the confusion matrix generated from this training phase.

True Class	cancer	95	15
	non-cancer	61	67
		cancer	non-cancer
		Predicted Class	

Figure 2. Confusion matrix of the training process of GoogleNet

The examination of the confusion matrix indicates that among the 238 test samples, there are 110 Cancer images and 128 Non-Cancer images. Out of the Cancer photos, 95 were correctly diagnosed, whilst 15 were erroneously labeled as Non-Cancer. In the Non-Cancer category, of the 128 photos, 67 were accurately predicted, highlighting certain categorization difficulties for the algorithm. Table 3 delineates essential aspects of the GoogleNet training process, encompassing variables such as iteration progression, duration per iteration, mini-batch efficacy, test accuracy, and error rates. This data offers insight into the model's learning progression, efficacy, and overall classification performance. Figure 3 illustrates the accuracy and loss progression of the GoogleNet training process. Figure 3 illustrates that the GoogleNet network attained a test accuracy of 68.07% during the training phase.

4	210	00:01:53	93.75%	68.91%	0.2183	0.8161
4	225	00:02:01	87.50%	60.08%	0.3801	0.9401
5	240	00:02:08	93.75%	69.75%	0.3743	0.8133
5	250	00:02:11	81.25%			0.4585
5	255	00:02:14	100.00%	69.75%	0.0912	0.7912
5	270	00:02:20	87.50%	65.13%	0.2370	0.8850
5	285	00:02:29	93.75%	69.33%	0.2168	0.8138
5	295	00:02:34	81.25%	68.07%	0.2710	0.8405

Simultaneously, the alternative element of the hybrid model, MobileNet-v2, achieved a training accuracy of 67.65%, concluding its training in 2 minutes and 58 seconds. This comparison underscores the performance and efficiency of each model inside the hybrid framework, illustrating their complimentary strengths in the categorization task. Figure 4 presents the confusion matrix for the training of MobileNet-v2. Figure 4's confusion matrix reveals that the 238 test samples comprise 110 Cancer images and 128 Non-Cancer images. Out of the Cancer pictures, 95 were accurately classified, whilst 14 were inaccurately

classified. Of the Non-Cancer pictures, 65 out of 128 were accurately predicted. Table 4 presents a detailed summary of the MobileNet-v2 training process, emphasizing critical parameters including iteration progress, duration per iteration, mini-batch accuracy, test accuracy, and error rates. These results offer valuable insights into model performance and training efficiency. Figure 5 illustrates the accuracy and loss progression of the MobileNet-v2 training process. Figure 5 illustrates that the test accuracy attained during the training of the MobileNet-v2 network was 67.65%.

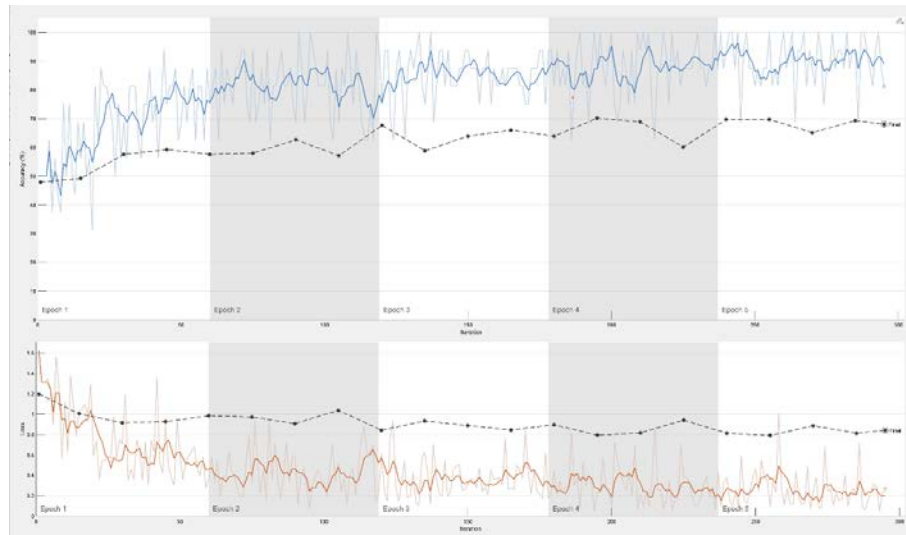


Figure 3. The accuracy and loss progress of the GoogleNet training process

Table 4. The progress of training of MobileNet-v2

Epoch	Iteration	Time Elapsed (hh:mm:ss)	Mini-batch Accuracy	Validation Accuracy	Mini-batch Loss	Validation Loss
1	1	00:00:08	50.00%	45.80%	0.9080	0.8250
1	20	00:00:17	41.67%	47.90%	0.8768	0.7863
1	40	00:00:25	50.00%	52.94%	0.6742	0.7953
1	50	00:00:29	75.00%			0.4654
1	60	00:00:34	58.33%	56.30%	0.6729	0.7571
2	80	00:00:43	75.00%	57.14%	0.5446	0.7546
2	100	00:00:50	83.33%	58.40%	0.3013	0.7855
2	120	00:00:58	75.00%	57.14%	0.5326	0.7758
2	140	00:01:08	100.00%	60.08%	0.1639	0.7769
2	150	00:01:11	75.00%			0.3534
3	160	00:01:16	91.67%	62.18%	0.2688	0.7320
3	180	00:01:26	83.33%	58.82%	0.3174	0.7914
3	200	00:01:33	91.67%	60.08%	0.3046	0.7737
3	220	00:01:41	91.67%	59.66%	0.1606	0.7311
4	240	00:01:50	83.33%	63.45%	0.3049	0.7259

4	250	00:01:53	100.00%			0.0881
4	260	00:01:58	83.33%	63.45%	0.3204	0.7721
4	280	00:02:05	91.67%	63.45%	0.2156	0.7191
4	300	00:02:13	83.33%	65.55%	0.3288	0.7382
5	320	00:02:24	83.33%	63.03%	0.3401	0.7287
5	340	00:02:32	91.67%	65.13%	0.3390	0.7053
5	350	00:02:36	83.33%			0.4437
5	360	00:02:42	100.00%	66.39%	0.2115	0.7646
5	380	00:02:49	91.67%	62.61%	0.2080	0.7314
5	395	00:02:56	75.00%	62.61%	0.5624	0.7450

The features obtained prior to the classification layers from both GoogleNet and MobileNet-v2 were subsequently utilized for classification employing conventional classifiers, including Support Vector Machine (SVM), Neural Network, K-Nearest Neighbors (KNN), Logistic Regression, Ensemble methods, Discriminant Analysis, among others. The outcomes of these categories are displayed in Table 5. Upon evaluation of the outcomes, the Quadratic SVM model achieved an accuracy of 90.01%, representing a substantial enhancement of 21.94% relative to the baseline training accuracy of GoogleNet.

Likewise, MobileNet-v2 exhibited a 22.36% enhancement in its first training accuracy, illustrating the efficacy of employing conventional classifiers on the retrieved features for improved performance. The confusion matrix derived from the Quadratic SVM model is presented in Figure 6.

True Class	cancer	96	14
	non-cancer	63	65
		cancer	non-cancer
		Predicted Class	

Figure 4. Confusion matrix of the training process of MobileNet-v2

An examination of the confusion matrix for the classical classifier with the best accuracy reveals that the dataset comprises 1,191 training and test samples, including 549 Cancer images and 642 Non-Cancer images.

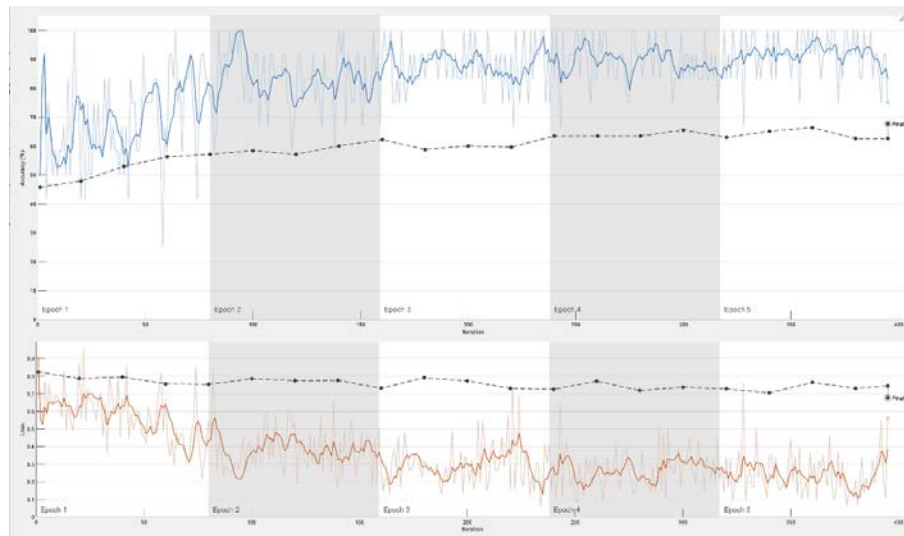


Figure 5. The accuracy and loss progress of the MobileNet-v2 training process

Table 5. Classification accuracies of the top 20 classifiers

No	Models	Sub Models	Accuracy (%)
1	SVM	Quadratic SVM	90,01%
2	SVM	Cubic SVM	89,76%
3	Kernel	SVM Kernel	89,59%
4	SVM	Medium Gaussian SVM	89,50%
5	Neural Network	Wide Neural Network	88,75%
6	KNN	Weighted KNN	88,16%
7	SVM	Linear SVM	87,99%
8	Neural Network	Medium Neural Network	87,32%
9	Efficient Linear SVM	Efficient Linear SVM	86,99%

10	Kernel	Logistic Regression Kernel	86,99%
11	Neural Network	Narrow Neural Network	86,82%
12	KNN	Cubic KNN	86,40%
13	KNN	Medium KNN	86,31%
14	Ensemble	Boosted Trees	86,23%
15	Ensemble	Bagged Trees	86,23%
16	Neural Network	Bilayered Neural Network	86,06%
17	Discriminant	Linear Discriminant	85,98%
18	SVM	Coarse Gaussian SVM	85,89%
19	Ensemble	Subspace KNN	85,89%
20	KNN	Fine KNN	85,73%

Out of the Cancer pictures, 481 were accurately predicted, whilst 68 were incorrectly identified. Out of the Non-Cancer photos, 591 were correctly classified, while 51 were erroneously classed as Cancer. These results underscore the classifier's robust capacity to differentiate between Cancer and Non-Cancer images, demonstrating its efficacy in image classification.

True Class	cancer	481	68
	non-cancer	51	591
		cancer	non-cancer
		Predicted Class	

Figure 6. Confusion matrix obtained with the Quadratic SVM model

In addition, the ROC curve obtained with the Quadratic SVM model is given in figure 7 to be informative.

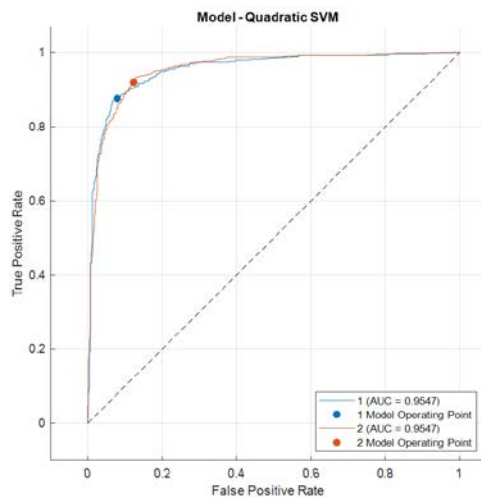


Figure 7. ROC curve obtained with the Quadratic SVM model

This study presents a hybrid methodology for classifying oral cancer photos by integrating the feature extraction proficiency of contemporary deep neural networks (GoogleNet and MobileNetV2) with

the classification precision of conventional machine learning methods. The results illustrate the efficacy of this method, attaining a notable enhancement in classification accuracy relative to independent deep learning models. The Quadratic SVM classifier attained the best accuracy of 90.01%, representing an enhancement of more than 22% compared to the baseline accuracies of GoogleNet (68.07%) and MobileNetV2 (67.65%).

Conducting a statistical analysis using additional metrics that are crucial in clinical decision-making, including sensitivity (recall), specificity, precision, F1-score, and the confusion matrix-derived rates such as false positive rate (FPR) and false negative rate (FNR) should be useful.

- Sensitivity (Recall) measures the model's ability to correctly identify positive cases (i.e., cancerous images). It is particularly important in early diagnosis to minimize the risk of missed detections.
- Specificity reflects how effectively the model avoids false alarms by correctly identifying non-cancerous cases.
- Precision indicates the reliability of positive predictions, which is critical in medical screening to reduce unnecessary interventions.
- F1-score, the harmonic mean of precision and recall, provides a balanced view when dealing with imbalanced datasets or unequal costs of misclassification.
- FPR and FNR further quantify the types of classification errors, offering insight into whether the model tends to overpredict or underpredict cancer presence.

For the Quadratic SVM classifier, which achieved the highest accuracy (90.01%), the following metrics were observed:

- **Sensitivity:** 87.61%
- **Specificity:** 92.05%
- **Precision:** 90.18%
- **F1-score:** 88.88%
- **False Positive Rate (FPR):** 7.95%
- **False Negative Rate (FNR):** 12.39%

These results indicate that the model maintains a high balance between detecting actual cancer cases and minimizing false alarms. Notably, the low FPR and high specificity demonstrate the model's robustness in reducing misclassification of healthy patients as

diseased, which is essential in screening contexts where overdiagnosis can lead to undue stress and resource burden.

Incorporating these diagnostic metrics provides a more comprehensive assessment of the model's performance and its clinical applicability. Future versions of the study will continue to integrate these evaluations to better align with the standards of evidence required in medical diagnostics.

This finding highlights the possibility of combining classical classifiers with features derived from pretrained deep neural networks, particularly in the realm of medical picture analysis. The hybrid method addresses several challenges common in deep learning-based medical diagnostics. Utilizing pretrained networks diminishes the necessity for big datasets, a significant constraint in medical imaging arising from privacy issues and the challenges of acquiring labeled data. The utilization of classical classifiers improves computational efficiency, as these models demand considerably fewer resources than end-to-end deep learning training. The proposed technique exhibits robust performance; however, specific restrictions must be recognized. The dataset included in this work, while balanced between Cancer and Non-Cancer categories, is rather small, potentially affecting the model's generalizability to varied and unobserved data. Enhancing the dataset with augmented or outside sourced photos may further elevate performance and resilience. Furthermore, the assessment relies exclusively on accuracy metrics; incorporating additional performance indicators such as sensitivity, specificity, and the area under the ROC curve (AUC) would yield a more thorough evaluation of the model's diagnostic efficacy. Future study may investigate the utilization of advanced architectures like Vision Transformers or EfficientNet to enhance feature extraction. Furthermore, the integration of explainability approaches such as Grad-CAM may yield significant insights into model predictions, enhancing confidence and transparency in clinical applications. Evaluating the hybrid model on additional medical imaging datasets would demonstrate its versatility and scalability. This study underscores the viability and promise of hybrid frameworks in enhancing the precision and efficacy of medical picture classification. The amalgamation of deep learning and conventional machine learning methodologies presents a promising avenue for the creation of dependable diagnostic instruments, especially in resource-limited settings. This technology could significantly enhance early diagnosis and treatment of oral cancer by addressing the stated limitations and broadening the research area. The suggested hybrid model, which combines pretrained deep neural networks (GoogleNet and MobileNetV2) with classical classifiers such as Quadratic SVM, attains a classification accuracy of 90.01%, reflecting a significant enhancement of more than 22% relative to the use of deep learning models

in isolation. This outcome surpasses numerous previous research in oral cancer classification. Lin et al. [19] demonstrated an accuracy of 86.5% in early oral cancer diagnosis utilizing deep learning on smartphone-based photos, whereas Ren et al. [18] attained 87.0% accuracy in histological grading employing CNN models. Ferro et al. [22] devised a machine learning classification method for malignant illnesses, attaining an accuracy of 89.5%, whereas Zhang et al. [21] utilized artificial neural networks (ANNs) for oral cancer detection, achieving an accuracy of 88.6%. In contrast to conventional methods, the hybrid technique introduced in this paper leverages deep learning for feature extraction alongside the discriminative capabilities of traditional machine learning classifiers, hence improving both accuracy and efficiency. In contrast to end-to-end deep learning models that necessitate substantial labeled datasets and significant computational resources, the proposed hybrid technique efficiently utilizes pretrained networks for feature extraction, alleviating the computational load while preserving superior diagnostic performance. Furthermore, the study's findings suggest that traditional classifiers, such as Quadratic SVM, can substantially enhance classification accuracy when utilized with features produced from deep learning, highlighting the efficacy of hybrid approaches in medical picture analysis. These findings highlight the necessity of combining contemporary deep learning techniques with conventional classification methods, presenting a promising approach to improving oral cancer diagnostics, especially in resource-limited clinical environments where computational efficiency and reliability are essential. Subsequent study may investigate the applicability of this hybrid framework to more medical imaging fields, potentially resulting in enhanced and more accessible diagnostic solutions. While this study utilized GoogleNet and MobileNetV2 for feature extraction due to their well-established performance-to-efficiency balance, it is important to acknowledge the potential of newer and more advanced deep learning architectures such as EfficientNet. EfficientNet, introduced by Tan and Le, employs a compound scaling method to balance network depth, width, and resolution, achieving state-of-the-art accuracy with significantly fewer parameters and FLOPs compared to traditional CNNs. Its scalable nature makes it particularly suitable for medical image analysis tasks, where both accuracy and computational efficiency are critical. Given these advantages, incorporating EfficientNet as a feature extractor could further enhance diagnostic performance or offer competitive results with improved resource efficiency. In future work, we plan to conduct comparative analyses involving EfficientNet, and potentially other architectures like ResNeSt and Vision Transformers, to comprehensively evaluate the robustness and adaptability of our hybrid classification framework.

Such comparisons will also help validate the generalizability of the proposed approach across different network designs and dataset characteristics. A notable limitation of this study lies in the use of a single publicly available dataset, sourced from Kaggle, which may not fully capture the variability found in real-world clinical settings. While the dataset includes a balanced distribution of cancerous and non-cancerous images, its size and demographic diversity are limited. This constraint may affect the generalizability of the proposed hybrid model, particularly when applied to different imaging environments, devices, or patient populations with varied ethnic, age, or clinical profiles. Additionally, the dataset represents a single imaging modality and lacks metadata that could help stratify results based on anatomical location, disease stage, or imaging conditions. To enhance robustness and clinical applicability, future studies should explore multi-center datasets, incorporate cross-institutional image repositories, and test the model on different imaging modalities such as histopathological slides, intraoral camera images, or fluorescence images. Moreover, analyzing performance across distinct patient subgroups can help uncover potential biases and improve the reliability of diagnostic outputs across diverse populations. Expanding the dataset scope in these ways would strengthen the model's clinical readiness and its ability to generalize across real-world scenarios.

CONCLUSIONS

This paper presents a novel hybrid method for oral cancer image detection that combines pretrained deep neural networks with traditional machine learning classifiers. The findings indicate that integrating the feature extraction abilities of GoogleNet and MobileNetV2 with conventional classifiers like Quadratic SVM significantly enhances diagnosis accuracy. This methodology effectively balances computational economy and performance, yielding solid findings in a resource-efficient manner. The proposed hybrid framework combines deep learning and traditional methods to provide an effective tool for medical image interpretation. Its relevance to a publically accessible oral cancer dataset underscores its potential as a reliable diagnostic instrument, especially in contexts with limited computational resources or restricted availability of labeled data. The results of this study facilitate the advancement of scalable diagnostic systems that can improve the early diagnosis of oral cancer. This approach improves classification accuracy and supports future integration of AI in clinical settings, aiming to enhance patient outcomes and diagnostic systems.

REFERENCES

[1] Shigeishi H. Association between human papillomavirus and oral cancer: a literature review,

- International Journal of Clinical Oncology. 28:8 982-989, 2023.
- [2] Farsi S., Gardner J.R., King D., Sunde J., Moreno M., Vural E. Head and neck cancer surveillance: The value of computed tomography and clinical exam, American Journal of Otolaryngology. 45:6 104469, 2024.
- [3] García-Pola M., Pons-Fuster E., Suárez-Fernández C., Seoane-Romero J., Romero-Méndez A., López-Jornet P. Role of artificial intelligence in the early diagnosis of oral cancer. A scoping review, Cancers. 13:18 4600, 2021.
- [4] Elmaghraby D.A., Alshalla A.A., Alyahyan A., Altaweel M., Al ben Hamad A.M., Alhunfoosh K.M., Albahrani M.A. Public knowledge, practice, and attitude regarding cancer screening: a community-based study in Saudi Arabia, International Journal of Environmental Research and Public Health. 20:2 1114, 2023.
- [5] Nagao T., Warnakulasuriya S. Screening for oral cancer: Future prospects, research and policy development for Asia, Oral Oncology. 105 104632, 2020.
- [6] Borse V., Konwar A.N., Buragohain P. Oral cancer diagnosis and perspectives in India, Sensors International. 1 100046, 2020.
- [7] Hunter B., Hindocha S., Lee R.W. The role of artificial intelligence in early cancer diagnosis, Cancers. 14:6 1524, 2022.
- [8] Cai L., Gao J., Zhao D. A review of the application of deep learning in medical image classification and segmentation, Annals of Translational Medicine. 8:11, 2020.
- [9] Yu H., Yang L.T., Zhang Q., Armstrong D., Deen M.J. Convolutional neural networks for medical image analysis: state-of-the-art, comparisons, improvement and perspectives, Neurocomputing. 444 92-110, 2021.
- [10] Sugeno A., Ishikawa Y., Ohshima T., Muramatsu R. Simple methods for the lesion detection and severity grading of diabetic retinopathy by image processing and transfer learning, Computers in Biology and Medicine. 137 104795, 2021.
- [11] Muhammad K., Khan S., Del Ser J., De Albuquerque V.H.C. Deep learning for multigrade brain tumor classification in smart healthcare systems: A prospective survey, IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 32:2 507-522, 2020.
- [12] Waring J., Lindvall C., Umeton R. Automated machine learning: Review of the state-of-the-art and opportunities for healthcare, Artificial Intelligence in Medicine. 104 101822, 2020.
- [13] Himeur Y., Elnour M., Fadli F., Meskin N., Petri I., Rezgui Y., Amira A. AI-big data analytics for building automation and management systems: a survey, actual challenges and future perspectives, Artificial Intelligence Review. 56:6 4929-5021, 2023.
- [14] Wambugu N., Chen Y., Xiao Z., Tan K., Wei M., Liu X., Li J. Hyperspectral image classification on insufficient-sample and feature learning using deep neural networks: A review, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 105 102603, 2021.
- [15] Warin K., Limprasert W., Suebnukarn S., Jinaporntham S., Jantana P., Vicharueang S. AI-based analysis of oral lesions using novel deep convolutional neural networks for early detection of oral cancer, PLOS One. 17:8 e0273508, 2022.

- [16] Chillakuru P., Madijagan M., Prashanth K.V., Ambala S., Shaker Reddy P.C., Pavan J. Enhancing wind power monitoring through motion deblurring with modified GoogleNet algorithm, *Soft Computing*. 1-11, 2023.
- [17] Dong K., Zhou C., Ruan Y., Li Y. MobileNetV2 model for image classification, 2nd International Conference on Information Technology and Computer Application (ITCA), IEEE. 476-480, 2020.
- [18] Ren R., Luo H., Su C., Yao Y., Liao W. Machine learning in dental, oral and craniofacial imaging: a review of recent progress, *PeerJ*. 9 e11451, 2021.
- [19] Lin H., Chen H., Weng L., Shao J., Lin J. Automatic detection of oral cancer in smartphone-based images using deep learning for early diagnosis, *Journal of Biomedical Optics*. 26:8 086007, 2021.
- [20] García-Pola M., Pons-Fuster E., Suárez-Fernández C., Seoane-Romero J., Romero-Méndez A., López-Jornet P. Role of artificial intelligence in the early diagnosis of oral cancer. A scoping review, *Cancers*. 13:18 4600, 2021.
- [21] Zhang H., Li W., Zhang H. An Image Recognition Framework for Oral Cancer Cells, *Journal of Healthcare Engineering*. 2021:1 2449128, 2021.
- [22] Ferro A., Kotecha S., Fan K. Machine learning in point-of-care automated classification of oral potentially malignant and malignant disorders: a systematic review and meta-analysis, *Scientific Reports*. 12:1 13797, 2022.
- [23] Bechelli S. Computer-aided cancer diagnosis via machine learning and deep learning: a comparative review, *arXiv preprint arXiv:2210.11943*, 2022.
- [24] Albalawi E., Thakur A., Ramakrishna M.T., Bhatia Khan S., Sankaranarayanan S., Almarri B., Hadi T.H. Oral squamous cell carcinoma detection using EfficientNet on histopathological images, *Frontiers in Medicine*. 10 1349336, 2024.
- [25] Warin K., Suebnukarn S. Deep learning in oral cancer—a systematic review, *BMC Oral Health*. 24:1 212, 2024.
- [26] <https://www.kaggle.com/datasets/fatmaahmedabdallah/oral-cancer-dataset>, Last Accessed on 30.10.2024

Optical soliton solutions of the higher-order nonlinear Schrödinger equation with Kerr law nonlinearity of self-phase modulation

Selvi ALTUN DURMUŞ¹

¹ Ortak Dersler Koordinatörlüğü, Mudanya Üniversitesi, Bursa, Türkiye

✉: selvi.durmus@mudanya.edu.tr  [0009-0005-2062-2872](https://orcid.org/0009-0005-2062-2872)

Received (Geliş): 10.02.2025

Revision (Düzeltilme): 18.04.2025

Accepted (Kabul): 07.05.2025

ABSTRACT

This study focuses on the higher-order nonlinear Schrödinger equation, which describes the propagation of dispersive optical pulses in fiber optics under the effects of self-phase modulation and Kerr law nonlinearity. The unified Riccati equation expansion method is used to obtain various exact soliton solutions, including dark and M-shape solitons. In addition to deriving these solutions, the research investigates the influence of higher-order dispersion terms on soliton dynamics within the model. New and significant physical characteristics arising from these effects are presented and contribute to the existing literature. The dynamic behaviors and stability of some solutions are analyzed for specific parameter values. To visualize and interpret the physical relevance of the results, 2D, 3D, and contour plots are provided. The findings demonstrate that the applied method is an effective analytical tool for addressing complex nonlinear optical systems and can be extended to a wide range of nonlinear wave equations.

Keywords: Optical Fibers, Parameter Effect, Higher Order Dispersion, Dark Soliton

Öz faz modülasyonunun Kerr Yasası formuna sahip yüksek mertebeden doğrusal olmayan Schrödinger denkleminin optik soliton çözümleri

ÖZ

Bu çalışma, öz faz modülasyonu ve Kerr yasası doğrusal olmayanlığı etkisi altındaki fiber optiklerde dağılımlı optik darbelerin yayılımını tanımlayan yüksek mertebeden doğrusal olmayan Schrödinger denklemi üzerine odaklanmaktadır. Birleştirilmiş Riccati denklem genişletme yöntemi kullanılarak, karanlık ve M-şekilli solitonlar dahil olmak üzere çeşitli analitik çözümleri elde edilmiştir. Bu çözümlerin elde edilmesinin yanı sıra, modeldeki yüksek mertebeden dağılım terimlerinin soliton dinamikleri üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Bu etkilerden kaynaklanan yeni ve önemli fiziksel özellikler sunularak literatüre katkı sağlanması hedeflenmiştir. Bazı çözümlerin dinamik davranışları ve kararlılığı, belirli parametre değerleri için analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçların fiziksel anlamını görselleştirmek ve yorumlamak amacıyla 2D, 3D ve kontur grafikler sunulmuştur. Bulgular, uygulanan yöntemin karmaşık doğrusal olmayan optik sistemleri çözmede etkili bir analitik araç olduğunu ve çok çeşitli doğrusal olmayan dalga denklemlerine uygulanabileceğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Fiber Optik, Parametre Etkisi, Yüksek Mertebeden Dağılım, Karanlık Soliton

INTRODUCTION

Differential equations have a wide range of applications in the modeling of many physical phenomena in nature, especially in the modeling of wave propagation [1-3]. The most well-known and studied one is undoubtedly the nonlinear Schrödinger equation (NLSE) [4-8]. It is a key mathematical model that expands the classical Schrödinger equation by introducing nonlinear terms, which account for interactions within the wave medium. This nonlinearity can lead to rich and complex behaviors such as solitons (stable wave packets that maintain their shape during propagation) and modulational instability, where small perturbations in the wave can grow exponentially. The NLSE is particularly important in fields such as nonlinear optics, where it describes the propagation of light through optical fibers [9,10], and in

fluid dynamics, where it models the evolution of deep-water waves. In quantum mechanics, it plays a role in understanding Bose-Einstein condensates, where particles exhibit collective quantum behaviors. The NLSE's versatility in capturing the effects of nonlinearity in various physical systems makes it an essential tool for researchers across multiple disciplines.

Studies in the literature on the NLSE that have been examined under different self-phase modulation effects are as follows: the cubic-quartic and resonant NLSE having the parabolic law media [11], the resonant NLSE under anti-cubic nonlinearity effect [12], the fractional perturbed NLSE [13], the (3+1)-dimensional and coupled NLSEs [14], the (2+1)-dimensional hyperbolic NLSE [15], the time-fractional coupled NLSE [16], an integrable NLSE with quintic terms [17], the NLSE with quintic non-Kerr nonlinear term [18], a weak fractional

NLSE with parabolic law [19], the cubic-quintic nonlinear NLSE involving an anti-cubic term [20], a NLSE with Kudryashov law of refractive index [21], the third-order stochastic NLSE with multiplicative white noise via Itô calculus [22], the third-order NLSE with power law media in the absence of chromatic dispersion [23]. This paper focuses on the following higher-order nonlinear Schrödinger equation with Kerr law of self-phase modulation [24]:

$$i\Phi_t + i\alpha_1\Phi_x + \alpha_2\Phi_{xx} + i\alpha_3\Phi_{xxx} + \alpha_4\Phi_{xxxx} + i\alpha_5\Phi_{xxxxx} + \alpha_6\Phi_{xxxxxx} + \beta|\Phi|^2\Phi = 0. \quad (1)$$

Herein, $\Phi = \Phi(x, t)$ is a complex-valued function, while $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$ and β are real-valued numbers, and $i = \sqrt{-1}$. $i\Phi_t$ indicates linear temporal evolution term. In addition, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$ represent the coefficients of inter-modal dispersion (IMD), group velocity dispersion (GVD), the third-order dispersion (3OD), the fourth-order dispersion (4OD), the fifth-order dispersion (5OD), the sixth-order dispersion (6OD) terms, respectively. Moreover, β is the coefficient of Kerr law nonlinearity of self-phase modulation term.

The higher order NLSE is an extension of the standard NLSE that incorporates additional terms to account for more complex interactions and effects. While the NLSE typically includes second-order nonlinearity, the higher-order NLSE includes higher-order nonlinear terms and higher-order dispersion terms, which provide a more accurate description of wave dynamics in various media. These higher-order terms are crucial for modeling phenomena where the simpler NLSE fails to capture essential dynamics, such as in highly nonlinear optical fibers, in plasma physics, or in systems with strong dispersive effects. The higher-order NLSE enables a deeper understanding of wave behavior, including the interaction of solitons and the emergence of complex wave structures. In addition, the sixth-order dispersion effect refers to the impact of higher-order terms on the dispersion relation on the dynamics of wave propagation described by the NLSE. In the context of the NLSE, the dispersion describes how different frequency components of a wave travel at different speeds. Although the standard NLSE includes only second-order dispersion, the sixth-order dispersion effect involves terms that account for more subtle variations in wave speed and frequency. This higher-order dispersion can influence the stability and shape of solitons, leading to more complex behavior such as modulation instability and the formation of new wave structures. In practical terms, including sixth-order dispersion effects is important for accurately modeling high-precision optical systems and other applications where standard dispersion models are insufficient.

Some higher-order NLSEs studied in the literature are as follows: the higher-order NLSE with variable

coefficients [25], the higher-order NLSE with derivative non-Kerr nonlinear terms [26], the fifth-order NLSE [27], the higher-order dispersive cubic-quintic NLSE [28], the N-coupled higher order NLSEs [29], the higher-order generalized NLSE [30], a high-order NLSE with the weak non-local nonlinearity [31], the fifth-order variable-coefficient NLSE [32], an extended NLSE with higher-order odd and even terms [33], the high-order nonlinear NLSEs with different laws of nonlinearities [34], the generalized derivative higher order NLSE [35], non-Kerr law NLSE with third and fourth order dispersions [36].

We constitute the remainder of the manuscript as follows: We tackle with the mathematical recapitulation of the higher-order NLSE including Kerr law nonlinearity in Section 2. The significant features and the implementation of the unified Riccati equation expansion method (UREEM) are compiled in Section 3. We give the Results and Discussion in Section 4 and Conclusions in Section 5.

DEFINITION AND APPLICATION OF METHOD

This section compiles the significant features of the UREEM [37].

Let us conceive the following transformation for eq. (1) as:

$$\Phi(x, t) = \Phi(\xi)e^{i(-\kappa x + \omega t + \varphi)}, \quad \xi = x - vt, \quad (2)$$

in which, κ, ω, φ , and v are real valued constants.

Besides, κ comes to mean the wave number, ω is the frequency, φ represents the phase constant, and v is the velocity.

Let's insert eq. (2) into eq. (1) and decompose into the real and imaginary parts, then we get the following equations:

$$\begin{aligned} & \alpha_6\Phi^{(6)} + (-15\kappa^2\alpha_6 + 5\kappa\alpha_5 + \alpha_4)\Phi^{(4)} \\ & + (15\kappa^4\alpha_6 - 10\kappa^3\alpha_5 - 6\kappa^2\alpha_4 + 3\kappa\alpha_3 + \alpha_2)\Phi'' \\ & - (\alpha_6\kappa^6 - \alpha_5\kappa^5 - \alpha_4\kappa^4 + \alpha_3\kappa^3 - \beta\Phi^2)\Phi \\ & - (\alpha_2\kappa^2 - \alpha_1\kappa + \omega)\Phi = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

and

$$\begin{aligned} & (\alpha_5 - 6\kappa\alpha_6)\Phi^{(5)} + (20\kappa^3\alpha_6 - 10\kappa^2\alpha_5)\Phi^{(3)} \\ & - (4\kappa\alpha_4 - \alpha_3)\Phi^{(3)} - (6\kappa^5\alpha_6 - 5\kappa^4\alpha_5)\Phi' \\ & + (4\kappa^3\alpha_4 - 3\kappa^2\alpha_3 - 2\kappa\alpha_2 - v + \alpha_1)\Phi' = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

If we integrate eq. (4) and disregard the integration constant, we attain:

$$\begin{aligned} &(-6\kappa\alpha_6 + \alpha_5)\Phi^{(4)} + (20\kappa^3\alpha_6 - 10\kappa^2\alpha_5)\Phi'' \\ &-(4\kappa\alpha_4 - \alpha_3)\Phi'' + (\alpha_1 - 6\kappa^5\alpha_6 + 5\kappa^4\alpha_5)\Phi \\ &+(4\kappa^3\alpha_4 - 3\kappa^2\alpha_3 - 2\kappa\alpha_2 - \nu)\Phi = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

From eq. (5), the following constraint conditions are generated:

$$\alpha_5 = 6\kappa\alpha_6, \quad (6)$$

$$\alpha_3 = -20\kappa^3\alpha_6 + 10\kappa^2\alpha_5 + 4\kappa\alpha_4, \quad (7)$$

$$\nu = \alpha_1 - 6\kappa^5\alpha_6 + 5\kappa^4\alpha_5 + 4\kappa^3\alpha_4 - 3\kappa^2\alpha_3 - 2\kappa\alpha_2. \quad (8)$$

Let us reorganize eq. (3) under these constraint conditions, then the ordinary differential equation (ODE) structure of eq. (1) is acquired as follows:

$$\begin{aligned} &\alpha_6\Phi^{(6)} + (15\kappa^2\alpha_6 + \alpha_4)\Phi^{(4)} - 45\kappa^4\alpha_6\Phi'' \\ &+ (\alpha_2 + 3\kappa(40\kappa^3\alpha_6 + 4\kappa\alpha_4) - 6\kappa^2\alpha_4)\Phi'' \\ &- ((40\kappa^3\alpha_6 + 4\kappa\alpha_4)\kappa^3 - \beta\Phi^2 + \alpha_2\kappa^2)\Phi \\ &+ (5\alpha_6\kappa^6 + \alpha_4\kappa^4 + \alpha_1\kappa - \omega)\Phi = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Carrying out the balance rule between the terms $\Phi^{(6)}$, Φ^3 , then we produce the balancing number as $n = 3$.

As regards the UREEM, the eq. (9) satisfies the following solution:

$$\Phi(\xi) = \sum_{i=0}^n \Gamma_i U^i(\xi), \Gamma_n \neq 0, \quad (10)$$

in which $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_n$ are real valued numbers, n is the balance constant and $U^i(\xi)$ satisfies:

$$U'(\xi) = \Lambda_0 + \Lambda_1 U(\xi) + \Lambda_2 U(\xi)^2, \Lambda_2 \neq 0, \quad (11)$$

where $\Lambda_0, \Lambda_1, \Lambda_2$ are the arbitrary real constants to be specified later. The eq. (11) has the following solutions:

- **Case I:** If $\Delta > 0$, then

$$U(\xi) = -\frac{\Lambda_1}{2\Lambda_2} - \frac{\sqrt{\Delta}}{2\Lambda_2} \tanh\left(\frac{\sqrt{\Delta}\xi}{2}\right), \quad (12)$$

$$U(\xi) = -\frac{\Lambda_1}{2\Lambda_2} - \frac{\sqrt{\Delta}}{2\Lambda_2} \coth\left(\frac{\sqrt{\Delta}\xi}{2}\right). \quad (13)$$

- **Case II:** If $\Delta = 0$, then

$$U(\xi) = -\frac{\Lambda_1}{2\Lambda_2} - \frac{1}{\Lambda_2\xi + \Psi_0}. \quad (14)$$

- **Case III:** If $\Delta < 0$, then

$$U(\xi) = -\frac{\Lambda_1}{2\Lambda_2} + \frac{\sqrt{-\Delta}}{2\Lambda_2} \tan\left(\frac{\sqrt{-\Delta}\xi}{2}\right), \quad (15)$$

$$U(\xi) = -\frac{\Lambda_1}{2\Lambda_2} - \frac{\sqrt{-\Delta}}{2\Lambda_2} \cot\left(\frac{\sqrt{-\Delta}\xi}{2}\right), \quad (16)$$

where $\Delta = \Lambda_1^2 - 4\Lambda_0\Lambda_2$, Ψ_0 and is an arbitrary constant.

Because of $n = 3$, we write eq. (10) as follows:

$$\Phi(\xi) = \Gamma_0 + \Gamma_1 U(\xi) + \Gamma_2 U^2(\xi) + \Gamma_3 U^3(\xi), \quad (17)$$

in which $\Gamma_3 \neq 0$. Combination of eqs. (17), (11), (9) produces the following algebraic equation system:

U^0 coefficient:

$$\begin{aligned} &16\Lambda_2\alpha_6(17\Gamma_2\Lambda_2 + 90\Gamma_3\Lambda_1)\Lambda_0^4 + (584\alpha_6\Lambda_1^2\Lambda_2\Gamma_2)\Lambda_0^3 \\ &+ (((540\kappa^2\Gamma_3 + 136\Gamma_1\Lambda_2^2)\alpha_6 + 36\alpha_4\Gamma_3)\Lambda_1)\Lambda_0^3 \\ &+ (16\Lambda_2\Gamma_2\Omega_1 + 540\alpha_6\Lambda_1^3\Gamma_3)\Lambda_0^3 + (52\alpha_6\Lambda_1^3\Lambda_2\Gamma_1)\Lambda_0^2 \\ &+ (62\alpha_6\Lambda_1^4\Gamma_2 + 8\Lambda_2\Gamma_1\Omega_1\Lambda_1 + 14\Gamma_2\Omega_1\Lambda_1^2 + 2\Gamma_2\Omega_2)\Lambda_0^2 \\ &+ \Gamma_1(\alpha_6\Lambda_1^4 + \Omega_1\Lambda_1^2 + \Omega_2)\Lambda_1\Lambda_0 - (35\alpha_6\kappa^6 + 3\alpha_4\kappa^4)\Gamma_0 \\ &+ (\beta\Gamma_0^2 - \alpha_2\kappa^2 + \alpha_1\kappa - \omega)\Gamma_0 = 0. \end{aligned}$$

U^1 coefficient:

$$\begin{aligned} &3696\Gamma_3\Lambda_0^4\Lambda_2^2\alpha_6 + 8(34\alpha_6\Lambda_2^2\Gamma_1)\Lambda_2\Lambda_0^3 \\ &(45\alpha_6\Lambda_1\Lambda_2\Gamma_2 + 1344\alpha_6\Lambda_1^2\Gamma_3 + 15\Gamma_3\Omega_1)\Lambda_2\Lambda_0^3 \\ &+ (\alpha_1\kappa - \omega)\Gamma_1 + (1806\alpha_6\Lambda_1^4\Gamma_3 + 2352\alpha_6\Lambda_1^3\Lambda_2\Gamma_2)\Lambda_0^2 \\ &+ ((720\alpha_6\Lambda_2^2\Gamma_1 + 150\Gamma_3\Omega_1)\Lambda_1^2 + 120\Lambda_2\Gamma_2\Omega_1\Lambda_1)\Lambda_0^2 \\ &+ (16\Lambda_2^2\Omega_1\Gamma_1 + 6\Omega_2\Gamma_3)\Lambda_0^2 + (-35\alpha_6\kappa^6 + \alpha_6\Lambda_1^6)\Gamma_1 \\ &- (3\alpha_4\kappa^4 - \Omega_1\Lambda_1^4 - 3\beta\Gamma_0^2 + \alpha_2\kappa^2 - \Omega_2\Lambda_1^2)\Gamma_1 \\ &+ (114\alpha_6\Lambda_1^4\Lambda_2\Gamma_1 + 126\alpha_6\Lambda_1^5\Gamma_2 + 22\Lambda_2\Gamma_1\Omega_1\Lambda_1^2)\Lambda_0 \\ &(30\Gamma_2\Omega_1\Lambda_1^3 + 2\Gamma_1\Omega_2\Lambda_2 + 6\Gamma_2\Omega_2\Lambda_1)\Lambda_0 = 0. \end{aligned}$$

U^2 coefficient:

$$\begin{aligned}
 &64\alpha_6\Gamma_2\Lambda_1^6 + 21(3\Gamma_1\Lambda_2 + 95\Lambda_0\Gamma_3)\alpha_6\Lambda_1^5 \\
 &+ 8\Gamma_2(30\kappa^2\alpha_6 + 387\Lambda_0\Lambda_2\alpha_6 + 2\alpha_4)\Lambda_1^4 \\
 &+ (1176\alpha_6\Lambda_0\Lambda_2^2\Gamma_1 + 195\Lambda_0\Gamma_3\Omega_1)\Lambda_1^3 \\
 &+ (26880\alpha_6\Lambda_0^2\Gamma_3 + 15\Gamma_1\Omega_1)\Lambda_2\Lambda_1^3 + 3\Gamma_0\beta\Gamma_1^2 \\
 &+ 4\Gamma_2(3330\alpha_6\Lambda_0^2\Lambda_2^2 + 58\Omega_1\Lambda_0\Lambda_2 + \Omega_2)\Lambda_1^2 \\
 &+ 3968\alpha_6\Gamma_2\Lambda_0^3\Lambda_2^3 + 136\Lambda_0^2\Gamma_2\Omega_1\Lambda_2^2 \\
 &+ (60\Lambda_0(574\alpha_6\Lambda_0^2\Gamma_3 + \Gamma_1\Omega_1)\Lambda_2^2)\Lambda_1 \\
 &+ (660\Gamma_3\Omega_1\Lambda_0^2 + 3\Gamma_1\Omega_2)\Lambda_1\Lambda_2 + 1848\alpha_6\Lambda_0^2\Lambda_2^3\Lambda_1\Gamma_1 \\
 &+ (-35\alpha_6\kappa^6 - 3\alpha_4\kappa^4 + 3\beta\Gamma_0^2 - \alpha_2\kappa^2 + \alpha_1\kappa - \omega)\Gamma_2 \\
 &+ 15\Lambda_0\Omega_2\Gamma_3\Lambda_1 + 8\Gamma_2\Lambda_0\Omega_2\Lambda_2 = 0.
 \end{aligned}$$

U^3 coefficient:

$$\begin{aligned}
 &1232\Gamma_1\Lambda_0^2\Lambda_2^4\alpha_6 + 8\Lambda_0(448\Gamma_1\Lambda_1^2\alpha_6 + \Lambda_2^3) \\
 &+ (2870\Gamma_2\Lambda_0\Lambda_1\alpha_6 + 3366\Gamma_3\Lambda_0^2\alpha_6 + 5\Gamma_1\Omega_1)\Lambda_2^3 \\
 &+ (602\alpha_6\Lambda_1^4\Gamma_1 + 17920\alpha_6\Lambda_0\Lambda_1^3\Gamma_2)\Lambda_2^2 \\
 &+ 729\Gamma_3\Lambda_1^6\alpha_6 + 81\Gamma_3\Omega_1\Lambda_1^4 + 9\Omega_2\Lambda_1^2 \\
 &+ (+576\Gamma_3\Omega_1\Lambda_2^2 + 2\Gamma_1\Omega_2)\Lambda_2^2 \\
 &+ ((101520\Gamma_3\Lambda_0^2\alpha_6 + 50\Gamma_1\Omega_1)\Lambda_1^2 + 440\Gamma_2\Lambda_0\Omega_1\Lambda_1)\Lambda_2^2 \\
 &+ (1330\Gamma_2\Lambda_1^5\alpha_6 + 27666\Gamma_3\Lambda_0\Lambda_1^4\alpha_6 + 130\Gamma_2\Omega_1\Lambda_1^3)\Lambda_2 \\
 &+ (+1062\Gamma_3\Omega_1\Lambda_0\Lambda_1^2 + 10\Gamma_2\Omega_2\Lambda_1)\Lambda_2 \\
 &+ (-35\kappa^6\alpha_6 - 3\kappa^4\alpha_4 + 3\beta\Gamma_0^2 - \kappa^2\alpha_2 + \kappa\alpha_1 - \omega)\Gamma_3 \\
 &+ 18\Gamma_3\Omega_2\Lambda_0\Lambda_2 + 6\beta\Gamma_0\Gamma_1\Gamma_2 + \beta\Gamma_1^3 = 0.
 \end{aligned}$$

U^4 coefficient:

$$\begin{aligned}
 &168\alpha_6\Lambda_0(25\Gamma_1\Lambda_1 + 72\Gamma_2\Lambda_0)\Lambda_2^4 + 2100\Gamma_1\alpha_6\Lambda_1^3\Lambda_2^3 \\
 &+ 40152\Gamma_2\alpha_6\Lambda_0\Lambda_1^2\Lambda_2^3 + 240\Gamma_2\Omega_1\Lambda_0\Lambda_2^3 \\
 &+ (((900\kappa^2\Gamma_1 + 138936\Gamma_3\Lambda_0^2)\alpha_6 + 60\Gamma_1\alpha_4)\Lambda_1)\Lambda_2^3 \\
 &+ (8106\Gamma_2\Lambda_1^4\alpha_6 + 119532\Gamma_3\Lambda_0\Lambda_1^3\alpha_6 + 330\Gamma_2\Omega_1\Lambda_1^2)\Lambda_2^2 \\
 &+ (1680\Gamma_3\Omega_1\Lambda_0\Lambda_1 + 6\Gamma_2\Omega_2)\Lambda_2^2 + 21\Gamma_3(481\Lambda_1^4\alpha_6)\Lambda_1\Lambda_2 \\
 &+ 21\Gamma_3(\Omega_1\Lambda_1^2 + \Omega_2)\Lambda_1\Lambda_2 + 3\beta(2\Gamma_0\Gamma_1\Gamma_3 + \Gamma_0\Gamma_2^2 + \Gamma_1^2\Gamma_2) = 0.
 \end{aligned}$$

U^5 coefficient:

$$\begin{aligned}
 &+ (62832\Gamma_3\Lambda_0^2\alpha_6 + 24\Gamma_1\alpha_4)\Lambda_2^4 \\
 &+ ((360\kappa^2\Gamma_1 + 3360\Gamma_1\Lambda_1^2 + 38640\Lambda_0\Gamma_2\Lambda_1)\alpha_6)\Lambda_2^4 \\
 &+ (48\Lambda_0((255\kappa^2 + 4648\Lambda_1^2)\alpha_6 + 17\alpha_4)\Gamma_3)\Lambda_2^3 \\
 &+ 336((15\kappa^2 + 65\Lambda_1^2)\alpha_6 + \alpha_4)\Gamma_2\Lambda_1\Lambda_2^3 + 12\alpha_2\Gamma_3\Lambda_2^2 \\
 &+ 12((75\kappa^4 + 1455\Lambda_1^2\kappa^2 + 4081\Lambda_1^4)\alpha_6)\Gamma_3\Lambda_2^2 \\
 &+ (+97\Lambda_1^2\alpha_4 + 6\kappa^2\alpha_4)\Gamma_3\Lambda_2^2 + 1680\Gamma_1\Lambda_0\Lambda_2^5\alpha_6 \\
 &+ 3\beta((2\Gamma_0\Gamma_2 + \Gamma_1^2)\Gamma_3 + \Gamma_1\Gamma_2^2) = 0.
 \end{aligned}$$

U^6 coefficient:

$$\begin{aligned}
 &840(3\Gamma_1\Lambda_1 + 16\Gamma_2\Lambda_0)\alpha_6\Lambda_2^5 + (+120\Gamma_2\alpha_4)\Lambda_2^4 \\
 &+ (1800\kappa^2\Gamma_2 + 29400\Gamma_2\Lambda_1^2 + 189000\Lambda_0\Gamma_3\Lambda_1)\alpha_6\Lambda_2^4 \\
 &+ 1080\Gamma_3(15(\kappa^2 + 7\Lambda_1^2)\alpha_6 + \alpha_4)\Lambda_1\Lambda_2^3 \\
 &+ (3\Gamma_0\Gamma_3^2 + 6\Gamma_1\Gamma_2\Gamma_3 + \Gamma_2^3)\beta = 0.
 \end{aligned}$$

U^7 coefficient:

$$\begin{aligned}
 &720\Gamma_1\Lambda_2^6\alpha_6 + 720(27\Gamma_2\Lambda_1 + 83\Lambda_0\Gamma_3)\alpha_6\Lambda_2^5 \\
 &+ 360(5(3\kappa^2 + 76\Lambda_1^2)\alpha_6 + \alpha_4)\Gamma_3\Lambda_2^4 \\
 &+ 3\beta\Gamma_3(\Gamma_1\Gamma_3 + \Gamma_2^2) = 0.
 \end{aligned}$$

U^8 coefficient:

$$(5040\Gamma_2\Lambda_2^6 + 83160\Lambda_1\Lambda_2^5\Gamma_3)\alpha_6 + 3\beta\Gamma_2\Gamma_3^2 = 0.$$

U^9 coefficient:

$$20160\Lambda_2^6\alpha_6 + \beta\Gamma_3^2 = 0.$$

Herein,

$$\Omega_1 = 15\kappa^2\alpha_6 + \alpha_4,$$

$$\Omega_2 = 75\kappa^4\alpha_6 + 6\kappa^2\alpha_4 + \alpha_2\$.$$

Let us solve the above system, then we obtain the following sets and the corresponding solutions:

$$Set_1 : \left\{ \begin{array}{l} \omega = \frac{K_1 + K_2 - 21818\kappa^2\alpha_6\alpha_4^2}{571787\alpha_6^2}, \\ \alpha_2 = \frac{K_3}{6889\alpha_6}, \Gamma_3 = \Gamma_3, \\ \Lambda_2 = \frac{15\kappa^2\alpha_6 + 83\Lambda_1^2\alpha_6 + \alpha_4}{332\Lambda_0\alpha_6}, \\ \beta = -\frac{315(15\kappa^2\alpha_6 + 83\Lambda_1^2\alpha_6 + \alpha_4)^6}{20924183895616\alpha_6^5\Lambda_0^6\Gamma_3^2}, \\ \Gamma_0 = \frac{55112\Lambda_1\Gamma_3K_4\Lambda_0^3\alpha_6^2}{(15\kappa^2\alpha_6 + 83\Lambda_1^2\alpha_6 + \alpha_4)^3}, \\ \Gamma_1 = \frac{996\alpha_6\Lambda_0^2\Lambda_3}{15\kappa^2\alpha_6 + 83\Lambda_1^2\alpha_6 + \alpha_4}, \\ \Gamma_2 = \frac{498\Lambda_1\Gamma_3\Lambda_0\alpha_6}{15\kappa^2\alpha_6 + 83\Lambda_1^2\alpha_6 + \alpha_4} \end{array} \right\} \quad (18)$$

where,

$$\begin{aligned} K_1 &= 9457430\kappa^6\alpha_6^3 + 210321\kappa^4\alpha_4\alpha_6^2 \\ K_2 &= 571787\kappa\alpha_1\alpha_6^2 + 1260\alpha_4^3 \\ K_3 &= -303825\kappa^4\alpha_6^2 - 12954\kappa^2\alpha_6\alpha_4 + 946\alpha_4^2 \\ K_4 &= 45\kappa^2\alpha_6 + 83\Lambda_1^2\alpha_6 + 3\alpha_4. \end{aligned}$$

$$Set_2 : \left\{ \begin{array}{l} \omega = \frac{K_5 - K_6}{441\alpha_6}, \Lambda_1 = \frac{\sqrt{K_7}}{21\alpha_6}, \Gamma_3 = \Gamma_3 \\ \alpha_4 = -15\kappa^2\alpha_6, \beta = -\frac{20160\Lambda_2^6\alpha_6}{\Gamma_3^2}, \\ \Gamma_0 = \frac{\Lambda_0\sqrt{21(84\Lambda_0\Lambda_2\alpha_6^2 - \alpha_6\Omega_3)}\Gamma_3}{42\alpha_6\Lambda_2^2}, \\ \Gamma_1 = -\frac{(-126\Lambda_0\alpha_6\Lambda_2 + \Omega_3)\Gamma_3}{42\alpha_6\Lambda_2^2}, \\ \Gamma_2 = \frac{\sqrt{21(84\Lambda_0\Lambda_2\alpha_6^2 - \alpha_6\Omega_3)}\Gamma_3}{14\Lambda_2\alpha_6} \end{array} \right\} \quad (19)$$

in which,

$$\begin{aligned} K_5 &= 4410\alpha_6^2\kappa^6 + 300\Omega_3\kappa^4\alpha_6, \\ K_6 &= 441\alpha_2\kappa^2\alpha_6 - 441\alpha_1\kappa\alpha_6 + 20\alpha_2\Omega_3 \\ K_7 &= 21(84\Lambda_0\Lambda_2\alpha_6^2 - \alpha_6\Omega_3), \\ \Omega_3 &= \sqrt{315\kappa^4\alpha_6^2 - 21\alpha_2\alpha_6}. \end{aligned}$$

Regarding eq. (18) with eqs. (2),(12)-(16), (17), we get the solutions of eq. (1) as follow:

$$\Phi_{1,1}(x,t) = (\Gamma_0 + H_1\Gamma_1 + H_1^2\Gamma_2 + H_1^3\Gamma_3)e^{i\theta}, \quad (20)$$

$$\Phi_{1,2}(x,t) = (\Gamma_0 + H_2\Gamma_1 + H_2^2\Gamma_2 + H_2^3\Gamma_3)e^{i\theta}, \quad (21)$$

in which,

$$\begin{aligned} H_1 &= -\frac{\Lambda_1}{2\Lambda_2} - \frac{\sqrt{\Delta}}{2\Lambda_2} \tanh\left(\frac{\sqrt{\Delta}(x-vt)}{2}\right), \\ H_2 &= -\frac{\Lambda_1}{2\Lambda_2} - \frac{\sqrt{\Delta}}{2\Lambda_2} \coth\left(\frac{\sqrt{\Delta}(x-vt)}{2}\right), \Delta > 0. \end{aligned}$$

$$\Phi_{1,3}(x,t) = (\Gamma_0 + H_3\Gamma_1 + H_3^2\Gamma_2 + H_3^3\Gamma_3)e^{i\theta}, \quad (22)$$

where,

$$H_3 = -\frac{\Lambda_1}{2\Lambda_2} - \frac{1}{\Lambda_2(x-vt) + \Psi_0}, \Delta = 0.$$

$$\Phi_{1,4}(x,t) = (\Gamma_0 + H_4\Gamma_1 + H_4^2\Gamma_2 + H_4^3\Gamma_3)e^{i\theta}, \quad (23)$$

$$\Phi_{1,5}(x,t) = (\Gamma_0 + H_5\Gamma_1 + H_5^2\Gamma_2 + H_5^3\Gamma_3)e^{i\theta}. \quad (24)$$

Herein,

$$\begin{aligned} H_4 &= -\frac{\Lambda_1}{2\Lambda_2} + \frac{\sqrt{-\Delta}}{2\Lambda_2} \tan\left(\frac{\sqrt{-\Delta}(x-vt)}{2}\right), \\ H_5 &= -\frac{\Lambda_1}{2\Lambda_2} - \frac{\sqrt{-\Delta}}{2\Lambda_2} \cot\left(\frac{\sqrt{-\Delta}(x-vt)}{2}\right), \Delta < 0. \end{aligned}$$

Besides, $\omega, \Lambda_1, \Lambda_2, \Gamma_0, \Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$ and v are given in eqs. (18), (19), (8).

RESULTS AND DISCUSSION

In this article, we have suggested the UREEM which is an efficient approach among existing techniques, and we have successfully generated many soliton solutions for higher-order NLSE with Kerr law media. We have given the graphics of the acquired solutions in the figures. Using suitable values of the parameters, we have presented four figures to demonstrate the attitude of the solutions. In these figures, a variety of graphs of some solutions are presented. Moreover, fig. (1) and fig. (3) involves nine sub-figures and fig. (2) and fig. (4) includes three sub-figures.

In fig. (1), we present a variety of plots of the solution $\Phi_{1,1}(x,t)$ in eq. (20) for Set_1 and $a_1 = 0.45$, $a_4 = -2.8$, $a_6 = 2.2$, $\kappa = -0.1$, $\chi = 0.98$, $\Lambda_0 = 1.3$, $\Lambda_1 = 1.2$, $\varphi = -0.65$, $\Gamma_3 = 2.1$. Figures (1a), (1c), (1e) are a 3D representation of $|\Phi_{1,1}(x,t)|^2$, $Im(\Phi_{1,1}(x,t))$, and $Re(\Phi_{1,1}(x,t))$, respectively. Figure (1a) represents a dark soliton. Finally, figs. (1b), (1d), (1f) are a 2D representation of $|\Phi_{1,1}(x,t)|^2$, $Im(\Phi_{1,1}(x,t))$, and $Re(\Phi_{1,1}(x,t))$, respectively. If we

look at the fig. (1b) carefully, we can see that the dark soliton's character tends to move to the right in response to increasing values of t ($t = 1, 3, 5, 7, 9$).

In fig. (2), we give 2D graphs of $|\Phi_{1,1}(x, t)|^2$ to observe the effects of higher-order dispersion coefficient parameters on the character and shape of the obtained dark soliton.

Figure (2a) shows that under the influence of increasing negative and positive values of a_1 ($a_1 = -3, -2, -1, 1, 2, 3$), there is no change in the size and shape of the dark soliton, but the soliton only tends to move to the right. Here, a_1 comes to mean the coefficient of the inter-modal dispersion term. If we examine fig. (2b), for positive values of a_4 , the dark soliton character is deformed, while for increasing negative values ($a_4 = -6, -5, -4, -3, -2, -1$), the soliton does not move to the right or left, but its length shortens and its width increases. Here, a_4 stands for the coefficient of the 4OD term. Similarly, if we examine fig. (2c), for negative values of a_6 , the dark soliton character is deformed, while for increasing positive values ($a_6 = 1.0, 1.4, 1.8, 2.2, 2.6, 3.0$), the soliton does not move to the right or left, but its length shortens and its width increases. Here, a_6 expresses the coefficient of the 6OD term. The point to be noted here is that if we compare it with the effect of a_4 , the change in the form of the soliton occurs faster with the effect of a_6 .

In fig. (3), we present a variety of plots of the solution $\Phi_{1,2}(x, t)$ in eq. (21) for Set_2 and $a_1 = 0.45$, $a_2 = 2.8$, $a_6 = -2.2$, $\kappa = 0.1$, $\chi = 0.98$, $\Lambda_0 = 1.3$, $\Lambda_1 = 1.2$, $\varphi = -0.65$, $\Gamma_3 = 2.1$. Figures (3a), (3c), (3e) are a 3D representation of $|\Phi_{1,2}(x, t)|^2$, $Im(\Phi_{1,2}(x, t))$ and $Re(\Phi_{1,2}(x, t))$, respectively. Figures (3a) represents a M-shape soliton. Finally, figures (3b), (3d), (3f) are a 2D representation of $|\Phi_{1,2}(x, t)|^2$, $Im(\Phi_{1,2}(x, t))$ and $Re(\Phi_{1,2}(x, t))$, respectively. If we look at the fig. (3b) carefully, we can see that the M-shape soliton's character tends to move to the left in response to increasing values of t ($t = 1, 5, 9$).

In fig. (4), we give 2D graphs of $|\Phi_{1,2}(x, t)|^2$ to observe the effects of higher-order dispersion coefficient parameters on the character and shape of the obtained M-

shape soliton. Figure (4a) shows that under the influence of increasing negative and positive values of a_1 ($a_1 = -1, 1, 2$), there is no change in the size and shape of the dark soliton, but the soliton only tends to move to the right. What we can understand from fig. (4b) is that, despite the increasing positive values of a_2 ($a_2 = 1, 2, 3$), the soliton does not move to the right or left on the x-axis, its width decreases, and its length increases. Here, a_2 indicates the coefficient of the GVD term. Similarly, we can understand from fig. (4c) that, despite the increasing negative values of a_6 ($a_6 = -3, -2, -1$), the soliton does not move to the right or left on the x-axis, but its width decreases and its length increases.

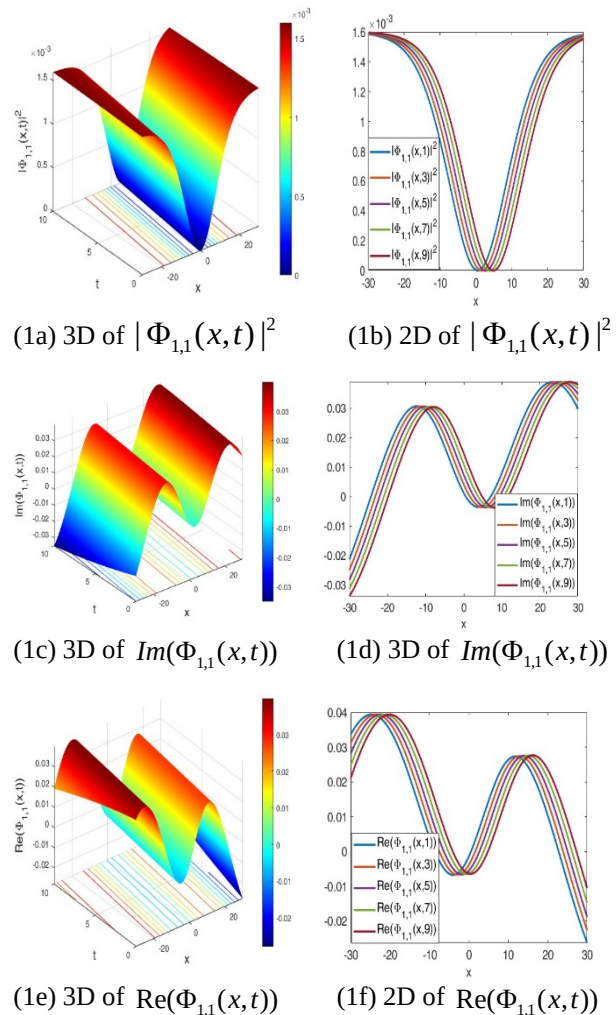
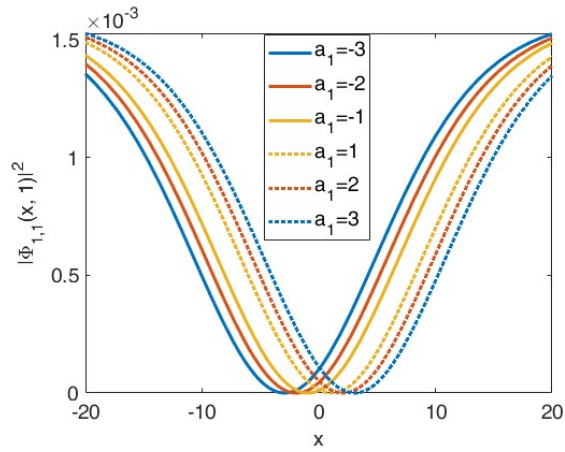
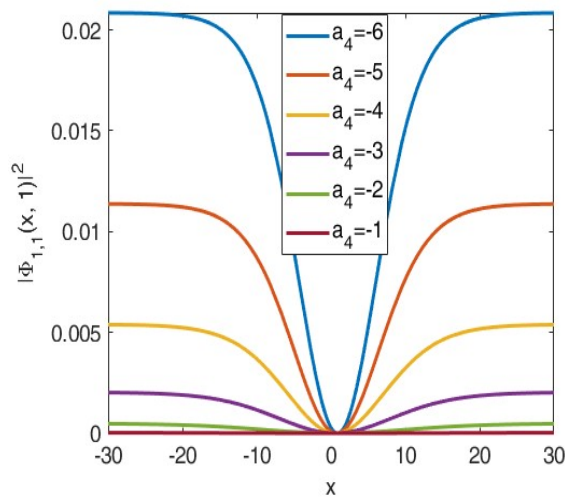


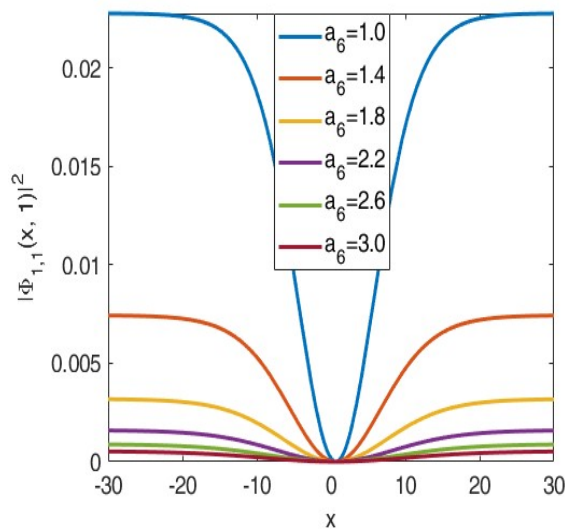
Figure 1. Some graphical representations of $\Phi_{1,1}(x, t)$ in eq. (20) for Set_1 and appropriate parameters.



(2a) $|\Phi_{1,1}(x, t)|^2$ in 2D for various a_1

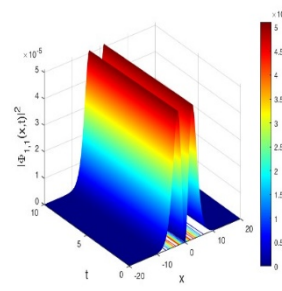


(2b) $|\Phi_{1,1}(x, t)|^2$ in 2D for various a_4

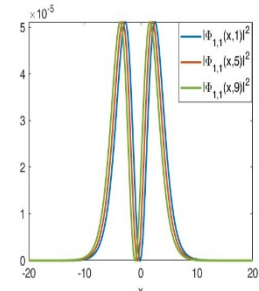


(2c) $|\Phi_{1,1}(x, t)|^2$ in 2D for various a_6

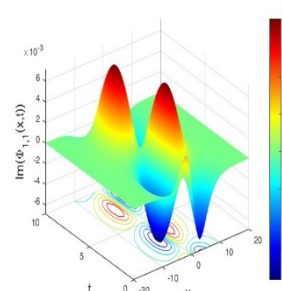
Figure 2. Some graphics of $|\Phi_{1,1}(x, t)|^2$ under the effect of a_1, a_4, a_6 .



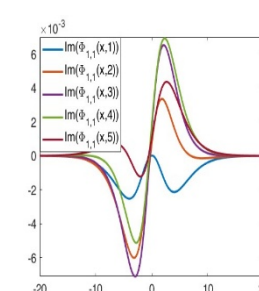
(3a) 3D of $|\Phi_{1,2}(x, t)|^2$



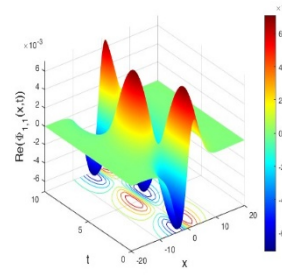
(3b) 2D of $|\Phi_{1,2}(x, t)|^2$



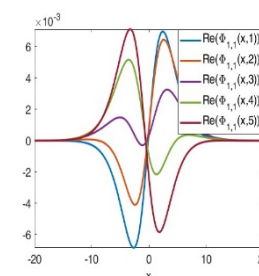
(3c) 3D of $Im(\Phi_{1,2}(x, t))$



(3d) 2D of $Im(\Phi_{1,2}(x, t))$

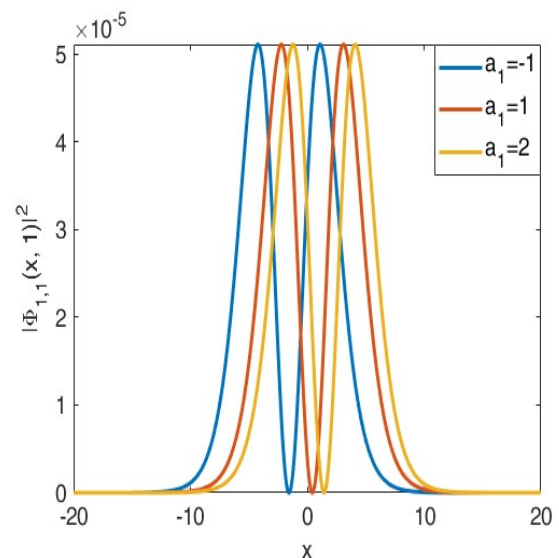


(3e) 3D of $Re(\Phi_{1,2}(x, t))$



(3f) 2D of $Re(\Phi_{1,2}(x, t))$

Figure 3. Various diagrams of $\Phi_{1,2}(x, t)$ in eq. (21) for Set_2 and appropriate parameters.



(4a) $|\Phi_{1,2}(x, t)|^2$ in 2D for various a_1

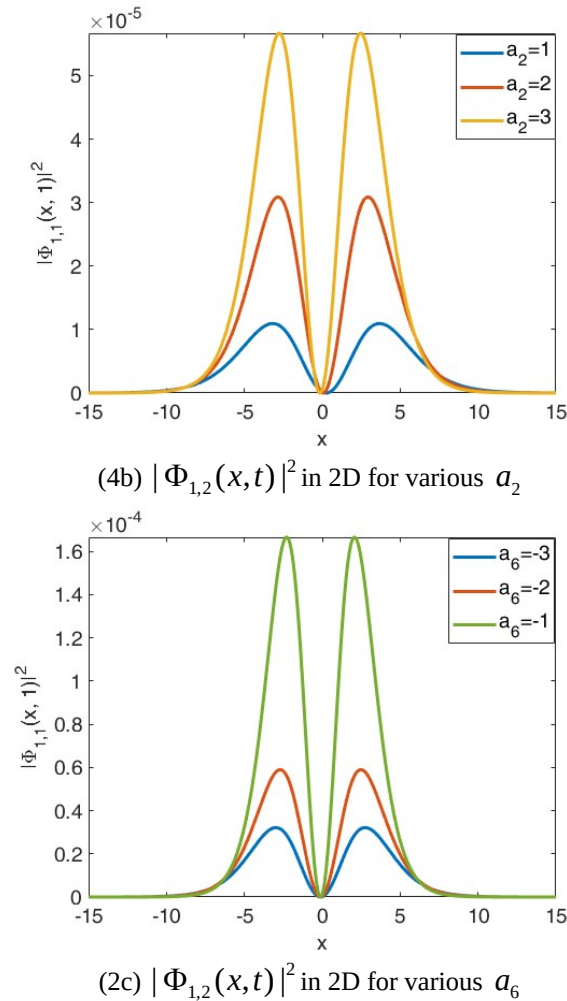


Figure 4. Some plots of $|\Phi_{1,2}(x, t)|^2$ under the effect of a_1, a_2, a_6 .

CONCLUSION

In this article, the higher-order NLSE with Kerr law nonlinearity is studied. To obtain some of the analytical solutions of this complex nonlinear equation, the UREEM is used. In addition, all acquired soliton solutions that ensure the corresponding equation under consideration are accomplished generated for this model. To indicate the attitude of the obtained soliton solutions, we demonstrate some 3D and 2D plots through appropriate parameter values. 2D graphs are also given to observe the physical effect of the higher order dispersion terms in the equation. Thus, the effect of these model parameters on the shape, size, speed, and displacement of the obtained solitons is more easily examined. In addition, it can be said that the dispersion and different refractive index added to the classical NLSE make significant contributions to the equation and increase the diversity and richness of the solitons obtained. As a result, it can be resolved that the recommended technique is a strong mathematical method for complex nonlinear models.

REFERENCES

- [1] Akgül A., Baleanu D., On solutions of variable-order fractional differential equations, *An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications (IJOCTA)*, 7 (1), 112–116, 2017. Lee J.H., Lee J.M., Kim H.J., Moon Y. S. Machine vision system for automatic inspection of bridges, *Congress on Image and Signal Processing (CISP)*. 3 363-366, 2008.
- [2] Özisik Ö., Akbarov S., Rayleigh-wave propagation in a half-plane covered with a prestressed layer under complete and incomplete interfacial contact, *Mechanics of Composite Materials*, 39, 177–182, 2003.
- [3] Akbarov S., Mehdiyev M., Özisik M., Three-dimensional dynamics of the moving load acting on the interior of the hollow cylinder surrounded by the elastic medium, *Structural Engineering and Mechanics*, 67 (2), 185–206, 2018.
- [4] Kudryashov N.A., Method for finding optical solitons of generalized nonlinear Schrödinger equations, *Optik*, 261, 169163, 2022.
- [5] Ghanbari B., Baleanu D., Applications of two novel techniques in finding optical soliton solutions of modified nonlinear Schrödinger equations, *Results in Physics*, 44, 106171, 2023.
- [6] Rezazadeh H., Ullah N., Akinyemi L., Shah A., Mirhosseini-Alizamin S. M., Chu Y.-M., Ahmad H., Optical soliton solutions of the generalized non-autonomous nonlinear Schrödinger equations by the new Kudryashov's method, *Results in Physics*, 24, 104179, 2021.
- [7] Islam S. R., Arafat S. Y., Alotaibi H., Inc M., Some optical soliton solutions with bifurcation analysis of the paraxial nonlinear Schrödinger equation, *Optical and Quantum Electronics*, 56 (3), 379, 2024.
- [8] Gu . N., Aminakbari N., New optical soliton solutions for the variable coefficients nonlinear Schrödinger equation, *Optical and Quantum Electronics*, 54 (4), 255, 2022.
- [9] Ahmad J., Akram S., Noor K., Nadeem M., Bucur A., Alsayaad Y., Soliton solutions of fractional extended nonlinear Schrödinger equation arising in plasma physics and nonlinear optical fiber, *Scientific Reports*, 13 (1), 10877, 2023.
- [10] Younas U., Sulaiman T. A., Ren J., On the study of optical soliton solutions to the three-component coupled nonlinear Schrödinger equation: applications in fiber optics, *Optical and Quantum Electronics*, 55 (1), 72, 2023.
- [11] Gao W., Ismael H. F., Husien A. M., Bulut H., Baskonus H. M., Optical soliton solutions of the cubic-quartic nonlinear Schrödinger and resonant nonlinear Schrödinger equation with the parabolic law, *Applied Sciences*, 10 (1), 219, 2019.
- [12] Awan A., Rehman H., Tahir M., Ramzan M., Optical soliton solutions for resonant Schrödinger equation with anti-cubic nonlinearity, *Optik*, 227, 165496, 2021.
- [13] Ali K. K., Karakoç S. B. G., Rezazadeh H., Optical soliton solutions of the fractional perturbed nonlinear Schrödinger equation, *TWMS Journal of Applied and Engineering Mathematics*, 2020.
- [14] Inan E., Inc M., Rezazadeh H., Akinyemi L., Optical solitons of (3+1) dimensional and coupled nonlinear Schrödinger equations, *Optical and Quantum Electronics*, 54 (4), 261, 2022.
- [15] Zayed E., Al-Nowehy A.-G., Exact solutions and optical soliton solutions for the (2+1)-dimensional hyperbolic nonlinear Schrödinger equation, *Optik*, 127 (12), 4970–4983, 2016.
- [16] Okposo N. I., Veerasha P., Okposo E. N., Solutions for time-fractional coupled nonlinear Schrödinger equations arising in optical solitons, *Chinese Journal of Physics*, 77, 965–984, 2022.

- [17] Chowdury A., Kedziora D., Ankiewicz A., Akhmediev N., Soliton solutions of an integrable nonlinear Schrödinger equation with quintic terms, *Physical Review E*, 90 (3), 032922, 2014.
- [18] Zhang K., Han T., The optical soliton solutions of nonlinear Schrödinger equation with quintic non-Kerr nonlinear term, *Results in Physics*, 48, 106397, 2023.
- [19] Rizvi S., Seadawy A. R., Younis M., Iqbal S., Althobaiti S., El-Shehawi A. M., Various optical soliton for a weak fractional nonlinear Schrödinger equation with parabolic law, *Results in Physics*, 23, 103998, 2021.
- [20] Kaplan M., Hosseini K., Samadani F., Raza N., Optical soliton solutions of the cubic-quintic nonlinear Schrödinger's equation including an anti-cubic term, *Journal of Modern Optics*, 65 (12), 1431–1436, 2018.
- [21] Rizvi S. T., Seadawy A. R., Akram U., New dispersive optical soliton for a nonlinear Schrödinger equation with Kudryashov law of refractive index along with P-test, *Optical and Quantum Electronics*, 54 (5), 310, 2022.
- [22] Altun Durmuş S., Optical soliton solutions of stochastic the third-order nonlinear Schrödinger equation with multiplicative white noise via Itô calculus, *Optical and Quantum Electronics*, 56 (5), 779, 2024.
- [23] Durmuş S. A., Ozdemir N., Secer A., Ozisik M., Bayram M., Bright soliton of the third-order nonlinear Schrödinger equation with power law of self-phase modulation in the absence of chromatic dispersion, *Optical and Quantum Electronics*, 56 (5), 794, 2024.
- [24] Biswas A., Ekici M., Sonmezoglu A., Belic M. R., Highly dispersive optical solitons with Kerr law nonlinearity by F-expansion, *Optik*, 181, 1028–1038, 2019.
- [25] Zhang J., Yang Q., Dai C., Optical quasi-soliton solutions for higher-order nonlinear Schrödinger equation with variable coefficients, *Optics Communications*, 248 (1-3), 257–265, 2005.
- [26] Tang L., Optical solitons and traveling wave solutions for the higher-order nonlinear Schrödinger equation with derivative non-Kerr nonlinear terms, *Optik*, 271, 170115, 2022.
- [27] Ma G., Zhao J., Zhou Q., Biswas A., Liu W., Soliton interaction control through dispersion and nonlinear effects for the fifth-order nonlinear Schrödinger equation, *Nonlinear Dynamics*, 106, 2479–2484, 2021.
- [28] Inc M., Yusuf A., Aliyu A. I., Baleanu D., Optical soliton solutions for the higher-order dispersive cubic-quintic nonlinear Schrödinger equation, *Superlattices and Microstructures*, 112, 164–179, 2017.
- [29] Nakkeeran K., Porsezian K., Sundaram P. S., Mahalingam A., Optical solitons in N-coupled higher order nonlinear Schrödinger equations, *Physical Review Letters*, 80 (7), 1425, 1998.
- [30] Guo R., Hao H.-Q., Breathers and multi-soliton solutions for the higher-order generalized nonlinear Schrödinger equation, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 18 (9), 2426–2435, 2013.
- [31] Hosseini K., Sadri K., Mirzazadeh M., Chu Y., Ahmadian A., Pansera B., Salahshour S., A high-order nonlinear Schrödinger equation with the weak non-local nonlinearity and its optical solitons, *Results in Physics*, 23, 104035, 2021.
- [32] Yang C., Liu W., Zhou Q., Mihalache D., Malomed B. A., One-soliton shaping and two-soliton interaction in the fifth-order variable-coefficient nonlinear Schrödinger equation, *Nonlinear Dynamics*, 95, 369–380, 2019.
- [33] Triki H., Choudhuri A., Porsezian K., Dinda P. T., Dark solitons in an extended nonlinear Schrödinger equation with higher-order odd and even terms, *Optik*, 164, 661–670, 2018.
- [34] Hosseini K., Matinfar M., Mirzazadeh M., Soliton solutions of high-order nonlinear Schrödinger equations with different laws of nonlinearities, *Regular and Chaotic Dynamics*, 26, 105–112, 2021.
- [35] Seadawy A. R., Modulation instability analysis for the generalized derivative higher order nonlinear Schrödinger equation and its the bright and dark soliton solutions, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 31(14), 1353–1362, 2017.
- [36] Nawaz B., Ali K., Abbas S. O., Rizvi S. T. R., Zhou Q., Optical solitons for non-Kerr law nonlinear Schrödinger equation with third and fourth order dispersions, *Chinese Journal of Physics*, 60, 133–140, 2019.
- [37] Sirendaoreji, Unified Riccati equation expansion method and its application to two new classes of Benjamin-Bona-Mahony equations, *Nonlinear Dynamics*, 89, 333–344, 2017.

Analytical Validation of the Malatya Dominating Set Algorithm: Constructing Optimal Dominating Sets Without Redundant Nodes

Şeyda KARCI¹, Fatih OKUMUŞ²

¹ Department of Computer Engineering, Faculty of Technology, Marmara University, Istanbul, Türkiye

² Department of Software Engineering, Faculty of Engineering, Inonu University, Malatya, Türkiye

✉: fatih.okumus@inonu.edu.tr  [0000-0001-8489-7828](https://orcid.org/0000-0001-8489-7828)  [0000-0003-3046-9558](https://orcid.org/0000-0003-3046-9558)

Received (Geliş): 20.02.2025

Revision (Düzeltilme): 19.03.2025

Accepted (Kabul): 14.04.2025

ABSTRACT

We revisit the Malatya Dominating Set Algorithm (MDSA) to examine its structure from a theoretical standpoint. Although earlier applications—combining centrality with greedy and dynamic programming—produced promising results, those outcomes lacked formal analysis. In this study, we show that MDSA yields near-optimal solutions on several graph types, including paths, cycles, stars, and bipartite graphs. We explore how MDSA selects nodes and the role centrality plays in that process. In practice, the algorithm often skips over nodes with low relevance, which helps produce smaller and more efficient sets. This observation supports earlier empirical findings, and it also helps explain the reasoning behind the algorithm's behavior. Our interest is not only in confirming its performance but also in gaining a clearer view of how and why it works. The results show that MDSA compares well with other methods for structured graphs where identifying minimal dominating sets is essential.

Keywords: Dominating Sets, Malatya Centrality Value, Malatya Dominating Set Algorithm, Greedy Algorithms, Dynamic Programming, Theoretical Proof

Malatya Hakim Küme Algoritmasının Analitik Doğrulaması: Artık Düzgünler Olmadan Optimal Hakim Kümelerin Oluşturulması

ÖZ

Bu çalışmada, Malatya Hâkim Küme Algoritması (MDSA) teorik açıdan yeniden ele alınmaktadır. Merkezilik temelli yaklaşımları ağırlıklı ve dinamik programlama yöntemleriyle birleştiren algoritma, önceki çalışmalarda çeşitli veri kümeleri üzerinde başarılı sonuçlar üretmiş olsa da bu başarıların ardında güçlü bir teorik temel bulunmamaktadır. Bu kapsamda, MDSA'nın yol, döngü, yıldız ve iki taraflı çizgeler gibi belirli çizge türlerinde optimale yakın çözümler üretebildiği gösterilmiştir. Algoritmanın düğüm seçim süreci ve merkezilik hesaplamalarının bu sürece etkisi ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Uygulama sonuçları, önemsiz düğümlerin elenmesiyle daha küçük ve verimli hâkim kümeler elde edildiğini göstermektedir. Bu bulgular, önceki deneysel sonuçlarla örtüşmekte ve algoritmanın karar mekanizmasını açıklamaya yardımcı olmaktadır. Bu çalışma yalnızca algoritmanın başarımını doğrulamakla kalmayıp, aynı zamanda bu başarımın arkasındaki temel ilkeleri de ortaya koymaktadır. Sonuçlar, MDSA'nın yapılandırılmış çizgelerde hâkim küme belirleme problemleri için etkili bir seçenek olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Hâkim Kümeler, Malatya Merkezilik Değeri, Malatya Hâkim Küme Algoritması, Ağırlıklı Algoritmalar, Dinamik Programlama, Teorik İspat

INTRODUCTION

Mathematical modeling to solve real-world problems is a fundamental approach in many engineering and scientific fields. Graph theory is a structure used in such modeling techniques for many optimization problems [1], [2]. There are many graph application areas such as social networks, computer networks, biological interaction networks, transportation, wireless networks, text mining, text summarization, network flows, circuit connections, molecular simulations, connection networks, etc. [3], [4], [5], [6]. As an NP-hard problem, the Minimum Dominating Set (MDS) problem holds a significant position in graph theory. This problem aims

to find the smallest subset of nodes in a graph such that every node is connected to at least one dominant node, provided that the number of elements in the dominating set is minimal [7]. The MDS problem plays an important role in optimizing network structures by increasing efficiency in various areas. In communication networks, the use of MDS enables the selection of key relay nodes and the optimization of transmission load [8], [9]. In social network analysis, there are studies that apply MDS in determining effective nodes that control information dissemination [10], [11], [12], [13]. In biological networks, MDS is one of the methods used in modeling basic protein interactions and disease spread [14], [15], [16]. For the problem of node placement optimization in

sensor networks, in cases requiring full coverage, the minimum number of sensor nodes can be determined using MDS [17], [18], [19]. However, the fact that the solution of this problem is NP-hard necessitates the development of efficient algorithms in large-scale graphs. In the literature, various methods such as approximation algorithms, greedy algorithms, heuristic and meta-heuristic methods, and linear programming-based solutions (integer linear programming - ILP) have been proposed. However, the vast majority of these methods either failed to reach the exact optimum solution or had high computational costs [8], [20].

Malatya Dominating Set Algorithm (MDSA), which we introduced in our previous study [21], offers a new method that optimizes the MDS determination process using the MC Values. In 2023, Yakut and colleagues introduced Malatya Centralization, which was subsequently applied to solve maximal independent set problems for simple graphs [22]. For the best matching in bipartite graphs, Öztemiz employed the MC algorithm [23]. The MDSA algorithm takes this centrality system to a further stage and introduces the second centrality concept. In our practices, we have seen that the solution of the minimum dominating set problem using classical centrality values creates limited effects. In the minimum dominating set problem, the "Second Layer Centrality Influence Area" philosophy was created based on the fact that the influence area of a node should be calculated together with the secondary neighborhoods. This philosophy led to the emergence of the Second Malatya Centrality concept. We show empirically in our previous study that MDSA performs effectively on large-scale graphs [21]. Nevertheless, this method requires theoretical validation and analytical demonstration of its best solutions for specific graph types.

The aim of this study is to strengthen the theoretical foundations of MDSA and to mathematically prove that it produces optimal/near-optimal solutions for some special graph structures. The study seeks answers to the following questions:

- i. How can it be proven that the MDSA algorithm is optimal for certain types of graphs?
- ii. What is the mathematical effect of the MC Value in the minimum dominating set selection process?
- iii. How can the theoretical correctness of the MDSA process of eliminating unnecessary nodes be demonstrated?

By answering the above questions, this article aims to support the experimental successes of MDSA with analytical evidence and to demonstrate that this method has a theoretically solid basis.

MALATYA DOMINATING SET ALGORITHM

The Malatya centrality (MC) value was defined by Yakut and his friends [22] for the first time, and this centrality value was called as the "First Malatya Centrality" (FMC) value. This value can be obtained by using Algorithm 1. The main principle to define the FMC value: "The relative strength of an entity within a community is

determined by the strength of its neighbors". Yakut and his friends to solve many graph theory problems utilized this idea.

Definition 1 (First Malatya Centrality): Let $G = (V, E)$ be a simple graph with $\forall u \in V$, where $N(u)$ is the collection of u 's neighbor nodes other than itself. The summation of node degree of u over its neighbors' node degrees is called the "First Malatya Centrality Value", and it is denoted as $\Psi_1(\dots)$ (Eq. 1).

The FMC value computed by using the ratio of corresponding node degree to its neighbors' degrees as shown in Eq. 1.

$$\Psi_1(u) = \left(\sum_{\forall v_j \in N(u)} \frac{d(u)}{d(v_j)} \right) \frac{d_{active}(u)}{d(u)} \quad (1)$$

$$= \frac{d_{active}(u)}{d(u)} \sum_{\forall v_j \in N(u)} \frac{d(u)}{d(v_j)}$$

Algorithm 1. Computing of the FMC Value

Input: A is adjacency matrix of $G = (V, E)$

Output: Ψ_1

- 1 Initialize Ψ_1 as an empty array of size $|V|$.
- 2 for each vertex $v_i \in V$:
- 3 if $d(v_i) \neq 0$ compute:
- 4 $\Psi_1(u) = \frac{d_{active}(u)}{d(u)} \sum_{\forall v_j \in N(u)} \frac{d(u)}{d(v_j)}$
- 5 return Ψ_1

In Algorithm 1, input A is adjacency matrix of Graph. The elements of adjacency matrix are initialized as: $[p(x)] = 1$ if $p(x)$ is true, otherwise $[p(x)] = 0$. $d(v_i)$ is degree of the node (how many neighbors it has). $d_{active}(v_i)$ is active node degree (whether the connections are active or not depending on certain conditions). $N(v_i)$ is neighborhood set (other nodes that the node is directly connected to). Finally, $\Psi_1(v_i)$ is the MC Value (a decisive metric for MDS).

We defined the Second Malatya Centrality (SMC) value for the first time and they used it to obtain the minimum dominating set for the given graph [21]. The idea/paradigm used in this study is "The relative strength of an entity within a community is determined by the relative strength of its neighbors". The second MC value definition is given in Definition 2 as defined in [21].

Definition 2 (Second Malatya Centrality): Assume that $G = (V, E)$ is a simple graph, and $\forall u \in V$, where $N(u)$ is the set of neighbor nodes of u except itself. The summation of node relative strength (FMC value) of u over its neighbors' node relative strength (FMC values) is called the "Second Malatya Centrality Value" (SMC).

This value is denoted as $\Psi_1(\dots)$ and can be calculated with Eq.2.

$$\Psi_2(v_i) = \left(\sum_{\forall v_j \in N(v_i)} \frac{\Psi_1(v_i)}{\Psi_1(v_j)} \right) \frac{1}{d(v_i)} \frac{d_{active}(v_i)}{d(v_i)} \quad (2)$$

$$= \frac{1}{d(v_i)} \frac{d_{active}(v_i)}{d(v_i)} \sum_{\forall v_j \in N(v_i)} \frac{\Psi_1(v_i)}{\Psi_1(v_j)}$$

The SMC value is quite suitable for the nature of the dominant set problem since the coverage area can extend to the tertiary neighborhood (another dominant node). The algorithm of the SMC values starts with getting the FMC values, and continue with new centrality values from FMC values. This computation steps shown in Algorithm 2.

Algorithm 2. Computing of the SMC Value

Inputs:

$A \leftarrow$ Adjacency matrix of graph $G = (V, E)$

$\Psi_1 \leftarrow$ FMC Value

Output: Ψ_2

- 1 Compute Ψ_1 using "Algorithm 1".
- 2 Initialize Ψ_2 as an empty array of size $|V|$.
- 3 for each vertex $v_i \in V$:
- 4 if $d(v_i) \neq 0$ compute:
- 5 $\Psi_2(u) = \frac{1}{d(v_i)} \frac{d_{active}(v_i)}{d(v_i)} \sum_{\forall v_j \in N(v_i)} \frac{\Psi_1(v_i)}{\Psi_1(v_j)}$
- 6 return Ψ_2

Node Selection Strategy: All of the nodes in the provided graph are initially designated as white nodes. The node with the highest centrality value is chosen following the computation of the graph's SMC values. All of its neighbors are designated as gray nodes, and this node is added to the minimum dominating set. Centrality values are then computed once more. The node with the highest centrality value among the white nodes is identified. The node with the highest value is identified among the grey nodes. The selection of the grey node occurs if its centrality value exceeds the white node's maximum centrality value and if its number of neighbors is at least two times bigger than the white node's. The white node is chosen in the alternative scenario. This process is repeated until there are no white nodes left in the graph. Thus, it is ensured that all nodes are covered under a minimum dominating set. This situation is demonstrated by Algorithm 3.

Algorithm 3. Overall Minimum Dominating Set Algorithm

Inputs:

$A \leftarrow$ Adjacency matrix of graph $G = (V, E)$

Output: $V_D \subseteq V$, V_D is optimal minimum dominating set

- 1 Initialize all nodes v_i with color 0 (white), indicating they are unprocessed.
- 2 while at least one white node remains:
- 3 Compute Ψ_2 using "Algorithm 2"
- 4 $u = \text{argmax}\{\Psi_2(v)\}$
- 5 Mark u as a dominating node (color = 2, black).
- 6 $V_D = V_D \cup u$
- 7 Mark all neighbors of u as covered (color = 1, grey).
- 8 Update adjacency matrix A to remove connections involving u :
- 9 $A(u, k) \leftarrow 0$ and $A(k, u) \leftarrow 0$ for all k in $N(u)$.
- 10 If any neighbor r of u has degree = 1, remove its connections: $A(r, k) \leftarrow 0$ and $A(k, r) \leftarrow 0$
- 11 Eliminate redundant nodes
- 12 Return V_D

Principle 1: An entity's strength ought to be measured in relation to the strength of its neighbors within its community (Fig.1).

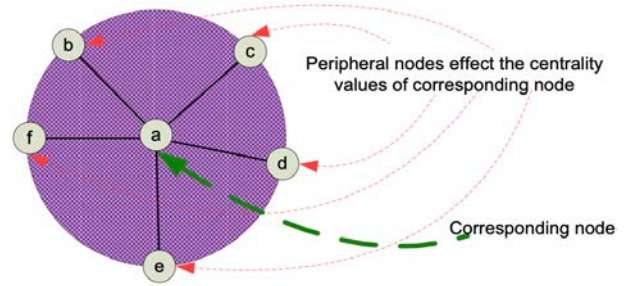


Figure 1. The central is the node whose centrality value is subject to computation. The peripheral nodes are used to compute the first centrality values.

The power of a node is proportional to the powers of that node relative to its neighbors. The MC value of node 'a' is computed by using its degree and its neighbors' degrees. We called this concept as First Layer Centrality Effect Region. In literature, Jiang and Zheng defined a new graph for the given graph, and they called it as 2-hop graph [24]. Assume that, $G = (V, E)$ is a graph and the corresponding 2-hop graph is:

$$G^2 = (V, E_2) \quad (3)$$

$$E_2 = \{(u, v) | (u, v) \in E \text{ or } N(u) \cap N(v) \neq \emptyset\} \quad (4)$$

Two nodes u and v are adjacent in G^2 if and only if u and v are 2-hop adjacent in G . G^2 is called the 2-hop graph of G . The similar logic or philosophy was used in Malatya Dominating Set Algorithm, and due to this case, this algorithm is an effective algorithm. In Fig.1, the aim is to compute the FMC value of node "a". So that the degree of node "a" is over the degrees of nodes "b", "c", "d", "e", "f". The summation of these ratios give the FMC value of node "a" (Fig.1).

Principle 2: An entity's relative strength can be defined as its strength in relation to its neighbors' relative strengths within its society (Fig.2).

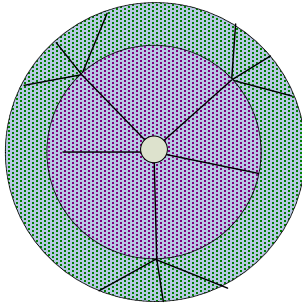


Figure 2. The central is the node whose centrality value is subject to computation. The peripheral nodes are used to compute the second centrality values.

The SMC value for node “a” can be computed similar to the FMC value. The FMC values are used to determine the independent set, vertex-cover sets. It is not suitable to determine the MDS. In order to determine the MDS, the SMC values are used. This case is called as “Second Layer Centrality Effect Region” (Fig.2). When a node is selected for MDS such as node “a”, the next node selected for MDS may be neighbor of one of the nodes in set {g, h, i, j, k, m, n, p, q}. This philosophy should be used for all MDS algorithms.

Definition 3: Assume that $G = (V, E)$ is a graph and V_D is the minimum dominating set for G obtained by using Malatya Dominating Set Algorithm. $\exists u \in V_D, \forall v_i \in N(u)$, all v_i have got more than one black node, then node u is called **redundant node**.

The Redundant Node Elimination algorithm changes the state of redundant node in V_D (the minimum dominating set). The Malatya Dominating Set finalized with node colors as grey and black. If the grey neighbors of the nodes in the MDS have more than one black neighbor, two or more black neighbors of the grey are added to the grey nodes list and the grey node is added to the black nodes list.

VERIFYING OPTIMALITY OF MALATYA DOMINATING SET FOR SPECIAL GRAPHS

The Malatya Dominating Set algorithm can be verified that it is optimum for some important graphs.

Theorem 1: Malatya Dominating Set algorithm is optimum for path graph P_n .

Proof: Assume that $G = (V, E)$ is a path graph of size n , Fig. 3 illustrates the first step of determining the first element of V_D .

Algorithm 3 should be used to the graph shown in Fig. 3 in order to determine the best dominating set. Fig. 3 displays the algorithm's results. The SMC values are calculated using Algorithm 2 for the initial step of Algorithm 3 following the computation of the FMC values. Fig. 3 (a) displays the MC values for the original graph, whereas Fig. 3 (b) displays the values for the revised graph. The first element chosen for V_D is node “2,” while the second element chosen for V_D is node “5”. This is how the process continues. Table 1 lists the cardinalities of dominating set for various P_n sizes.

Table 1. The cardinalities of V_D obtained by the Malatya Dominating Set algorithm for different sizes of P_n .

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	...
$ V_D $	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6	...



Figure 3. MC values for the original Path graph are shown in (a), while the values for the revised graph are shown in (b).

The optimum cardinalities of V_D can be computed by Eq.5.

$$|V_D| = \begin{cases} \left\lceil \frac{n}{3} \right\rceil + 1, & \text{if } n \bmod 3 = 1 \\ \left\lceil \frac{n}{3} \right\rceil + 1, & \text{if } n \bmod 3 = 2 \\ \left\lceil \frac{n}{3} \right\rceil, & \text{if } n \bmod 3 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

In other word, it is seen that the formula for the cardinality of V_D is $|V_D| = \left\lceil \frac{n}{3} \right\rceil$ where $\lceil \dots \rceil$ is a ceiling function ■

Theorem 2: MDSA is optimum for cycle graph C_n .

Proof: Assume that $G = (V, E)$ is a cycle graph of size n and Fig. 4 illustrates a cycle graph. The FMC values are all 2 for all nodes and the SMC values for all nodes are 1. In this case, any node is randomly selected and selected node and its neighbors are colored as grey. This process concludes in path graph. The optimum case of Malatya Dominating Set algorithm for path graph was verified in Theorem 2. The node ‘1’ is selected randomly, then selected node is removed from graph and its neighbors (1, 2, n) are colored as grey C_n , and this case concludes in path graph P_{n-3} . In the case of cycle graph, the neighbors of selected node are also removed from given graph, since all grey nodes have active degrees as 1. The Malatya Dominating Set algorithm obtains the following

minimum dominating set cardinalities with respect to cycle sizes (Table 2 illustrates these cases). The selected node and its neighbors are removed from the given graph, and this case is $P_{(n-3)} = C_n - \{1, 2, n\}$. The obtained result is a path and the Malatya Dominating Set algorithm is optimum for path graph.

Table 1. The cardinalities of V_D obtained by the Malatya Dominating Set algorithm for different sizes of C_n .

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	...
$ V_D $	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	5	6	...

The cardinality of V_D is given in Eq.5. In other way, it is seen that the formula for the cardinality of V_D is $|V_D| = \lceil \frac{n}{3} \rceil$ where $\lceil \dots \rceil$ is a ceiling function ■



Figure 4. Cycle graph and at the first step node '1' is selected.

Theorem 3: Malatya Dominating Set algorithm is optimum for star graph S_n .

Proof: Assume that $S_n = (V, E)$ is a star graph as seen in Fig.5. The node degrees $d(2) = d(3) = \dots = d(n) = 1$ and $d(1) = n - 1$. So, the FMC value for all nodes is:

$$\psi_1(2) = \psi_1(3) = \psi_1(4) = \dots = \psi_1(n) = \frac{1}{n-1} \text{ and}$$

$$\psi_1(1) = \frac{\frac{n-1}{1} + \frac{n-1}{1} + \dots + \frac{n-1}{1}}{n-1} = (n-1)^2 \quad (6)$$

$$\psi_2(2) = \psi_2(3) = \psi_2(4) = \dots = \psi_2(n) = \frac{\frac{1}{n-1}}{(n-1)^2} = \frac{1}{(n-1)^3} \quad (7)$$

$$\text{and } \psi_2(1) = \left(\left(\frac{(n-1)^2}{\frac{1}{n-1}} \right) / (n-1) \right) \frac{1}{(n-1)^3}$$

The structural visualization of star graph is shown in Fig. 5.

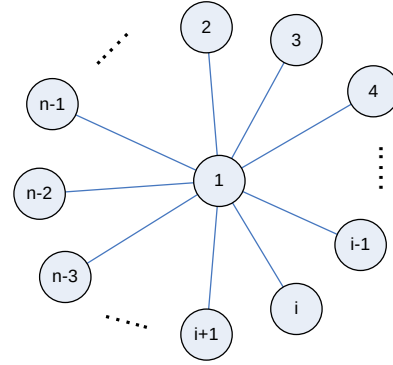


Figure 5. Star graph of size n.

The node '1' has maximum SMC value and it is subject to select for minimum dominating set. The remaining nodes are all neighbors of node '1', and they all are added to set V_N . This is the optimum result for star graph ■

Theorem 4: Malatya Dominating Set algorithm does not include redundant nodes for bipartite graph $G = (V, E)$ where $V = V_1 \cup V_2$, $V_1 \cap V_2 = \emptyset$, $|V_1| = m$, $|V_2| = n$, $m \geq 2$, $n \geq 2$.

Proof: The proof can be handled for bipartite graphs in two cases.

Case a: Assume that $K_{m,n} = (V, E)$ is a grid graph where $|V| = m + n$, and $V = V_1 \cup U$, $V_1 \cap U = \emptyset$. The optimality of the Malatya Dominating Set algorithm for given graph (Fig.6).

Figure 6. Complete bipartite graph.

Without losing generality, assume that $m > n$. The SMC values are as follow:

$$\forall v_i \in V_1 \Rightarrow \psi_1(v_i) = \frac{n^2}{m} \quad (8)$$

$$\text{and } \forall u_i \in U \Rightarrow \psi_1(u_i) = \frac{m^2}{n}$$

$$\forall v_i \in V_1 \Rightarrow \psi_2(v_i) = \frac{\frac{n^2}{m^2} \cdot \frac{1}{n}}{\frac{1}{n}} = \frac{n^2}{m^3} \quad (9)$$

$$\text{and } \forall u_i \in U \Rightarrow \Psi_2(u_i) = \frac{\frac{m^2}{n}}{\frac{n^2}{m}} \cdot \frac{1}{m} = \frac{m^2}{n^3}$$

$\frac{n^2}{m^3} < 1$ and $\frac{m^2}{n^3} > 1$, then one of the nodes in U is selected for the minimum dominating set. After this step, the nodes in V_1 are marked as grey and all nodes in U have active degrees as zero. Due to this case, all the remaining nodes in U are added to the minimum dominating set. The $n > m$ case is similar to this case.

Case b: Assume that G is not a complete bipartite graph and $G = (V, E)$ is a bipartite graph where $V = V_1 \cup V_2$, $V_1 \cap V_2 = \emptyset$, $|V_1| = n$ and $|V_2| = m$. Thus, the situation in Eq.10 will occur.

$$\begin{aligned} \forall u_i \in V_1, 1 \leq i \leq n, 1 \leq d(u_i) \leq m \\ \text{and } \forall v_j \in V_2, 1 \leq j \leq m, 1 \leq d(v_j) \leq n \end{aligned} \quad (10)$$

Malatya Dominating Set algorithm consists of four steps: Computation of the FMC values, the SMC values, selecting maximum arguments and the redundant node eliminations. Without losing generality, assume that $\forall u_i \in V_1, 1 \leq i \leq n, d(u_i) = r$ and $\forall v_j \in V_2, 1 \leq j \leq m, d(v_j) = k$. This situation can be seen in Eq. 11.

$$\begin{aligned} \Psi_1(u_i) = \frac{r}{k} r = \frac{r^2}{k} \text{ and } \Psi_1(v_j) = \frac{k}{r} k = \frac{k^2}{r} \\ \text{and } \Psi_2(u_i) = \frac{\frac{r^2}{k^2}}{r} = \frac{r^2}{k^3} \text{ and } \Psi_2(v_j) = \frac{\frac{k^2}{r^2}}{k} = \frac{k^2}{r^3} \end{aligned} \quad (11)$$

If $r > k$ then $\Psi_2(u_i) > \Psi_2(v_j) \Rightarrow \frac{r^2}{k^3} > \frac{k^2}{r^3}$. A node in V_1 can be selected for the minimum dominating set. After selection of a node to minimum dominating set makes decreasing in degrees of r nodes in V_2 by 1 (as seen in Fig.7). The FMC values for nodes in V_2 are seen in Fig.7.

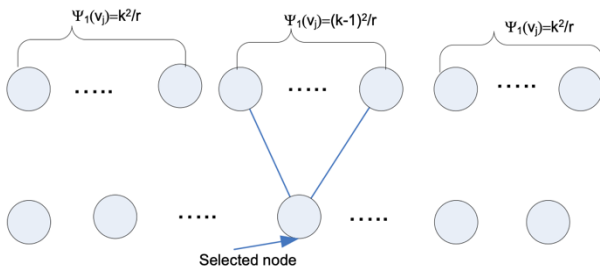


Figure 7. The node selection process changes degrees of some nodes.

The new state of graph is as follow: $|V_1| = m - 1$, $|V_2| = n$, and there are r grey nodes, one black node. The remaining nodes are white nodes. The remaining nodes in V_1 have the following the FMC values (the nodes in V_1 can be grouped into two ways with respect to node degrees).

The nodes (assume that these nodes are denoted as u_i have degrees as $k-1$. Thus, $\Psi_1(u_i)$ is:

$$\begin{aligned} \Psi_1(u_i) &= \left(\frac{r}{k-1} + \frac{r(r-1)}{k} \right) \frac{r-1}{r} \\ &= \frac{(r-1)(rk-r+1)}{k(k-1)} \end{aligned} \quad (12)$$

and the remaining nodes have the following the FMC values:

$$\Psi_1(u_i) = \frac{r}{k} r = \frac{r^2}{k} \quad (13)$$

All nodes in given graph are grouped into four groups.

a) The nodes in $v_j \in V_2$ have degrees as $k-1$, and so their SMC values are:

$$\begin{aligned} \Psi_2(v_j) &= \left[\frac{\frac{(k-1)^2}{r}}{\frac{(r-1)(rk-r+1)}{k(k-1)}} \gamma + \frac{\frac{(k-1)^2}{r}}{\frac{r^2}{k}} (k-\gamma) \right] \frac{1}{k-1} \\ &= \frac{\gamma k(k-1)^2}{r(r-1)(rk-r+1)} + \frac{k(k-1)(k-\gamma)}{r^2} \end{aligned} \quad (14)$$

where γ is the number of grey neighbors of node v_j .

b) The nodes in $v_j \in V_2$ have degrees as ' k ', and so their SMC values are:

$$\begin{aligned} \Psi_2(v_j) &= \left[\frac{\frac{k^2}{r}}{\frac{(r-1)(rk-r+1)}{k(k-1)}} \gamma + \frac{\frac{k^2}{r}}{\frac{r^2}{k}} (k-\gamma) \right] \frac{1}{k} \\ &= \frac{\gamma k^2(k-1)}{r(r-1)(rk-r+1)} + \frac{(k-\gamma)k^2}{r^3} \end{aligned} \quad (15)$$

where γ is the number of grey neighbors of node v_j .

c) The nodes in $u_i \in V_1$ have degrees as $r-1$ (have γ neighbors), and so their SMC values are:

$$\begin{aligned} \Psi_2(u_i) &= \frac{r-1-\gamma}{(r-1)^2} \left[\frac{r(r-1)(rk-r+1)}{k^3(k-1)} \gamma + \frac{r(r-1)(rk-r+1)}{k(k-1)^3} (r-1-\gamma) \right] \\ &= \left[\frac{r(rk-r+1)}{k^3(k-1)} \gamma + \frac{r(rk-r+1)}{k(k-1)^3} (r-1-\gamma) \right] \frac{r-1-\gamma}{(r-1)} \end{aligned} \quad (16)$$

d) The nodes in $u_i \in V_1$ have degrees as r (have γ neighbors), and so their SMC values are:

$$\begin{aligned} \Psi_2(u_i) &= \left[\frac{r^3}{k^3} \gamma + \frac{r^3}{k(k-1)^2} (r-\gamma) \right] \frac{r-\gamma}{r^2} \\ &= \left[\frac{r}{k^3} \gamma + \frac{r}{k(k-1)^2} (r-\gamma) \right] (r-\gamma) \end{aligned} \quad (17)$$

There are four cases to compute the SMC values of all nodes in the changed graph. Assume that $k = r$, then the centrality values are simplified as follows (at the second step, all nodes in V_2 do not have grey neighbors).

- $\Psi_2(v_j) = \frac{(k-1)}{k^2-k+1} + \frac{(k-1)}{k}$
- $\Psi_2(v_j) = \frac{k}{k^2-k+1} + \frac{1}{k}$
- $\Psi_2(u_i) = \left[\frac{\gamma(k^2-k+1)}{k^2(k-1)^2} + \frac{k^2-k+1}{(k-1)^4} (k-\gamma-1) \right] (k-\gamma-1)$
- $\Psi_2(u_i) = \left[\frac{1}{k^2} \gamma + \frac{1}{(k-1)^2} (k-\gamma) \right] (k-\gamma)$

Without losing generality, let's $k = 4$, then

$$a) \Psi_2(v_j) = \frac{(k-1)}{k^2-k+1} + \frac{(k-1)}{k} \cong 0.98$$

$$b) \Psi_2(v_j) = \frac{k}{k^2-k+1} + \frac{1}{k} \cong 0.33$$

$$c) \Psi_2(u_i) = \left[\frac{k^2-k+1}{k(k-1)^2} \gamma + \frac{k^2-k+1}{(k-1)^4} (k-1-\gamma) \right] (k-1-\gamma) \\ = \frac{156+65\gamma}{324} (3-\gamma)$$

$$d) \Psi_2(u_i) = \left[\frac{1}{k^2} \gamma + \frac{1}{(k-1)^2} (k-\gamma) \right] (k-\gamma) = \frac{64-7\gamma}{144} (4-\gamma)$$

In case of $\gamma = 1$,

$$a) \Psi_2(v_j) \cong 0.98$$

$$b) \Psi_2(v_j) \cong 0.33$$

$$c) \Psi_2(u_i) \cong 1.36$$

$$d) \Psi_2(u_i) \cong 1.19$$

In this case, all nodes in V_1 are white nodes, and the selected node in the second must be element of V_1 . This process is carrying on until all nodes are black or grey ■

Theorem 5: Malatya Dominating Set algorithm is optimum for a regular graph of degree (girth graph) 3.

Proof: The Malatya Dominating Set algorithm obtains the minimum dominating set for the given graph. The proof will be handled by using a similar way to mathematical induction. A sample of 3-degree graph is shown in Fig. 8.

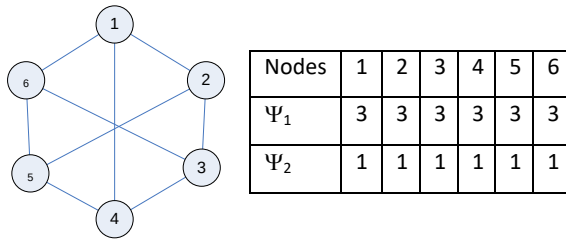


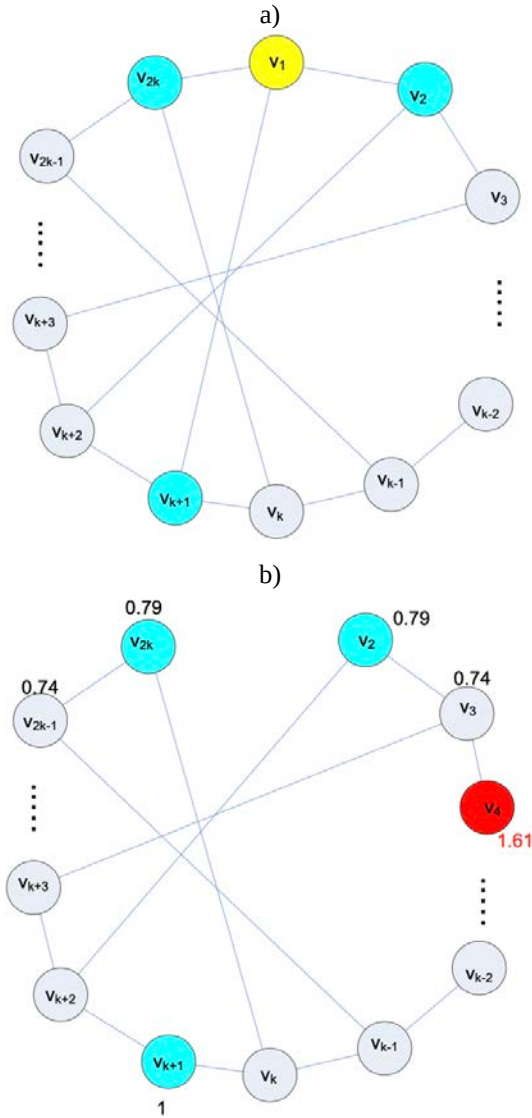
Figure 8. A graph of degree 3

In Fig.8, all the second centrality values are equals and any node is selected to minimum dominating set. Assume that this node is 2, and the nodes 1, 3 and 5 are marked as grey. The nodes 4 and 6 are white nodes of active degrees are equal to zero. In this case, both nodes are added to the minimum dominating set. The obtained result is optimum. The same process can be handled on the graph as seen in Fig.9.

Initially, all nodes of graph seen in Fig.9(a) have 1 as the SMC values. The yellow node is selected to the Minimum Dominating Set V_D , and cyan nodes (grey nodes) are marked as grey nodes. Fig.9(b) illustrates node with the SMC values, and at this case, node v_4 can be selected for the Minimum Dominating Set. The nodes v_3 , v_5 and v_{k+4} are marked as grey nodes.

The process can be specified as a principle such as if the node v_r selected to the minimum dominating set, the nodes v_{r-1} , v_{r+1} and v_{k+r} are marked as grey nodes

(assume that $|V| = n = 2k$). Each step covers four nodes, and if the number n is multiple of the number 4, algorithm determines V_D of size as $n/4$ ■



In this case, any node can be selected to minimum dominating set, and assume that the selected node is u . The $N(u)$ are marked as grey (gray) nodes. The neighbors of grey nodes are depicted as red nodes. The green node and its edges are removed from original graph. Fig.10 illustrates the H5 after one node selection process. Fig.10 depicts that there are four node types with respect to their neighbors' status. The red nodes are 2-hop nodes to the selected node, and white nodes are 3-hop nodes with respect to the selected node. In order to select next node to the minimum dominating set, the centrality values should be re-computed for the re-formed graph after deletion of the selected node (green node). The FMC values are as follows for all types of nodes. Eqs.20-22 are symbolized this situation.

$$\forall v_{grey} \in V, \Psi_1(v_{grey}) = (lgn - 1) \frac{lgn - 1}{lgn} = \frac{(lgn - 1)^2}{lgn} \quad (20)$$

$$\forall v_{red} \in V, \Psi_1(v_{red}) = \frac{2lgn}{lgn - 1} + (lgn - 2) = \frac{2lgn + (lgn - 1)(lgn - 2)}{lgn} \quad (21)$$

$$\forall v_{white} \in V, \Psi_1(v_{white}) = \frac{lgn}{lgn} lgn = lgn \quad (22)$$

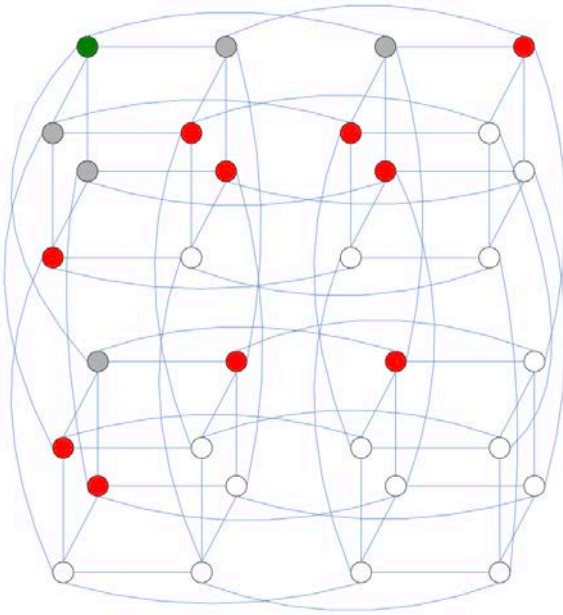


Figure 10. Hypercube of size 5 and the selected node and its neighbors.

The SMC values are as follows for all types of nodes:

$$\forall v_{grey} \in V, \Psi_2(v_{grey}) = \frac{(lgn - 1)^2}{lgn} \frac{lgn - 1}{lgn} \frac{1}{lgn - 1} \frac{1}{lgn - 1} \quad (23)$$

$$= \frac{lgn - 1}{lg^2n - lgn + 2}$$

$$\left(\frac{(lgn - 2) \frac{2lgn + (lgn - 1)(lgn - 2)}{lgn}}{lg^2n - lgn + 2} + 2 \frac{lg^2n - lgn + 2}{(lgn - 1)^2} \right) \frac{lgn - 2}{lgn} \frac{1}{lgn} \quad (24)$$

$$= \left(2 \frac{lg^2n - lgn + 2}{(lgn - 1)^2} + (lgn - 2) \frac{lg^2n - lgn + 2}{lg^2n} \right) \frac{lgn - 2}{lgn} \frac{1}{lgn}$$

$$\forall v_{white} \in V, \Psi_2(v_{white}) = \left(2 \frac{2lgn + (lgn - 1)(lgn - 2)}{lgn} \frac{lgn}{lgn} \frac{1}{lgn} + (lgn - 2) \frac{lgn}{lgn} \right) \frac{1}{lgn} \quad (25)$$

The all nodes 4-hop or more faraway to the selected node have the SMC values as follows ($v_i \in V$, v_i is 4-hop or more faraway):

$$\Psi_2(v_i) = \frac{lgn}{lgn} + \frac{lgn}{lgn} + \dots + \frac{lgn}{lgn} \frac{lgn}{lgn} \frac{1}{lgn} = \frac{lgn}{1} \quad (26)$$

In order to select next node to minimum dominating set, the SMC values should be compared and the node whose centrality value is maximum, should be selected. The first step is to compare grey and red nodes' SMC values:

$$\Psi_2(v_{grey}) k_1 = \Psi_2(v_{red}) \left(\frac{lgn - 1}{lg^2n - lgn + 2} \right) k_1 = \left(2 \frac{lg^2n - lgn + 2}{(lgn - 1)^2} + (lgn - 2) \frac{lg^2n - lgn + 2}{lg^2n} \right) \frac{lgn - 2}{lgn} \frac{1}{lgn} \quad (27)$$

where $k_1 =$

$$\frac{lg^4n(lgn - 1)^2}{2lg^2n(lg^2n - lgn + 2)(lgn - 2) + (lgn - 2)^2(lgn - 1)^2(lg^2n - lgn + 2)} \text{ and}$$

$$\frac{1}{k_2} = \frac{2(lg^2n - lgn + 2)(lgn - 2)}{lg^2n(lgn - 1)^2} + \frac{(lgn - 2)^2(lg^2n - lgn + 2)}{lg^4n} \text{ where}$$

$$\frac{(lgn - 2)^2(lg^2n - lgn + 2)}{lg^4n} < 1, \frac{4(lgn - 2)}{lgn(lgn - 1)^2} < 1 \text{ and}$$

$$\frac{2(lgn - 2)^2}{lg^2n(lgn - 1)} < 1.$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(lgn - 2)^2(lg^2n - lgn + 2)}{lg^4n} = 1,$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{4(lgn - 2)}{lgn(lgn - 1)^2} = 0 \text{ and}$$

$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2(\lg n - 2)^2}{\lg^2 n (\lg n - 1)} = 0$ imply that $k_2 > 1$. That's why, $\Psi_2(v_{white}) > \Psi_2(v_{red})$ ■

NON-REDUNDANCY OF MALATYA DOMINATING SET ALGORITHM

Malatya Dominating Set Algorithm (MDSA) is an efficient algorithm to find the minimum dominating sets for given graphs, since the space and time complexities of MDSA are polynomials. MDSA finds near-optimal solutions for some graphs, and due to this case, MDSA is an optimal or near-optimal algorithm. The requirement of revision in algorithm is needed. Fig.11 illustrates this case, i.e. red nodes are elements of minimum dominating set, and green nodes are elements of neighbors of dominating nodes. The red nodes 10, 20 can be removed from minimum dominating set and in this case, green node 15 should be added to minimum dominating set. Due to this case, "redundant node elimination" should be done in this perspective.

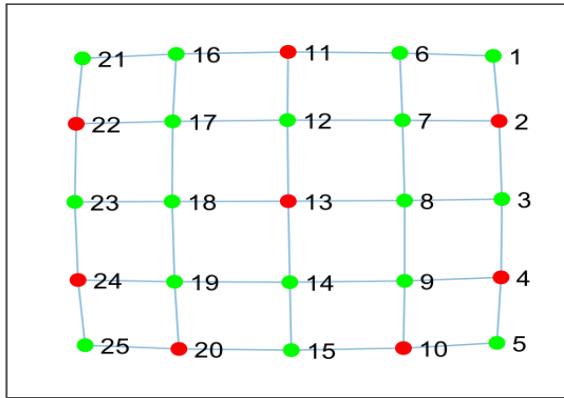


Figure 11. Near-optimal solution for grid 5x5 without Node Justification process.

Fig.11 illustrates the result of MDSA for grid graph of size 5x5. The nodes 10 and 20 are redundant nodes with respect to Definition 3. "Redundant node elimination" algorithm detects node 15, and in this case, black nodes 10 and 20 are converted to grey nodes and node 15 is converted to black node. This is the last step of MDSA and it eliminates redundant nodes from the minimum dominating set and adds new node(s) to minimum dominating set.

TIME AND SPACE COMPLEXITIES OF MDSA

The justification of the optimality of these algorithms were handled in this paper. The justification of these algorithms was handled in two ways: according to obtained solutions, time-space complexities. The time and space complexities were given in subsequent pages.

Theorem 7: The algorithm 1 consumes the time and space in polynomial forms for given graph $G = (V, E)$ where $|V| = n$ and $|E| = m$.

Proof: The graph data structures can be performed in two ways. The proof of theorem can be given in two ways: Matrix can be used to represent the given graph. In this case, usage space is only an $n \times n$ matrix, where $|V| = n$. Due to this case, the space complexity of Algorithm 1 is $P_{MC1}(n) = \theta(n^2)$. The FMC computation requires traversing adjacency matrix once. That's why, the time complexity of Algorithm 2 is $T_{MC1}(n) = \theta(n^2)$. If the graph is represented by linked list, then the space usage is for Algorithm 1 is $P_{MC1}(n) = \theta(n \cdot \Delta(G))$. So, the time consumption of Algorithm 1 is $O(\Delta(G) \cdot n)$ ■

Theorem 8: The algorithm 2 consumes the time and space in polynomial forms for given graph $G = (V, E)$ where $|V| = n$ and $|E| = m$.

Proof: The graph data structures can be performed in two ways. The proof of theorem can be given in two ways: Matrix can be used to represent the given graph. In this case, usage space is only an $n \times n$ matrix where $|V| = n$. Due to this case, the space complexity of Algorithm 2 is $P_{MC2}(n) = \theta(n^2)$. The FMC computation requires traversing adjacency matrix once. That's why, the time complexity of Algorithm 2 is $T_{MC2}(n) = \theta(n^2)$. If the graph is represented by linked list, then the space usage is for Algorithm 2 is $P_{MC2}(n) = \theta(n \cdot \Delta(G))$. So, the time consumption of Algorithm 2 is $T_{MC2}(n) = O(\Delta(G) \cdot n)$ ■

Theorem 9: Assume that $G = (V, E)$ is a graph where $|V| = n$ and $|E| = m$. The Algorithm 3 has polynomial time and space complexities.

Proof: $G = (V, E) = G_0 = (V_0, E_0)$, $|V| = n$, where $|V| = n$. In order to select a node to the minimum dominating set requires usage of Algorithm 1 and Algorithm 2 once. $\Psi_1(\dots)$ and $\Psi_2(\dots)$ are computed. After selection of one node to the minimum dominating set, given graph is reformed. The same process is repeated. The complexity of DominatingSet algorithm can be phrased in two ways (adjacency matrix, linked list). $\gamma(G)$ is the cardinality of minimum dominating set, $T_s(\dots)$ is the time searching node for minimum dominating set.

Case 1: Adjacency matrix:

$$T_{DS}(n) = \sum_{i=0}^{\gamma(G)} (T_{MC1}(|V_i|) + T_{MC2}(|V_i|) + T_s(|V_i|)) = O(\gamma(G)n^2) \quad (28)$$

Case 2: Linked list:

$$T_{DS}(n) = \sum_{i=0}^{\gamma(G)} (T_{MC1}(\Delta(G_i)|V_i|) + T_{MC2}(\Delta(G_i)|V_i|) + T_s(|V_i|)) = O(\gamma(G) \cdot n \cdot \Delta(G)) \quad (29)$$

So, the proof is completed ■

CONCLUSIONS

This study presents analytical verifications to strengthen the theoretical foundations of the Malatya Dominating Set Algorithm (MDSA). Previous studies have shown that MDSA has given successful results experimentally on various datasets and graph structures. However, these experimental successes needed to be mathematically proven and it needed to be proven that the algorithm produces optimal or near-optimal results on certain graph types. Accordingly, in our study, it has been mathematically shown that MDSA gives the best results with the least number of nodes on certain graph types and its theoretical framework has been strengthened.

One of the most important contributions of the study is the analytical modeling of the minimum dominating set determination process using the Malatya Centrality Value and proving that it can produce optimal solutions. Mathematical analyses performed especially on Path, Cycle, Star, and Bipartite Graph types have revealed that MDSA can create optimal minimum dominating sets for these graph types. In addition, it has been mathematically proven that the minimum dominating set can be created on regular graph types such as grid-based structures and hypercubes.

Another important feature of MDSA is that it can produce redundant minimum dominating sets. Unlike traditional greedy or heuristic methods, MDSA includes the Redundant Node Elimination mechanism. In our study, it is shown that this mechanism is mathematically verified and that the algorithm can optimize the minimum dominating set size by eliminating unnecessary nodes. This feature shows that MDSA is built on a theoretically stronger foundation compared to other minimum dominating set algorithms.

Analysis in terms of time and space complexity proves that MDSA has polynomial time and memory requirements and offers an efficient approach to solve the dominating set problem. The Minimum Dominating Set (MDS) problem, which is NP-hard, is generally addressed in the literature with heuristic or ILP-based approaches. However, MDSA offers significant advantages over existing methods in the literature since it is both more efficient in terms of time and provides optimal solutions for certain graph types.

In conclusion, this study mathematically proves that MDSA produces analytically optimal results for certain types of graphs and presents a new theoretical framework for minimum dominating set problems. Specifically, the non-redundant minimum dominating set creation mechanism's analytical demonstration adds significantly to the body of research. MDSA should be supported by more comprehensive analyses in the future and made usable in different applications due to its ability to determine minimum dominating sets and produce optimal solutions in polynomial time complexity.

Therefore, our study provides a theoretical basis for new research on minimum dominating set problems and takes an important step towards increasing the efficiency of centrality-based algorithms.

REFERENCES

- [1] A. Mitra and S. Paul, "Analyzing social networks with dynamic graphs: Unravelling the ever-evolving connections," *Appl. Graph Data Sci.*, pp. 195–214, Jan. 2025, doi: 10.1016/B978-0-443-29654-3.00020-X.
- [2] L. Yu, Z. Wang, Y. Liu, and Z. Yang, "Sampled-Data-Based Privacy-Preserving Scaled Consensus for Nonlinear Multiagent Systems: A Paillier Encryption Approach," *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Syst.*, 2024, doi: 10.1109/TSMC.2024.3517473.
- [3] R. Das and M. Soylu, "A key review on graph data science: The power of graphs in scientific studies," *Chemom. Intell. Lab. Syst.*, vol. 240, p. 104896, Sep. 2023, doi: 10.1016/J.CHEMOLAB.2023.104896.
- [4] L. D. F. Costa *et al.*, "Analyzing and modeling real-world phenomena with complex networks: a survey of applications," *Adv. Phys.*, vol. 60, no. 3, pp. 329–412, May 2011, doi: 10.1080/00018732.2011.572452.
- [5] E. Gayathiri *et al.*, "Computational approaches for modeling and structural design of biological systems: A comprehensive review," *Prog. Biophys. Mol. Biol.*, vol. 185, pp. 17–32, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.PBIOMOLBIO.2023.08.002.
- [6] S. S. Singh, S. Muhuri, S. Mishra, D. Srivastava, H. K. Shakya, and N. Kumar, "Social Network Analysis: A Survey on Process, Tools, and Application," *ACM Comput. Surv.*, vol. 56, no. 8, Apr. 2024, doi: 10.1145/3648470.
- [7] D. Karthika, R. Muthucumaraswamy, M. Bentert, S. Bhyravarapu, S. Saurabh, and S. Seetharaman, "On the Complexity of Minimum Membership Dominating Set," pp. 94–107, 2025, doi: 10.1007/978-3-031-82670-2_8.
- [8] M. Shahraeini, G. Kohsari, and M. H. Javidi, "Comparison of Meta-Heuristic Algorithms for Solving Dominating Set Problems in WAMS Design," *Proc. - 2022 8th Int. Iran. Conf. Signal Process. Intell. Syst. ICSPIS 2022*, 2022, doi: 10.1109/ICSPIS56952.2022.10044037.
- [9] D. L. L. Moura, A. L. L. Aquino, and A. A. F. Loureiro, "Towards data VSN offloading in VANETs integrated into the cellular network," *MSWiM 2019 - Proc. 22nd Int. ACM Conf. Model. Anal. Simul. Wirel. Mob. Syst.*, pp. 235–239, Nov. 2019, doi: 10.1145/3345768.3355937.
- [10] M. M. Daliri Khomami, A. Rezvanian, N. Bagherpour, and M. R. Meybodi, "Minimum positive influence dominating set and its application in influence maximization: a learning automata approach," *Appl. Intell.*, vol. 48, no. 3, pp. 570–593, Mar. 2018, doi: 10.1007/S10489-017-0987-Z/FIGURES/7.
- [11] R. Sun, J. Wu, C. Jin, Y. Wang, W. Zhou, and M. Yin, "An efficient local search algorithm for minimum positive influence dominating set problem," *Comput. Oper. Res.*, vol. 154, p. 106197, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.COR.2023.106197.
- [12] M. A. Akbay, A. López Serrano, and C. Blum, "A Self-Adaptive Variant of CMSA: Application to the Minimum Positive Influence Dominating Set

- Problem,” *Int. J. Comput. Intell. Syst.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–13, Dec. 2022, doi: 10.1007/S44196-022-00098-1/TABLES/4.
- [13] J. Raczek and M. Miotk, “Two Approaches to Constructing Certified Dominating Sets in Social Networks,” *IEEE Access*, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3532392.
- [14] S. Wuchty, “Controllability in protein interaction networks,” *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 111, no. 19, pp. 7156–7160, May 2014, doi: 10.1073/PNAS.1311231111/SUPPL_FILE/PNAS.201311231SI.PDF.
- [15] S. K. Grady, K. A. Peterson, S. A. Murray, E. J. Baker, M. A. Langston, and E. J. Chesler, “A graph theoretical approach to experimental prioritization in genome-scale investigations,” *Mamm. Genome*, vol. 35, no. 4, pp. 724–733, Dec. 2024, doi: 10.1007/S00335-024-10066-Z/FIGURES/7.
- [16] Y. Tokuhara, T. Akutsu, J. M. Schwartz, and J. C. Nacher, “A practically efficient algorithm for identifying critical control proteins in directed probabilistic biological networks,” *npj Syst. Biol. Appl.* 2024 101, vol. 10, no. 1, pp. 1–12, Aug. 2024, doi: 10.1038/s41540-024-00411-y.
- [17] J. M. Etancelin, A. Fabbri, F. Guinand, and M. Rosalie, “DACYCLEM: A decentralized algorithm for maximizing coverage and lifetime in a mobile wireless sensor network,” *Ad Hoc Networks*, vol. 87, pp. 174–187, May 2019, doi: 10.1016/J.ADHOC.2018.12.008.
- [18] N. R. Sivakumar, S. M. Nagarajan, G. G. Devarajan, L. Pullagura, and R. P. Mahapatra, “Enhancing network lifespan in wireless sensor networks using deep learning based Graph Neural Network,” *Phys. Commun.*, vol. 59, p. 102076, Aug. 2023, doi: 10.1016/J.PHYCOM.2023.102076.
- [19] Y. Sabri and A. Hilmani, “An IoT-Based 5G Wireless Sensor Network Employs a Secure Routing Methodology Leveraging DCNN Processing,” *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.*, vol. 35, no. 12, p. e70025, Dec. 2024, doi: 10.1002/ett.70025.
- [20] S. Saurabh, S. Madria, A. Mondal, A. S. Sairam, and S. Mishra, “An analytical model for information gathering and propagation in social networks using random graphs,” *Data Knowl. Eng.*, vol. 129, p. 101852, Sep. 2020, doi: 10.1016/J.DATAK.2020.101852.
- [21] F. Okumuş and Ş. Karcı, “MDSA: A Dynamic and Greedy Approach to Solve the Minimum Dominating Set Problem,” *Appl. Sci.* 2024, Vol. 14, Page 9251, vol. 14, no. 20, p. 9251, Oct. 2024, doi: 10.3390/APP14209251.
- [22] A. Science, S. Yakut, F. Öztemiz, and A. Karcı, “A New Approach Based on Centrality Value in Solving the Maximum Independent Set Problem: Malatya Centrality Algorithm,” *Comput. Sci.*, vol. Vol:8, no. Issue:1, pp. 16–23, Jun. 2023, doi: 10.53070/BBD.1224520.
- [23] A. Science and F. Öztemiz, “İki Parçalı Eşleştirme ile Maksimum Akış,” *Bilgi. Bilim.*, vol. Vol:8, no. Issue:2, pp. 102–109, Dec. 2023, doi: 10.53070/BBD.1386446.
- [24] H. Jiang and Z. Zheng, “An Exact Algorithm for the Minimum Dominating Set Problem,” 2023.

Cu(II) Adsorption from Aqueous Solution Using K₂CO₃-Activated Carbon Derived from *Chenopodium botrys*: A Sustainable Approach

Selma EKİNCİ¹, Erhan ONAT², Ramazan ASTAN³

¹ Vocational School of Technical Sciences, Department of Chemistry and Chemical Process Technology, Batman University, Batman, Turkey

² Vocational School of Organized Industrial Zone, Department of Electrical and Energy, Bitlis Eren University, Bitlis, Turkey

³Postgraduate Education Institute, Batman University, Batman, Turkey

✉: selma.ekinci@batman.edu.tr  [0000-0002-7835-4832](https://orcid.org/0000-0002-7835-4832)  [0000-0003-1638-0151](https://orcid.org/0000-0003-1638-0151)  [0009-0002-6516-0411](https://orcid.org/0009-0002-6516-0411)

Received (Geliş): 05.03.2025

Revision (Düzeltilme): 07.04.2025

Accepted (Kabul): 25.04.2025

ABSTRACT

This study investigates the adsorption performance of a novel activated carbon synthesized from *Chenopodium botrys* using potassium carbonate (K₂CO₃) for the removal of Cu(II) ions. The structural and surface properties of the prepared adsorbent were characterized by FT-IR, SEM, and EDX analyses, confirming its porous structure and the presence of surface functional groups. Adsorption experiments were conducted to determine the optimum operating conditions, and kinetic data showed a strong fit to the pseudo-second-order model, indicating that the process is governed by chemisorption. Isotherm analysis revealed that the adsorption occurred in multilayers on a heterogeneous surface, with the Freundlich model providing the best fit. Thermodynamic evaluations demonstrated the endothermic nature of the process, with adsorption capacity increasing with temperature. Overall, the results suggest that this *Chenopodium botrys*-derived activated carbon is a cost-effective and environmentally friendly material for the treatment of Cu(II)-contaminated wastewater.

Keywords: Adsorption, Activated carbon, *Chenopodium botrys*, Removal of Cu (II), Heavy metal

Chenopodium botrys'ten Türetilen K₂CO₃-Aktif Karbon Kullanılarak Sulu Çözeltilerden Cu(II) Adsorpsiyonu: Sürdürülebilir Bir Yaklaşım

ÖZ

Bu çalışma, *Chenopodium botrys* bitkisinden potasyum karbonat (K₂CO₃) kullanılarak sentezlenen yeni bir aktif karbonun Cu(II) iyonlarının giderimindeki adsorpsiyon performansını araştırmaktadır. Üretilen adsorbanın yapısal ve yüzey özellikleri FT-IR, SEM ve EDX analizleri ile karakterize edilmiş; gözenekli yapısı ve yüzey fonksiyonel gruplarının varlığı doğrulanmıştır. Adsorpsiyon deneyleriyle optimum çalışma koşulları belirlenmiş ve kinetik veriler, sürecin kimyasal adsorpsiyonla gerçekleştiğini gösteren sözde ikinci dereceden modele yüksek uyum sağlamıştır. İzoterm analizleri, adsorpsiyonun heterojen yüzeylerde çok katmanlı gerçekleştiğini ve Freundlich modeli ile en iyi şekilde tanımlandığını ortaya koymuştur. Termodinamik analizler, sürecin endotermik karakterde olduğunu ve sıcaklık artışıyla adsorpsiyon kapasitesinin yükseldiğini göstermiştir. Elde edilen sonuçlar, *Chenopodium botrys* kökenli bu aktif karbonun, Cu(II) içeren atık suların arıtımında ekonomik ve çevre dostu bir alternatif olabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Adsorpsiyon, Aktif karbon, *Chenopodium botrys*, Cu (II), Ağır metal

INTRODUCTION

Heavy metal pollution in water bodies has emerged as a major environmental and public health concern due to its toxicity and persistence [1-4]. Among various heavy metals, Cu(II) is widely recognized for its hazardous effects when present in excessive amounts [5-7]. Industrial activities such as electroplating, mining, and fertilizer production contribute significantly to copper contamination in water [8,9]. The accumulation of Cu(II) in aquatic systems poses risks including bioaccumulation

in marine organisms and long-term health issues in humans, such as liver and kidney damage, neurological disorders, and gastrointestinal distress [10,11]. Therefore, the development of efficient, cost-effective, and environmentally sustainable methods for Cu(II) removal is essential [12].

Adsorption is widely considered one of the most effective techniques for heavy metal removal due to its simplicity, high efficiency, and low operational costs [13]. Activated carbon, known for its large surface area and porosity, is a preferred adsorbent. The selection of precursor

materials for activated carbon production significantly influences its adsorption capacity and economic feasibility [14,15]. In recent years, agricultural and plant-based wastes have gained attention as sustainable and renewable precursors for activated carbon synthesis [16-21].

Chenopodium botrys, commonly known as Jerusalem oak, is an underutilized plant species with a high carbon content, making it a promising raw material for activated carbon production. This study utilizes Chenopodium botrys as a precursor for activated carbon synthesis, employing K_2CO_3 as a chemical activator to enhance surface area and porosity. The prepared activated carbon was evaluated for Cu(II) adsorption under different experimental conditions to determine its efficiency and adsorption mechanism [22-24]. The study further investigates the adsorption kinetic, and isotherm properties to provide insights into the adsorption process. This study gives light on the adsorption mechanisms and emphasizes the potential of K_2CO_3 -activated carbon as a sustainable heavy metal removal solution by examining the adsorption behavior of Cu(II) on Chenopodium botrys-derived activated carbon and evaluating the kinetic and isotherm parameters.

MATERIAL and METHODS

Preparation of Chenopodium botrys

Chenopodium botrys was harvested from fields in Bitlis and dried at room temperature for 30 days. The dried material was thoroughly washed with deionized water, ground, and sieved to obtain particles of 300–500 μm . The sample was then heated at 105 $^{\circ}C$ for 24 hours to eliminate residual moisture and stored in a sealed container under laboratory conditions.

Preparation method of activated carbon

Activated carbon was synthesized using chemical activation with K_2CO_3 . A 1:1 ratio of organic matter to K_2CO_3 was used, where 5 g of Chenopodium botrys and 5 g of K_2CO_3 were mixed with 50 mL of deionized water and left for impregnation for 24 hours. The mixture was then filtered and subjected to carbonization in a high-purity N_2 atmosphere at 500 $^{\circ}C$ for 45 minutes. After activation, the sample was washed with 0.5 M HCl to remove residual impurities, followed by multiple rinses with boiling deionized water. The final product was dried at 120 $^{\circ}C$ for 12 hours.

Adsorption experiments

A series of erlenmeyer flasks with a 50 mL volume were used for these studies. By choosing pH, concentration, adsorbent quantity, and contact time, the factors influencing adsorption were experimentally examined. A 1000 ppm stock solution of Cu (II) ions was prepared with $Cu(SO_4).5H_2O$. Cu (II) ion solutions ranging from 25 to 150 ppm were prepared by dilution from the stock

solution and utilized for isotherm investigations. Then the measurements were made at room temperature at specific pH values (2-10). In each experimental series, the process was conducted in accordance with the proper contact time after 50 mL of metal solution and the correct volumes of activated carbon were combined in a shaker running at 10,000 rpm. Following adsorption, the samples were filtered, and a UV-Vis spectrometer was used to determine copper amount in the supernatant.

RESULTS and DISCUSSION

Characterization of activated carbon with FT-IR, EDX, and SEM

The FT-IR spectrum of activated carbon produced through K_2CO_3 activation, as shown in Figure 1, offers valuable information about the adsorbent surface. The transmittance spectrum displays distinct peaks at specific wavenumbers, corresponding to various chemical bonds and functional groups. A broad band in the 3400–3600 cm^{-1} range is typically associated with O–H stretching vibrations, which may arise from adsorbed moisture or hydroxyl groups attached to the surface. The presence of these hydroxyl groups suggests potential hydrogen bonding interactions that enhance the adsorption properties of the material [4]. C=O stretching vibrations are represented by a noticeable absorption band at about 1700 cm^{-1} , which suggests the existence of carboxyl or carbonyl functional groups. These oxygen-containing groups play a significant role in adsorption mechanisms, especially in the removal of metal ions [25,26]. C=C stretching vibrations from aromatic compounds inside the carbon matrix are responsible for peaks in the 1500–1600 cm^{-1} range, which validate the synthesis of activated carbon [27]. Furthermore, bands seen between 1000 and 1300 cm^{-1} are linked to ether, lactone, or phenol groups' C–O stretching vibrations. These functional groups contribute to adsorption by providing active sites for interactions with pollutants [28].

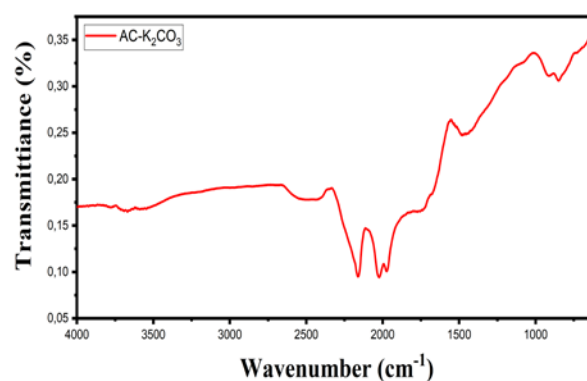


Figure 1. FT-IR analysis of Chenopodium botrys-activated carbon.

The EDX spectrum in Figure 2 confirms that the sample contains primarily carbon (C), with notable amounts of oxygen (O) and potassium (K). The oxygen signals indicate that the carbon structure may have oxygen-containing functional groups, enhancing chemical reactivity. The presence of potassium suggests that some K from the activation agent (K_2CO_3) remains, which may affect the material's properties. This composition is typical for activated carbon prepared using alkali activation, commonly used for adsorption, catalysis, and electrochemical applications.

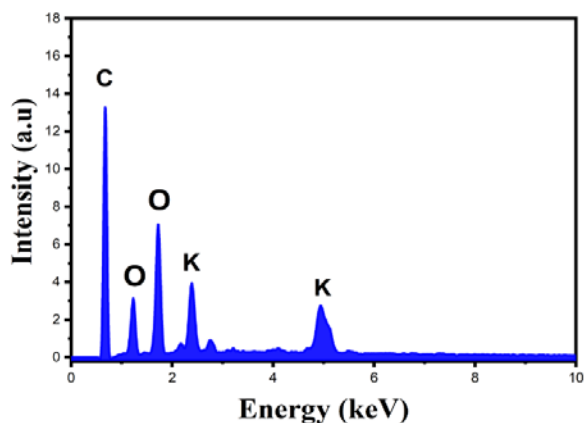


Figure 2. EDX analysis of activated carbon derived from *Chenopodium botrys*

The SEM images in Figure 3 show an irregular, porous, and rough surface, characteristic of activated carbon. The sample consists of aggregated carbon particles with varying sizes, some larger chunks mixed with finer particles. The rough texture suggests significant surface modifications, likely due to the activation process. The presence of numerous micro- and mesoporous is visible as small cavities and rough edges. K_2CO_3 activation is known to create well-developed porosity by chemical etching, which enhances the surface area for adsorption. The particles appear loosely packed, with some forming agglomerates. The fine powder-like structures indicate that the material may have undergone fragmentation during the activation or post-processing. The activation process with K_2CO_3 leads to carbon gasification and pore formation, which enhances the porosity. The rough and uneven structure indicates that K_2CO_3 effectively created micropores.

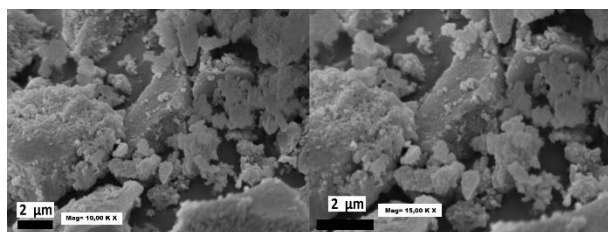


Figure 3. SEM analysis of *Chenopodium botrys*-activated carbon.

Optimum adsorption conditions

In Figure 4, for all concentrations, the adsorption capacity increases quickly within the first 20 minutes, suggesting fast surface adsorption. After 20 minutes, the adsorption capacity plateaus, indicating that equilibrium has been reached. Adsorption sites are saturated, and further Cu(II) removal slows down significantly at equilibrium.

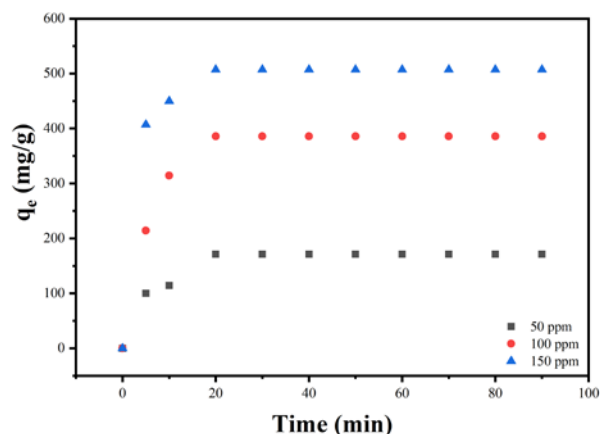


Figure 4. The effect of contact time on the adsorption of Cu (II) ions by *Chenopodium botrys*-activated carbon.

Figure 5 shows that Cu(II) adsorption is strongly pH-dependent, with maximum adsorption occurring at pH 2. At low pH, adsorption is at its highest for all concentrations. As pH increases beyond pH 6, adsorption capacity gradually decreases. This trend is consistent across all Cu(II) concentrations. At low pH levels, negatively charged Cu^{+2} forms are electrostatically bonded to the positively charged adsorbent surface due to the abundance of hydrogen ions in the surrounding environment. Reference studies have reported similar findings [29,30].

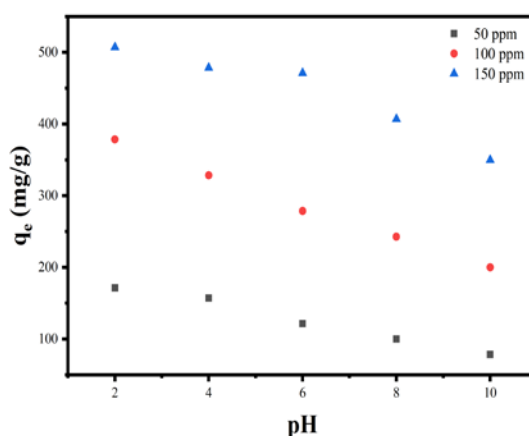


Figure 5. The effect of pH on the adsorption of Cu (II) ions by *Chenopodium botrys*-activated carbon

According to Figure 6, as the initial Cu(II) concentration increases from 25 to 150 mg/L, the adsorption capacity (q_e) steadily increases. This suggests that more Cu(II) ions are available in solution, leading to higher adsorption per gram of adsorbent. The percentage removal of Cu(II) decrease as C_0 increases. At low initial concentrations, A% is higher, indicating efficient adsorption due to the availability of abundant active sites. At concentrations above 100 mg/L, A% decreases, suggesting that adsorption sites are approaching saturation [31].

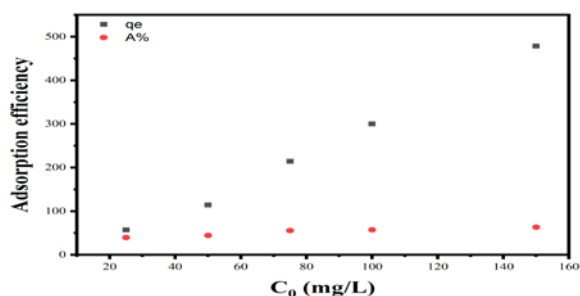


Figure 6. The effect of initial concentration on the adsorption of Cu (II) ions by Chenopodium botrys-activated carbon

At low adsorbent dosages (0.01 g), q_e is highest for all concentrations (Figure 7). At 150 ppm, adsorption capacity is the highest across all adsorbent dosages, followed by 100 ppm and 50 ppm. This suggests that more Cu(II) ions are available in solution, leading to higher uptake per gram of adsorbent. Increasing adsorbent dosage increases the number of available adsorption sites, but at the same time, the Cu(II) concentration remains the same. Since the ratio of available metal ions to adsorbent sites decreases, the adsorption capacity (q_e) per gram of adsorbent declines. While the total amount of Cu(II) removed increases with adsorbent dose, the adsorption per gram of adsorbent decreases. This is because, at higher dosages, excess adsorption sites remain unused, leading to lower adsorption efficiency per gram [32,33].

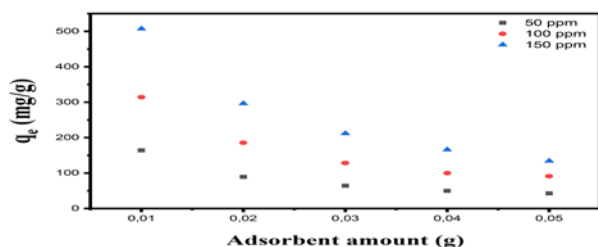


Figure 7. The effect of adsorbent amount on the adsorption of Cu (II) ions by Chenopodium botrys-activated carbon

Adsorption's kinetic way

The linear form of the pseudo-first-order (PFO) and pseudo-second-order (PSO) kinetic models is expressed by equations 1 and 2, respectively.

$$\log(q_e - q) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} \cdot t \quad (1)$$

$$\frac{t}{q} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (2)$$

By drawing graphs of the given linear form of equations, k_1 , k_2 and q_e values were obtained using the line's slope and slip values. Fig. 8, 9 and the kinetic data in the Table 1 provide insights into the adsorption behavior of Cu (II) ions on activated carbon derived from Chenopodium botrys. Based on the given kinetic parameters, we can evaluate the adsorption process from a kinetic perspective. The PFO rate constant ($k_{ads,1}$) decreases as the initial concentration increases (from 0.0468 to 0.1122 min^{-1}), suggesting that adsorption is initially rapid but slows down at higher concentrations. The $q_{e,exp}$ (experimental adsorption capacity) values are significantly higher than the $q_{e,cal}$ values indicating that the PFO model does not perfectly fit the adsorption process. The determination coefficient (R^2) values for the PFO model are high (≥ 0.9989), indicating a reasonably good fit but not the best compared to the PSO model. The PSO rate constant ($k_{ads,2}$) decreases with increasing concentration (from $1.9 \cdot 10^{-3}$ to $2.3 \cdot 10^{-3}$), suggesting that chemical interactions between Cu (II) and the adsorbent become more dominant at higher concentrations. The calculated adsorption capacity ($q_{e,cal}$) values are much closer to the experimental values ($q_{e,exp}$), which indicates that the PSO model better represents the adsorption kinetics. The R^2 values for the PSO model are very high (≥ 0.9976), confirming that the adsorption process follows PSO kinetics more closely. The adsorption of Cu (II) ions onto activated carbon follows PSO kinetics rather than PFO kinetics. This suggests that the adsorption process is primarily controlled by chemisorption, involving electron sharing or exchange between the adsorbent and adsorbate. The increasing trend in $q_{e,exp}$ with concentration suggests that adsorption sites are not fully saturated, and higher concentrations lead to greater adsorption. The decrease in $k_{ads,2}$ with concentration implies that adsorption sites become more occupied, reducing the availability of active sites for new Cu (II) ions. Thus, the kinetic evaluation suggests that chemisorption is the dominant mechanism governing the adsorption of Cu (II) ions onto the activated carbon derived from Chenopodium botrys.

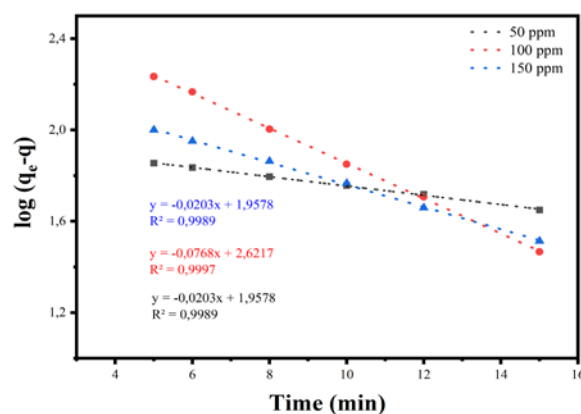


Figure 8. The PFO kinetic equation drawings of the adsorption

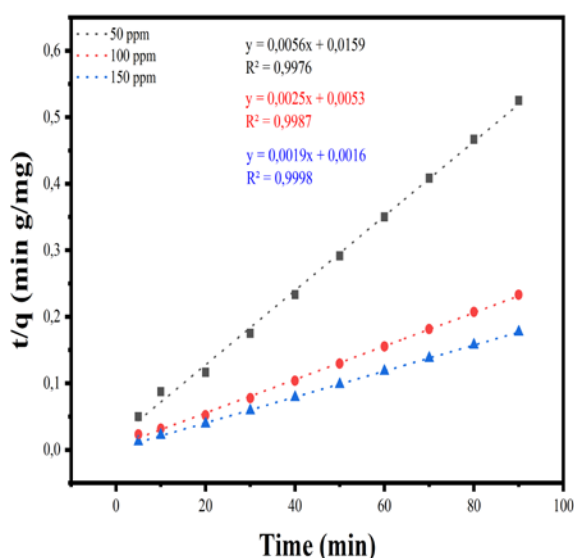


Figure 9. The PSO kinetic equation drawings of the adsorption

Table 1. Kinetic parameters of adsorption of Cu (II) on activated carbon derived from *Chenopodium Botrys*.

Concentration (ppm)	PFO model			
	$k_{ads,1}$ (min^{-1})	$q_{e,exp}$ (mg g^{-1})	$q_{e,cal}$ (mg g^{-1})	R^2
50	0,0468	171,4	90,74	0,9989
100	0,1769	385,7	418,5	0,9997
150	0,1122	507,15	176,69	0,9992

Concentration (ppm)	PSO model		
	$k_{ads,2}$ ($\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$)	$q_{e,cal}$ (mg g^{-1})	R^2
50	$1,9 \cdot 10^{-3}$	178,57	0,9976
100	$1,2 \cdot 10^{-3}$	400	0,9987
150	$2,3 \cdot 10^{-3}$	526,32	0,9998

Freundlich isotherm model

Although the experimental data were evaluated using the linear equations of both the Langmuir (LI) and Freundlich isotherms (FI) (Equ.3), the results were only fitted to the FI model (Figure 10). Accordingly, it can be concluded that the adsorption occurs on a heterogeneous surface and the adsorption is strong because the n value is less than 1.

$$\log q_e = \log k + \frac{1}{n} \log C_e \quad (3)$$

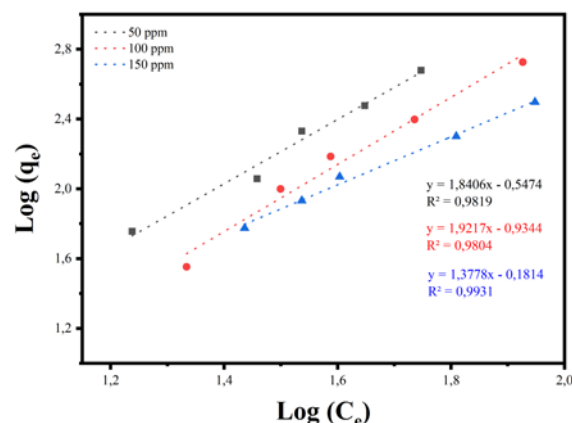


Figure 10. The linear drawings of Freundlich isotherm model of the adsorption

The data in the Table 2 presents the FI constants (k and n) for the adsorption of Cu(II) ions on activated carbon at different temperatures. Since the LI model does not fit the experimental data, it can be concluded that adsorption does not occur on a homogeneous surface with monolayer adsorption; instead, the FI model suggests multilayer adsorption on a heterogeneous surface. The increase in " k " constants with temperature suggests an endothermic process, meaning adsorption efficiency improves at higher temperatures.

The adsorption of Cu(II) onto activated carbon follows a PSO kinetic model, indicating chemisorption as the dominant mechanism. However, the isotherm data fits the FI model, suggesting multilayer adsorption on a heterogeneous surface rather than monolayer adsorption. This implies a two-stage process: initial physisorption through weak interactions, followed by chemisorption at high-energy sites via surface complexation or ion exchange. The increasing adsorption capacity with temperature further supports the involvement of chemisorption. Overall, the process can be described as heterogeneous chemisorption, where strong chemical interactions dominate, but weaker physical interactions also contribute.

Table 2 FI model parameters for adsorption

Temperature (K)	FI model		
	k	n	R^2
298	0,2835	0,5433	0,9819
308	0,361	0,623	0,9804
318	0,6586	0,7258	0,9931

CONCLUSION

This study successfully synthesized activated carbon

from *Chenopodium botrys* using K_2CO_3 activation and demonstrated its effectiveness for Cu(II) removal. The physicochemical characterization of the prepared activated carbon revealed a well-developed porous structure with abundant functional groups. The presence of hydroxyl, carboxyl, and aromatic functional groups contributed to enhanced adsorption performance by providing active binding sites for Cu(II) ions. The adsorption process was systematically evaluated under different conditions. Adsorption experiments showed that Cu(II) removal was pH-dependent, with maximum adsorption occurring at pH 2. Adsorption equilibrium was rapidly attained within the first 20 minutes, indicating a high affinity between the activated carbon's surface and Cu(II) ions. As the initial Cu(II) concentration rose, the adsorption capacity rose as well, but the % removal fell, indicating that the accessible adsorption sites were gradually saturated. Furthermore, because there were more active sites present at larger adsorbent dosages, the adsorption capacity per gram of adsorbent dropped.

Indicating that chemisorption was a major factor in Cu(II) uptake, kinetic modeling revealed that the adsorption process followed a PSO kinetic model. The experimental data was best fitted by the FI model, which showed multilayer adsorption over a heterogeneous surface. The endothermic character of the process was proved by the increasing FI constant (k) with temperature, suggesting that higher temperatures improved adsorption efficiency.

Overall, the findings demonstrate the potency of activated carbon generated from *Chenopodium botrys* as a sustainable and efficient material for the uptake of Cu(II).

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was derived from Ramazan ASTAN's master's thesis.

REFERENCES

- [1] Zamora-Ledezma C., Negrete-Bolagay D., Figueroa F., Zamora-Ledezma E., Ni M., Alexis F., Guerrero V. Heavy metal water pollution: A fresh look about hazards, novel and conventional remediation methods, *Environmental Technology & Innovation*. 22 101504, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101504>
- [2] Kumar V., Parihar R., Sharma A., Bakshi P., Sidhu G., Bali A., Karaouzas I., Bhardwaj R., Thukral A., Gyasi-Agyei Y., Rodrigo-Comino J. Global evaluation of heavy metal content in surface water bodies: A meta-analysis using heavy metal pollution indices and multivariate statistical analyses, *Chemosphere*. 236 124364, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124364>
- [3] Aziz K., Mustafa F., Omer K., Hama S., Hamarawf R., Rahman K. Heavy metal pollution in the aquatic environment: efficient and low-cost removal approaches to eliminate their toxicity: a review, *RSC Advances*. 13 17595–17610, 2023. <https://doi.org/10.1039/d3ra00723e>
- [4] Ekinci S., Onat E., Atiç S. Optimized synthesis and characterization of activated carbon from corn silk and corn silk hydrochar, *ChemistrySelect*. 10(5) e202405854, 2025. <https://doi.org/10.1002/slct.202405854>
- [5] Ekinci S., Onat E. Activated carbon assisted cobalt catalyst for hydrogen production: synthesis and characterization, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 26(2) 455-471, 2024. <https://doi.org/10.25092/baunfbd.1297146>
- [6] Smriti A.A., Lodhi A., Shukla S. Copper toxicity in aquatic ecosystem: A Review, *International Journal of Fisheries and Aquatic Studies*. 11(4) 134-138, 2023. <https://doi.org/10.22271/fish.2023.v11.i4b.2835>
- [7] Liu Y., Wang H., Cui Y., Chen N. Removal of Copper Ions from Wastewater: A Review, *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 20(5) 3885, 2023. <https://doi.org/10.3390/ijerph20053885>
- [8] Comber S., Deviller G., Wilson I, Peters A, Merrington G, Borrelli P, Baken S. (2022). Sources of copper into the European aquatic environment, *Integrated Environmental Assessment and Management*. 19(4) 1031–1047, 2023. <https://doi.org/10.1002/ieam.4700>
- [9] Krayem M., Khatib S., Hassan Y., Deluchat V., Labrousse P. In search for potential biomarkers of copper stress in aquatic plants, *Aquatic Toxicology*. 239 105952, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2021.105952>
- [10] Castaldo G., Flipkens G., Pillet M., Town R., Bervoets L., Blust R., Boeck G. Antagonistic bioaccumulation of waterborne Cu(II) and Cd(II) in common carp (*Cyprinus carpio*) and effects on ion-homeostasis and defensive mechanisms, *Aquatic Toxicology*. 226 105561, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2020.105561>
- [11] Keller A., Adeleye A., Conway J., Garner K., Zhao L., Cherr G., Hong J., Gardea-Torresdey J., Godwin H., Hanna S., Ji Z., Kaweeteerawat C., Lin S., Lenihan H.M., et al. Comparative environmental fate and toxicity of copper nanomaterials, *NanoImpact*. 7 28-40, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.IMPACT.2017.05.003>
- [12] Tumamos S., Ensano B., Pingul-Ong S., Ong D., Kan C., Yee J., De Luna M. Isotherm, kinetics and thermodynamics of Cu(II) and Pb(II) adsorption on groundwater treatment sludge-derived manganese dioxide for wastewater treatment Applications, *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 18(6) 3050, 2021; <https://doi.org/10.3390/ijerph18063050>
- [13] Onat E., Ekinci S., A new material fabricated by the combination of natural mineral perlite and graphene oxide: Synthesis, characterization, and methylene blue removal, *Diamond and Related Materials*. 143 110848, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2024.110848>
- [14] Adame-Pereira M., Durán-Valle C., Fernández-González C.. Hydrothermal carbon coating of an activated carbon—A new adsorbent, *Molecules*. 28(12) 4769, 2023. <https://doi.org/10.3390/molecules28124769>
- [15] Wang X., Cheng H., Ye G., Fan J., Yao F., Wang Y., Jiao Y., Zhu W., Huang H., Ye D. Key factors and primary modification methods of activated carbon and their application in adsorption of carbon-based gases: A review, *Chemosphere*. 287(2) 131995, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131995>
- [16] Ukanwa K., Patchigolla K., Sakrabani R., Anthony E., Mandavgane S. A review of chemicals to produce activated carbon from agricultural waste biomass, *Sustainability*. 11(22) 6204, 2019. <https://doi.org/10.3390/su11226204>
- [17] Blachnio M., Deryło-Marczewska A., Charnas B., Zienkiewicz-Strzałka M., Bogatyrov V., Galaburda M. Activated carbon from agricultural wastes for adsorption of organic pollutants, *Molecules*. 25(21) 5105, 2020. <https://doi.org/10.3390/molecules25215105>
- [18] Nazem M., Zare M., Shirazian S. Preparation and optimization of activated nano-carbon production using physical activation by water steam from agricultural wastes, *RSC Advances*. 10,1463 – 1475, 2020. <https://doi.org/10.1039/c9ra07409k>
- [19] Wu H., Chen S., Liao W., Wang W., Jang M., Chen W., Ahamad T., Alshehri S., Hou C., Lin K., Charinpanitkul T., Wu K. Assessment of agricultural waste-derived activated carbon in multiple applications, *Environmental Research*. 191 110176, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110176>
- [20] Lewoyehu M. Comprehensive review on synthesis and application of activated carbon from agricultural residues for the

- remediation of venomous pollutants in wastewater, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 159 105279, 2021. <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2021.105279>
- [21] Kosheleva R., Mitropoulos A., Kyzas G. Synthesis of activated carbon from food waste, *Environmental Chemistry Letters*. 17 429-438, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0817-5>
- [22] Bojilov D., Manolov S., Nacheva A., Dagnon S., Ivanov I. Characterization of polyphenols from chenopodium botrys after fractionation with different solvents and study of their in vitro biological activity, *Molecules*. 28(12) 4816, 2023. <https://doi.org/10.3390/molecules28124816>
- [23] Gupta N., Sagar R., Kori M. Hepatoprotective potential of methanolic and aqueous extract of chenopodium botrys against lead-induced toxicity, *International Journal of Pharmaceutical Investigation*. 11(2) 165-169, 2021. <https://doi.org/10.5530/IJPI.2021.2.30>
- [24] Sezer E., Uysal T. Phenolic screening and biological activities of *Chenopodium botrys* L. extracts, *Anatolian Journal of Botany*. 5(2) 78-83, 2021. <https://doi.org/10.30616/AJB.890324>
- [25] Wang L., Sun F., Hao F., Qu Z., Gao J., Liu M., Wang K., Zhao G., Qin Y. A green trace K_2CO_3 induced catalytic activation strategy for developing coal-converted activated carbon as advanced candidate for CO_2 adsorption and supercapacitors, *Chemical Engineering Journal*. 383 123205, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123205>
- [26] Peter O., Adeyinka O., Akolade R. Application of snail shell chitosan as a bioadsorbent in removal of copper (II) ions from wastewater, *Earthline Journal of Chemical Sciences*. 2(1) 141-151, 2019. <https://doi.org/10.34198/EJCS.2119.141151>
- [27] Cheng X., Wei M., Tian G., Luo Y., Hua W. Vibrationally-resolved X-ray photoelectron spectra of six polycyclic aromatic hydrocarbons from first-principles simulations, *The Journal of Physical Chemistry A*. 126(33) 5582-5593, 2022. <https://doi.org/10.1021/acs.jpca.2c04426>
- [28] Hong T., Yin J.Y., Nie S.P., Xie M.Y. Applications of infrared spectroscopy in polysaccharide structural analysis: Progress, challenge and perspective, *Food Chemistry: X*. 12 100168, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2021.100168>
- [29] Torrellas S.A., Lovera R.G., Escalona N., Sepúlveda C., Sotela J.L., Garcia J. Chemical-activated carbons from peach stones for the adsorption of emerging contaminants in aqueous solutions, *Chemical Engineering Journal*. 279 788-798, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2015.05.104>
- [30] Gezer B. Cu (II) adsorption with activated carbon obtained from sea urchin prepared by ultrasound-assisted method, *Nigde Omer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*, 9(2) 770-780, 2020. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.700773>
- [31] Ekinci S. Production of hydrochar from corn silk by hydrothermal carbonization technique and its modification for more effective removal of Cr (VI). *Journal of Chinese Chemical Society*. 71(1) 84-98, 2024. <https://doi.org/10.1002/jccs.202300342>
- [32] Ekinci S. Elimination of methylene blue from aqueous medium using an agricultural waste product of crude corn silk (*Stylus maydis*) and corn silk treated with sulphuric acid, *ChemistrySelect*. 8(18) e202300284, 2023. <https://doi.org/10.1002/slct.202300284>
- [33] Onat E., Ekinci S. Investigation of chromium (VI) heavy metal removal from water using activated carbon produced by hydrothermal pretreatment from industrial waste. In book: *Science and Mathematics in a Globalizing World*. Duvar Publishing, pp:45-61, April 2023.

Investigation of Antiproliferative Effects of *Heracleum persicum* Extracts on Glioblastoma Multiforme Cell Line

Kemal Alp NALCI¹, Leyla GÜVEN², Ravza MANTO¹, Nefise ŞENTÜRK¹, Gökhan DERVİŞOĞLU³, Fethi Ahmet ÖZDEMİR³, Umut Furkan BAYRAM¹, Muhammed Enes YILMAZ³, Sedanur YÖNDEŞ³, Adnan ÇETİN⁴

¹Department of Pharmacology, Faculty of Pharmacy, Van Yüzüncü Yıl University, Van, Türkiye

²Department of Pharmaceutical Botany, Faculty of Pharmacy, Ataturk University, Erzurum Türkiye,

³Department of Molecular Biology and Genetics, Faculty of Arts and Sciences, Bingöl University, Bingöl, Türkiye

⁴Department of Chemistry, Faculty of Education, Van Yüzüncü Yıl University, Van, Türkiye

✉: adnancetin@yyu.edu.tr

 [0000-0003-3786-5246](https://orcid.org/0000-0003-3786-5246)  [0000-0002-3189-6415](https://orcid.org/0000-0002-3189-6415)  [0000-0001-5983-9909](https://orcid.org/0000-0001-5983-9909)  [0000-0002-8776-522X](https://orcid.org/0000-0002-8776-522X) 
 [0000-0001-7195-2031](https://orcid.org/0000-0001-7195-2031)  [0000-0001-7215-9692](https://orcid.org/0000-0001-7215-9692)  [0009-0008-7836-8469](https://orcid.org/0009-0008-7836-8469)  [0000-0003-2574-4674](https://orcid.org/0000-0003-2574-4674)
 [0009-0001-5056-2488](https://orcid.org/0009-0001-5056-2488)  [0000-0003-4838-1503](https://orcid.org/0000-0003-4838-1503)

Received (Geliş): 19.03.2025

Revision (Düzeltilme): 22.04.2025

Accepted (Kabul): 08.05.2025

ABSTRACT

Heracleum persicum (*H. persicum*) is a plant known for its anti-inflammatory, analgesic, anticonvulsant, and antioxidant properties. In this study, the antiproliferative effects of ethanolic leaf and root extracts of the plant on human Glioblastoma Multiforme U-87MG cell line were evaluated. The leaf and root extracts were applied at concentrations of 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} , and 10^{-6} mg/mL for 24 and 72 hours, and cell viability was determined using MTT assay. The results showed that at a concentration of 10^{-1} mg/mL for 24 hours, the leaf and root extracts caused cell death at rates of 76% and 81%, respectively. In the 72-hour application, the leaf extract at a concentration of 10^{-1} mg/mL led to 83% cell death, while the root extract at the same concentration caused 92% cell death. These findings demonstrate that *H. persicum* extracts exhibit antiproliferative effects on U-87MG cell line and suggest their potential as therapeutic agents.

Keywords: Antiproliferative effect, Cancer cells, Glioblastoma multiforme, *Heracleum persicum*, Plant extracts

Heracleum persicum Ekstraktlarının Glioblastoma Multiforme Hücre Hattı Üzerindeki Antiproliferatif Etkilerinin Araştırılması

ÖZ

Heracleum persicum (*H. persicum*), anti-inflamatuvar, analjezik, antikonvülzan ve antioksidan özellikleriyle bilinen bir bitkidir. Bu çalışmada, bitkinin etanolik yaprak ve kök ekstrelerinin insan Glioblastoma Multiforme U-87MG hücre hattı üzerindeki antiproliferatif etkileri değerlendirildi. Yaprak ve kök ekstreleri 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} ve 10^{-6} mg/mL konsantrasyonlarında 24 ve 72 saat süreyle uygulanarak hücre canlılıkları MTT testi ile belirlendi. Sonuçlar, 10^{-1} mg/mL konsantrasyonunda 24 saatte yaprak ve kök ekstrelerinin sırasıyla %76 ve %81 oranında hücre ölümüne neden olduğunu gösterdi. 72 saatlik uygulamada, yaprak ekstresinin 10^{-1} mg/mL konsantrasyonu %83 oranında hücre ölümüne yol açarken, kök ekstresinin 10^{-1} mg/mL konsantrasyonu %92 oranında hücre ölümüne neden oldu. Bu bulgular, *Heracleum persicum* ekstrelerinin U-87MG hücre hattında antiproliferatif etki gösterdiğini ve potansiyel terapötik ajanlar olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Antiproliferatif etki, Bitki ekstraktları, Glioblastoma multiforme, *Heracleum persicum*, Kanseri hücreleri

INTRODUCTION

Cancer is a disease of multifactorial etiology that entails abnormal cell growth and metastasis. Some of the causative factors are genetic mutations, environmental and lifestyle. If not detected early, it may spread to other organs and make the process of treatment complex. Cancer is one of the most severe threats to public health

at present, affecting the lives of millions of people. Therefore, understanding the biological mechanisms of cancer, developing new forms of treatment and implementing preventive methods are of utmost importance [1]. According to data from the United States Central Brain Tumor Registry between 2013 and 2017, Glioblastoma Multiforme (GBM) comprises 45% of all primary brain and other central nervous system tumors

and accounts for 48.6% of malignant tumors. GBM is more frequently observed in white populations and males compared to females, with its incidence increasing with age. Since 1940, GBM has been classified by Hans-Joachim into two subtypes: primary and secondary. Primary GBM constitutes 90-95% of all GBM cases, characterized by rapid development of clinical symptoms within the first 3 months. Secondary GBM represents 5-10% of cases, typically occurring in younger individuals, with symptoms appearing over several months to a year [2]. Initial symptoms observed in GBM-diagnosed patients include increased intracranial pressure, headache, neurological disorders, visual disturbances, speech impairments, nausea, vomiting, memory loss, and seizures. These symptoms result from elevated pressure due to rapid tumor growth, with clinical manifestations varying according to the tumor's anatomical location [3]. Each year, approximately 5-6 cases per 100,000 individuals are diagnosed with primary malignant brain tumors, about 80% of which are malignant gliomas (MG). GBM accounts for the majority of MG cases and exhibits high mortality and morbidity rates [4]. Surgical resection is the primary treatment method. When surgery is not feasible, radiotherapy or chemotherapy is employed. After surgical resection, despite multimodal treatments including radiotherapy and chemotherapy, median survival is 12-15 months and the 5-year survival rate is approximately 7.2% [5]. Chemotherapy and pharmacotherapy are administered to GBM cells distributed in various brain regions post-surgery. Temozolomide, Carmustine, Lomustine, Bevacizumab, and Regorafenib are currently used widely, either individually or in combination, for GBM treatment [6]. Despite these therapeutic advances, the prognosis for GBM patients remains dismal, highlighting the necessity for continued research into novel therapeutic agents with improved efficacy, specificity, and safety profiles [7]. Plant-based compounds, in particular, have garnered increasing attention for their pharmacological versatility and lower toxicity compared to synthetic chemotherapeutics [8]. Natural products have historically served as the basis for many cancer therapies, and emerging studies support their potential in targeting key oncogenic pathways in GBM [7]. GBM has a poor prognosis due to limited blood-brain barrier penetration, significant side effects, and inadequate specificity to brain cancer cells. Consequently, there is an ongoing search for alternative therapeutic approaches [9]. One study reported that nano-drug delivery systems loaded with Metformin and Irinotecan exhibited greater anticancer efficacy against GBM compared to standard therapies without carriers [10]. Another study demonstrated molecular treatment strategies for GBM using the CRISPR/CAS9 gene-editing technique and T-cell-based immunotherapies [11]. In a botanical study conducted in 2019, Curcumin was shown to target multiple signaling pathways involved in glioblastoma invasiveness and drug resistance, including those associated with glioma stem cell activity [12]. A review published in 2020 indicated that Quercetin exhibited

antitumor and antiproliferative activities on GBM cells, potentially playing a significant role in GBM treatment [13]. In another botanical study, the essential oil and hydroalcoholic extract of *H. persicum* demonstrated significant anti-inflammatory and analgesic effects by notably reducing abdominal contractions and pain responses induced by acetic acid [14]. Furthermore, in an experimental seizure model, dose-dependent anticonvulsant activity was observed with *H. persicum* seeds [15]. In the present study, the antiproliferative effects of *H. persicum* leaf and root extracts on the human GBM U-87MG cell line were investigated. This study is one of the few that comparatively evaluates both the leaf and root components of *H. persicum* on a GBM cell line, thus contributing to the limited oncobotanical research in this area. The major objective of this study was to evaluate the antiproliferative effects of ethanolic leaf and root extracts of the plant on GBM cell line. For this purpose, the effects of utilizing extracts at different concentrations on cell viability were investigated. The sub-objectives of the study were to compare leaf and root extracts for their cytotoxic potentials, to determine how the time of application (24 and 72 hours) influenced the viability of the cells and to investigate the dose-dependent effects through MTT test. The results may serve as a foundational step toward future mechanistic studies, including apoptosis assays, molecular pathway profiling, and *in vivo* validations. Data obtained assisted in evaluating the plant for its potential as a biological agent in cancer management.

MATERIAL and METHODS

2.1. Collection and Drying of *H. persicum* Plant

The *H. persicum* plant was collected in Van in May 2022. It was dried in a clean environment at room temperature, away from direct sunlight. The collection and drying of *H. persicum* were carried out by our research team.

2.2. Preparation of *H. persicum* Plant Extract

Obtaining extracts from the leaves and roots of *H. persicum* was carried out by making minor modifications based on the method proposed in the study of Zheleva-Dimitrova, et al. [16]. Briefly, the root and fruit of the plant, dried in the shade, were ground into powder using a grinder. A total of 150 g of powdered *H. persicum* root and fruit was macerated overnight in 1.5 L methanol. After maceration, extraction was carried out at room temperature for 24 hours using a mixer. This extraction procedure was repeated three times. After each extraction, the extracts were filtered, and the filtrates combined and evaporated to dryness using a rotary evaporator at 40 °C and 120 rpm. Finally, the extracts were dissolved in water and lyophilized.

2.3. Cell Culture

2.3.1 Preparation of Cell Culture Medium

89 mL ready-made cell culture medium (RPMI-1640), 10 mL Fetal Bovine Serum (FBS), 1 mL Penicillin+Streptomycin+Amphotericin B substances

were added to obtain a ready-made cell culture medium. That ratio was used for whole experiment [17].

2.3.2 Cell Incubation Conditions

Cells obtained from ATCC HTB-14™ were used. These cells were incubated in ready-made medium (RPMI-1640) in a 5% CO₂ and 37°C oven (Nuaire) in 25 cm² flasks under sterile conditions. Thus, the cells were allowed to proliferate [18].

2.3.3 Subculturing of Cells

When the reproducing cell passages reached 80-90% confluent, they were re-passaged. For this purpose, when the reproducing cells reached the desired majority; the medium in the flasks was taken with a pipette and washed with sterile phosphate buffer solution (PBS) (2 mL for 25 cm²). Then, the PBS was removed with a pipette and 3 mL of trypsin-EDTA solution was added to remove the cells from the area where they adhered and kept in the oven for 10 minutes. After removing the cells that adhered to the entire surface, the suspended cell + trypsin-EDTA solution was taken into a 15 mL tube. Medium twice the volume of trypsin was added to the solution for trypsin inhibition. The suspension in the tube was centrifuged at 1300 rpm for 10 minutes, then the trypsin-EDTA solution was removed, and the cells were suspended with fresh cell medium and divided into 3 25 cm² flasks; it was re-passaged. The re-passaged cells were incubated at 37°C in a 5% CO₂ environment.

2.3.4 Freezing and Storage of Cells

The cells lifted from the surface with trypsin-EDTA were centrifuged and the trypsin was removed from the medium. Then the cell pellet was diluted with 1 mL medium and the cell count was performed. Trypsin was inhibited with at least twice the volume of serum medium. The cells were pipetted into a single cell suspension and transferred to a falcon tube. 2-3 mL more medium will be added. The cell suspension was centrifuged at 1300 rpm for 10 minutes and the supernatant was removed. The pellet was diluted with 900 µL of cell medium and counted. The cell solution suspended with 100 µL of dimethyl sulfoxide (DMSO) and 900 µL of cell medium was added to the freezing tubes. The tubes were placed in the freezing container and stored in the deep freezer at -80°C to be used when needed.

2.3.5 Calculation of Cell Numbers

10 µL of the cell suspension diluted in 1 mL of culture medium was taken and placed in an Eppendorf tube and 90 µL of trypan blue dye was added and mixed. This mixture was placed on a Neubauer slide and the cells in 5 compartments were counted. This number found was multiplied by the dilution amount of 50,000. As a result, it was found how many million cells there were in 1 mL of medium. Thus, the number to be seeded was determined and the cells were seeded in petri dishes. 5x10⁶ cells were transferred to a 100 mm culture petri

dish and 5000 cells were transferred to each well of a 96-well culture plate.

2.4. Cell Proliferation Analysis

2.4.1. MTT Method

MTT assay is a method in which the amount of cell growth is determined by the colorimetric determination of formazan dyes or enzymatic activity due to MTT reduction. With this method, the cytotoxic or proliferative effects of any therapeutic agent to be used on the cell can be determined. The method is based on the principle of colorimetric determination of the color change in cells incubated with MTT agent. The resulting color change is the result of the decrease in tetrazolium salt in the active cell mitochondria of formazan salts colored yellow. The absorbance value of these compounds is proportional to the determination of their metabolic activities [19, 20].

2.4.2. Method of Application

1 day before the application of the MTT method, 5000 cells (5000/well) were counted in a 96-well plate and 100 µL medium was prepared and planted in the wells. The microplate was kept in an incubator set at 37°C and 5% CO₂ for 24 hours, and the cells were allowed to adhere to the surface. In this way, the damage caused by the trypsin enzyme on cell membrane proteins and 27 growth factor receptors was eliminated. A 24-hour period is required for the re-synthesis of these proteins and growth factors. In addition, in this way, the cells are provided with metabolic activity before the treatment of therapeutic agents in the medium with the cells. After 24 hours of incubation, the plant extracts prepared in serial dilutions was added to the cell line medium divided into groups in series. (100 µL of diluted extract was added to the 100 µL medium and cell mixture and its concentration was adjusted). The first column of the A series was set as cell control and the second column as medium control. The MTT method was applied to the cell line to which the extract was applied after 24 and 72 hours of incubation [21].

2.5 Statistical Analysis

All experiments were performed in triplicate and the experimental results on cytotoxic activities of *H. persicum* leaf and root extracts show the means ± standard deviation (SD). Statistical analyses were performed using the One-Way ANOVA Duncan test in the IBM SPSS Statistics 20 program. *p* <0.05 was considered significant at the significance level. The graphs and IC₅₀ values were created, edited and determined using GraphPad Prism 8.0 software.

RESULT and DISCUSSION

Plant extracts could emerge as promising candidates in GBM research due to their diverse bioactive compounds, which exhibit antiproliferative, pro-apoptotic, and anti-inflammatory properties. Many phytochemicals, such as flavonoids, alkaloids, and polyphenols, have

demonstrated the ability to modulate key signaling pathways involved in GBM progression, including those regulating cell cycle arrest, oxidative stress, and angiogenesis. Moreover, plant-derived compounds often show lower toxicity compared to conventional chemotherapeutics, making them attractive for combination therapies to enhance treatment efficacy while minimizing side effects. The main aim of this study was to evaluate the effects of the plant extracts on GBM cell line after certain time intervals. Here, it was planned to evaluate the variation that occurred with time by treating the cells with the extracts for different time intervals. It was hence tried to determine whether the antiproliferative effect of the extracts was time dependent and at which time they were most effective. In the 24-hour treatment, the 10^{-1} mg/mL dose resulted in 76% cell death compared to the control and other groups. The IC_{50} value for the 24-hour period was found to be 33 μ g/mL. Other groups did not cause statistically significant cell death compared to the control group (Fig 1).

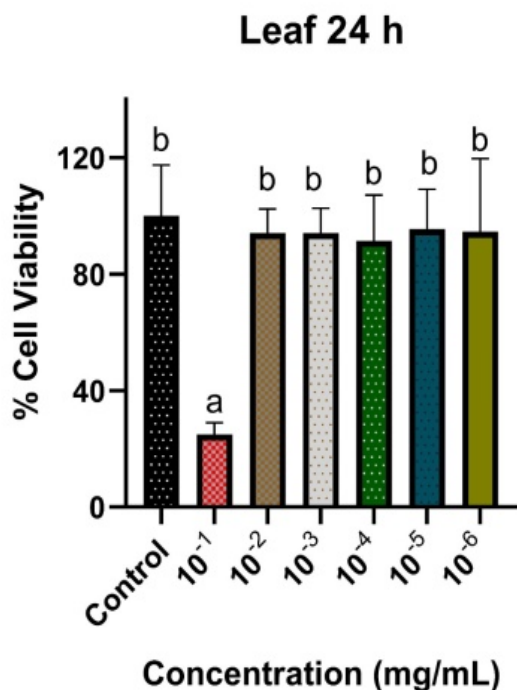


Figure 1. Cell viability (% control) in U-87 MG human glioblastoma cells after 24 h incubation with different concentrations of *H. Persicum* leaf extract. a, b: Groups with different letters indicate statistically significant differences when compared to each other.

In the 72-hour treatment, similarly, the 10^{-1} mg/mL dose led to statistically significant cell death of 83% compared to the control group. The IC_{50} value at 72 hours was also found to be 46 μ g/mL. Other doses demonstrated effects similar to the 24-hour treatment, and additionally, cell viability-enhancing effects were observed at lower doses (Fig 2).

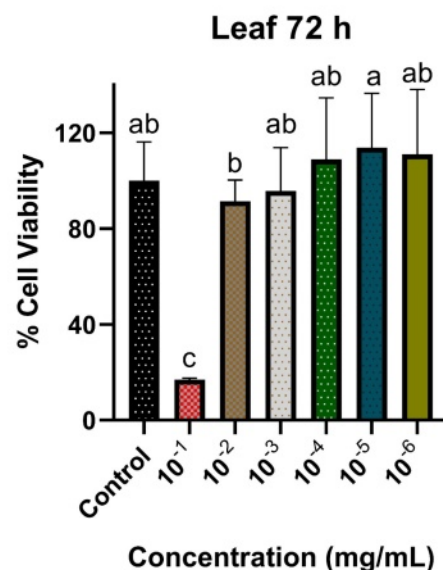


Figure 2. Cell viability (% control) in U-87 MG human glioblastoma cells after 72 h incubation with different concentrations of *H. Persicum* leaf extract. a, b, c: Groups with different letters indicate statistically significant differences when compared to each other.

In the 24-hour treatment, the 10^{-1} mg/mL dose was statistically significant compared to the control and other groups, resulting in 81% cell death. The IC_{50} value for 24 hours was 86 μ g/mL. Other doses were not statistically significant (Fig 3).

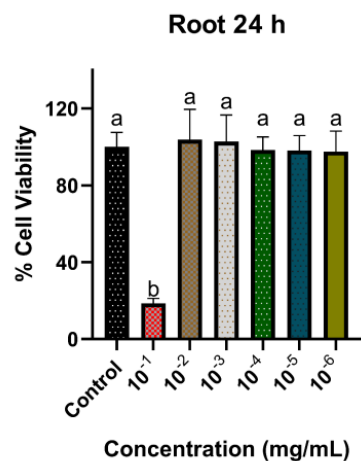


Figure 3. Cell viability (% control) in U-87 MG human glioblastoma cells after 24 h incubation with different concentrations of *H. Persicum* root extract. a, b: Groups labeled with different letters indicate statistically significant differences compared to each other.

In the 72-hour treatment, similarly, the 10^{-1} mg/mL dose led to statistically significant cell death of 92% compared to the control group. The IC_{50} value for 72 hours was determined as 11 μ g/mL (Fig 4). Groups labelled with different letters indicate statistically significant differences compared to each other.

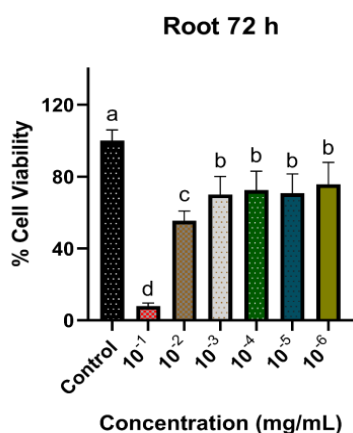


Figure 4. Cell viability (% control) in U-87 MG human glioblastoma cells after 72 h incubation with different concentrations of *H. Persicum* root extract. a, b, c, d: Groups labeled with different letters indicate statistically significant differences compared to each other.

Each year, approximately 440,000 individuals worldwide are diagnosed with brain tumors, and 80% of these cases are GBM. GBM is classified as the most severe form of primary brain tumors by the Alifieris & Trafalis, 2015. The World Health Organization classifies GBM based on glial cell origin, proliferation rate, vascularization, presence of necrosis, and response to treatment [22]. Previous studies have reported that *H. persicum* possesses various pharmacological activities, including anti-inflammatory, analgesic, anticonvulsant, and antioxidant effects [23]. Sayyah et al. reported anticonvulsant activity in a dose-dependent manner in *H. persicum* seeds using experimental seizure models. Hajhashemi et al. reported that the essential oil and hydroalcoholic extracts of *H. persicum* significantly reduced pain response and demonstrated anti-inflammatory and analgesic activities. However, the anticancer effects of *H. persicum* on GBM cells have not been previously investigated. This study evaluated the anticancer effects of leaf and root ethanolic extracts of *H. persicum* against the human GBM U-87MG cell line. The MTT assay was employed to assess cell viability. This method detects viable cells by reducing NADPH⁺ to NADP⁻, forming formazan crystals from the tetrazolium salt [24]. The crystals are dissolved in dimethyl sulfoxide (DMSO), producing a blue-purple color measurable at an optical density of 570 nm [25]. In this study, the most effective doses of *H. persicum* root and leaf extracts ranged between 10 µg/mL and 100 µg/mL. The IC₅₀ values of the leaf extracts at 24 and 72 hours were 33 µg/mL and 46 µg/mL, respectively, whereas the IC₅₀ values of the root extracts at 24 and 72 hours were 86 µg/mL and 46 µg/mL, respectively. Therefore, the most promising antineoplastic activity was observed with the root extract after 72 hours of exposure. Further fractionation and purification of the root extract through various methods may reveal potential active pharmaceutical compounds. Future studies investigating potential synergistic effects of these compounds, their pharmacokinetic profiles, and their underlying

antineoplastic mechanisms would enhance understanding of the therapeutic potential of this extract.

CONCLUSION

In conclusion, leaf and root extracts of *H. persicum* demonstrated antiproliferative effects on the U-87MG cancer cell line, potentially via apoptotic or oxidative stress pathways. To the best of our knowledge, there are no prior studies specifically evaluating the antiproliferative effects of *H. persicum* root and leaf extracts on glioblastoma cell viability. To better understand the molecular mechanisms underlying this process, further in vivo and in vitro studies are crucial. These studies can enlighten us on the intricate biochemical processes involved, collecting relevant information on their functional importance. Through conducting extensive research at cellular and organismal levels, scientists can refine therapeutic approaches, enhance drug development techniques, and determine potential targets for medical treatment.

Acknowledgment: This study was supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) 2209-A (Project No: 1919B012221674).

Conflict of interest: The authors of the articles declare that they have no conflict of interest.

Summary of Declaration of Contribution of Researchers: Authors declare that they have contributed equally to the article.

REFERENCES

- [1] Keskin, E., Elmas, Ö., Aydin, H.A., Şimşek, K., Gün, E., Kalaycı, M. Glioblastome Multiforme Epidemiyolojisi, Tedavi Seçenekleri ve Sağ Kalım Süresi: Retrospektif Tek Merkezli Çalışma, *Batı Karadeniz Tıp Dergisi*, 5:2 248-255, 2021.
- [2] Brem, S., Abdullah, K.G. Glioblastoma E-Book. Elsevier Health Sciences, 2016.
- [3] Sanli, A.M., Turkoglu, E., Dolgun, H., Sekerci, Z. Unusual manifestations of primary Glioblastoma Multiforme: A report of three cases, *Surgical neurology international*, 1 87, 2010.
- [4] Alifieris, C., Trafalis, D.T. Glioblastoma multiforme: Pathogenesis and treatment, *Pharmacology & therapeutics*, 152 63-82, 2015.
- [5] Mann, J., Ramakrishna, R., Magge, R., Wernicke, A.G. Advances in radiotherapy for glioblastoma, *Frontiers in neurology*, 8 748, 2018.
- [6] Shergalis, A., Bankhead III, A., Luesakul, U., Muangsin, N., Neamati, N. Current challenges and opportunities in treating glioblastoma, *Pharmacological reviews*, 70:3 412-445, 2018.
- [7] Omuro, A., DeAngelis, L.M. Glioblastoma and other malignant gliomas: a clinical review. *Jama*, 310:17 1842-1850, 2013.

- [8] Cragg, G.M., Newman, D.J. Natural products: a continuing source of novel drug leads. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects*, 1830:6 3670-3695, 2013.
- [9] Bozkurt, E., Atmaca, H., Uzunoğlu, S., Glioblastoma tümörlerinde çoklu ilaç direnci, *Genel Tıp Dergisi*, 23:4 133-143, 2013.
- [10] Taghizadehghalehjoughi, A., Hacimuftuoglu, A., Cetin, M., Ugur, A.B., Galateanu, B., Mezhev, Y., Okkay, U., Taspinar N., Uyanik, A., Gundogdu, B., Mohammadzadeh, M., Nalci, K.A., Stivaktakis, P., Tsaktakis, A., Jung, T.W., Jeong, J.H., El-Aty, A. A. Effect of metformin/irinotecan-loaded poly-lactic-co-glycolic acid nanoparticles on glioblastoma: In vitro and in vivo studies, *Nanomedicine*, 13:13 1595-1606, 2018.
- [11] Sarkaria, J.N., Hu, L.S., Parney, I.F., Pafundi, D.H., Brinkmann, D.H., Laack, N.N., Giannini, C., Burns, T.C., Kizilbash, S.H., Laramy, J.K., Swanson, K.R., Kaufmann, T.J., Brown, P.D., Agar, N.Y.R., Galanis, E., Buckner, E., Elmquist, W.F. Is the blood-brain barrier really disrupted in all glioblastomas? A critical assessment of existing clinical data. *Neuro-oncology*, 20:2 184-191, 2018.
- [12] Shahcheraghi, S.H., Zangui, M., Lotfi, M., Ghayour-Mobarhan, M., Ghorbani, A., Jaliani, H.Z., Sadeghnia, H.R., Sahebkar, A., Therapeutic potential of curcumin in the treatment of glioblastoma multiforme, *Current pharmaceutical design*, 25:3 333-342, 2019.
- [13] Tavana, E., Mollazadeh, H., Mohtashami, E., Modaresi, S.M.S., Hosseini, A., Sabri, H., Soltani, A., Javid, H., Afshari, A.R., Sahebkar, A. Quercetin: a promising phytochemical for the treatment of glioblastoma multiforme, *BioFactors*, 46:3 356-366, 2020.
- [14] Hajhashemi, V., Sajjadi, S.E., Heshmati, M. Anti-inflammatory and analgesic properties of *Heracleum persicum* essential oil and hydroalcoholic extract in animal models, *J Ethnopharmacol*, 124:3 475-480, 2009.
- [15] Sayyah, M., Moaied, S., Kamalinejad, M. Anticonvulsant activity of *Heracleum persicum* seed, *J Ethnopharmacol*, 96 209-211, 2005.
- [16] Zheleva-Dimitrova, D., Sinan, K.I., Etienne, O. K., Ak, G., Sharmeen, J.B., Dervisoglu, G., Ozdemir, F.A., Mahomoodally, M.F., Zengin, G. Comprehensive chemical characterization and biological evaluation of two *Acacia* species: *A. nilotica* and *A. ataxacantha*, *Food and Chemical Toxicology*, 156 112446, 2021.
- [17] Dervisoglu G., Anticancer effects of sodium selenate in human neuroblastoma, breast cancer, and melanoma cells, *International Journal of Secondary Metabolite*, 12:1 225-234, 2025.
- [18] Maddigan, A., Truitt, L., Arsenault, R., Freywald, T., Allonby, O., Dean, J., Narendran, A., Xiang, J., Weng, A., Napper, A., Freywald, A. EphB Receptors Trigger Akt Activation and Suppress Fas Receptor-Induced Apoptosis in Malignant T Lymphocytes, *Journal of immunology*, 187:11 5983-5994, 2011.
- [19] Demirkaya, A., Gündoğdu, G., Karakaya, S., Yılmaz Taşci, Ş., Nalci, K., Hacimuftuoğlu, A. Does umbelliferone protect primary cortical neuron cells against glutamate excitotoxicity?, *Kafkas Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi*, 27:3 339-346, 2021.
- [20] Nalci, K.A., Mete, C., Demir, Z., Bildirici, İ., Cetin, A. Promising Anticancer Activity of Pyrazole Compounds against Glioblastoma Multiforme: Their Synthesis, In vitro, and Molecular Docking Studies, *Medicinal Chemistry*, 21:6 536-545, 2025.
- [21] Çelik, N., Işcan Yapar, M., Taghizadehghalehjoughi, A., Nalci, K. A. Influence of resveratrol application with pulp-capping materials on the genetic expression levels of stem cells, *International Endodontic Journal*, 53:9 1253-1263, 2020.
- [22] Hanif, F., Muzaffar, K., Perveen, K., Malhi, S. M., Simjee, S.U. Glioblastoma Multiforme: A Review of its Epidemiology and Pathogenesis through Clinical Presentation and Treatment, *Asian Pacific journal of cancer prevention*, 18:1 3, 2017.
- [23] Majidi, Z., Lamardi, S.S. Phytochemistry and biological activities of *Heracleum persicum* : a review, *Journal of Integrative Medicine*, 16:4 223-235, 2018.
- [24] Präbst, K., Engelhardt, H., Ringgeler, S., Hübner, H. Basic colorimetric proliferation assays: MTT, WST, and resazurin, *Cell viability assays: methods and protocols*, 1601 1-17, 2017.
- [25] Gavanji, S., Bakhtari, A., Famurewa, A.C., Othman, E.M. Cytotoxic Activity of Herbal Medicines as Assessed in Vitro: A Review, *Chemistry & Biodiversity*, 20:2 e202201098, 2023.

Integrating Queuing Theory and GBM for Dynamic Resource Allocation in 6G Networks

Tuğçe BİLEN✉

Yapay Zeka ve Veri Mühendisliği Bölümü, Bilgisayar ve Bilişim Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi
İstanbul, Türkiye

✉: bilent@itu.edu.tr  [0000-0001-6680-8748](https://orcid.org/0000-0001-6680-8748)

Received (Geliş): 09.04.2025

Revision (Düzeltilme): 02.05.2025

Accepted (Kabul): 20.05.2025

ÖZ

6G ağları, önceki nesillere kıyasla kesintisiz bağlantı ve önemli gelişmeler vaat etmektedir. Küçük hücreler, kapsama alanını artırarak, gecikmeyi azaltarak ve kapasiteyi yükselterek bu başarıda kritik bir rol oynar. Ancak, bu hücrelerin yoğun şekilde konuşlandırılması, büyük durum ve eylem uzayları nedeniyle kaynak tahsisi açısından zorluklar doğurur. Binlerce hücre için kararlar alınması gerekir ve kullanıcı hareketliliğinden kaynaklanan sık yeniden tahsisler algoritmik karmaşıklığı artırır. Bu durum gecikme, veri aktarım hızı ve paket kaybı gibi temel performans metriklerini olumsuz etkiler. Bu zorluklara çözüm olarak, kuyruk kuramına dayalı hücre durum tahmini ile Gradient Boosting Machine (GBM) öngörülerini birleştiren dinamik bir kaynak tahsis modeli öneriyoruz. Bu bütünlük yapı, bant genişliği, hesaplama kaynakları ve enerji kullanımının zamanında ve uyarlanabilir şekilde tahsis edilmesini sağlar. Simülasyon sonuçları, modelin gecikmeyi %35, paket kaybını %42 oranında azalttığını ve veri aktarım hızını %28 artırdığını göstermektedir. Bu kazanımlar, öngörüye dayalı ve uyarlanabilir kaynak yönetiminin 6G ağlarındaki etkinliğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: 6G, Gradient Boosting Makineleri, Kaynak Tahsisi, Kuyruk Teorisi, Küçük Hücreler

6G Ağlarında Dinamik Kaynak Tahsisi için Kuyruk Teorisi ve GBM'nin Entegrasyonu

ABSTRACT

6G networks promise seamless connectivity and major advancements over previous generations. Small cells play a critical role by enhancing coverage, reducing latency, and increasing capacity through proximity to users. However, their dense deployment introduces challenges in resource allocation due to vast state and action spaces. Decisions must be made for thousands of cells, and frequent reallocations from user mobility add algorithmic complexity. These factors degrade key performance metrics such as latency, throughput, and packet loss. To address this, we propose a dynamic resource allocation model combining queuing-theory-based cell state estimation with Gradient Boosting Machine (GBM) predictions. This integration enables timely and adaptive allocation of bandwidth, computing resources, and energy. Simulations show the proposed model reduces latency by up to 35%, packet loss by 42%, and improves throughput by 28% over static methods. These gains highlight the effectiveness of predictive, adaptive resource management for 6G networks.

Keywords: 6G, Gradient Boosting Machines, Queuing Theory, Resource Allocation, Small Cells

INTRODUCTION

6G can enable seamless connectivity by enabling significant improvements compared to previous generations. It aims to enhance connectivity and intelligence by utilizing advanced technologies such as terahertz (THz) spectrum and AI-driven algorithms [1]. Thanks to these technologies, 6G can achieve sub-millisecond latency and terabit per second (Tbps) data rates. Accordingly, it can support innovative applications like holograms, immersive virtual reality experiences, and fully automated systems [2]. 6G small cells play a key role in this success. Although they are short-

range, they improve the network by providing better coverage and faster speeds. Additionally, small cells support flexible and incremental deployment. The 6G network can provide low delays, reliable service, and higher capacity by placing many small cells close to users [3]. This architecture enhances user experience by providing seamless connectivity and satisfies the needs of future applications.

Although small cells are critical for supporting the high capacity and low latency demands of 6G networks, their dense deployment introduces unique resource allocation challenges. Here, resource allocation decisions must be

computed for thousands of cells due to the huge state and action spaces of the 6G network. Also, frequent resource reallocation due to high user mobility increases the algorithmic overhead. All of these make resource management challenging. This resource management challenge affects critical performance parameters, including latency, throughput and packet loss. Therefore, the rapid increase in 6G network traffic and the proliferation of small cells necessitates a proactive and dynamic resource allocation mechanism.

Based on these, we propose a dynamic resource allocation model based on queuing theory and GBM in this paper. More specifically, we aim to develop a proactive capacity planning model that combines queuing-theory-based small cell state analysis with GBM-driven predictions to ensure dynamic resource scaling. The main contributions of the paper could be summarized as follows:

- We introduce a new methodology that combines queuing-theory-based small cell state analysis with GBM-driven predictive modelling. Queuing theory identifies critical patterns, while GBM enables future resource requirement forecasting for adaptive adjustments.
- The queuing-theory-based small cell state analysis provides a deep understanding of system utilization and traffic dynamics. These insights are transformed into actionable features for accurate and reliable resource predictions.
- The GBM-driven allocation mechanism empowers real-time resource allocation by utilizing predictive analysis. This ensures the allocation of bandwidth, computing power, and energy usage.

The rest of the paper is organized as follows: we first explain the Related Work. Then, we describe the proposed topology. Then, we give the proposed approach. After these, we provide the performance with evaluation results. Finally, we conclude the paper by also giving future work.

RELATED WORK

The literature shows different works for resource allocation management in 6G networks. The resource allocation for 6G massive machine-type communications (mMTC) is optimized to meet diverse QoS needs in [4]. It proposes a multiple numerology framework with non-

orthogonal multiple access and a semi-persistent algorithm to minimize bandwidth usage. They aim to enhance support for many low-power devices in 6G networks. Here, they adjust signal formats and use a scheduling algorithm to allocate resources efficiently. In this methodology, the signal settings, channel characteristics, and quality requirements are considered. Also, they measure the resource usage compared to traditional methods. The deep reinforcement learning for intra- and inter-slice management is proposed in [5]. This work aims to improve resource sharing among different network slices in 6G. With this adaptive learning approach, they aim to manage resources within and across slices. The signal configurations, resource units, and service quality needs are used as parameters in this methodology. Also, the service delays and overall resource consumption are considered to evaluate the efficiency of the proposed model. To address the dynamic user demands of 6G UAV networks, a resource allocation algorithm is proposed in [6]. This algorithm employs decision-making based on partial network information to plan spectrum and movement. Here, area coverage, drone settings, and signal conditions are considered as algorithm parameters. This methodology evaluates improvements in data transfer speeds and learning efficiency. The resource allocation for software-defined 6G networks is optimized by dynamically switching between centralized and distributed policies to adapt to network conditions in [7]. This work uses adaptive learning to switch between centralized and distributed resource control. To balance performance in software-controlled 6G networks, this work considers performance feedback, user counts, and system priorities. As a result of these operations, this work observes balanced performance and reduced system overhead. The study aims to optimize resource allocation in 6G integrated satellite-terrestrial networks by combining base station and satellite resources to increase user throughput in [8]. It proposes a single-stage user-centric approach using a reinforcement learning model to allocate physical resource blocks and satellite beam hopping strategies. Therefore, it integrates user needs with learning-based resource allocation to increase access rate. This model uses satellite coverage, resource units, and user demand profiles. Also, to evaluate the efficiency, the number of users served and data transfer rates are assessed. A study aims to optimize power control in dense 6G in-factory subnetworks to maximize spectral efficiency while minimizing sensing and signaling overhead in [9]. This work utilizes network modeling to manage interference and optimize power use. Accordingly, this approach aims to enhance efficiency in factory-based 6G networks. For this aim, it

Table 1. Comparison of Resource Allocation Algorithms

Work	Aim	Approach	Parameters	Evaluation Results
Sadi et al. [4]	Optimize resources for machine-type communications in 6G	Uses multiple signal formats and allocation algorithm	Signal frequencies Channel size Quality needs	Reduced resource usage
Mhatre et al. [5]	Improve resource allocation for network slices in 6G	Uses reinforcement learning for slice management	Signal settings Resource blocks Service quality	Lower delays Less resource use
Zhou et al. [6]	Enhance resource use for UAVs in 6G	Uses belief-based learning for spectrum and path planning	Area size UAV settings Signal strength	Higher data rates Faster learning
Nouruzi et al. [7]	Optimize resources in software-defined 6G networks	Uses reinforcement learning with mode switching	Feedback data Performance weights User count	Better performance balance Lower overhead
Sun et al. [8]	Maximize user access in satellite-terrestrial 6G	Uses reinforcement learning for unified allocation	Satellite beams Resource blocks User demands	More users served Higher data flow
Abode et al. [9]	Improve power use in factory 6G networks	Uses neural networks for interference control	Network devices Signal data Power limits	Better efficiency Reliable performance
Wu et al. [10]	Enhance user experience in 6G	Uses quality mapping for diverse needs	Service quality User expectations Adjustment factors	Improved user satisfaction
Shen et al. [11]	Manage resources in dense IoT 6G networks	Uses learning for cell selection and interference	Signal Strength Device count Time slots	Stable performance Handles many devices
Zhang et al. [12]	Optimize resources and mobility in 6G	Uses sensing and access schemes for handover	Signal timing Movement data Service quality	Fewer connection issues Better service
Guo et al. [13]	Improve device-to-device resources in 6G	Uses distributed learning for allocation	Frequency bands Signal states Service needs	Higher data flow Less power use
Rezazadeh et al. [14]	Reduce conflicts in 6G network slices	Uses multi-agent learning for protocol design	Computing resources Traffic types	Lower delays Better resource use
Wang et al. [15]	Optimize resource allocation for 6G slices	Uses learning for slice admission and reuse	Computing units Request patterns	Better resource use Fewer failures
Zhao et al. [16]	Optimize resources for user experience in 6G edge networks	Uses digital modeling and learning-based allocation	Network conditions, user demands, service quality	Improved user satisfaction, reduced congestion

focuses on device interactions, signal conditions, and power constraints. This work measures efficiency gains and reliable network performance to evaluate the proposed model. A study aims to enhance resource allocation in 6G by developing a uniform QoE-aware criterion to address multi-demand challenges in hyper-heterogeneous networks in [10]. It proposes a novel exponential mapping function integrating minimum and

expected user demands to balance quality of experience and resource efficiency. More specifically, this approach maps user needs to resource decisions to meet diverse demands and improve user satisfaction in 6G networks. Here, the service quality, user expectations, and adjustment settings are used as method parameters. Also, the performance of the proposed model is evaluated by measuring enhancements in user experience and

satisfaction. A study aims to optimize wireless resource management in 6G-enabled high-density IoT networks in [10]. This study supports many IoT devices in crowded 6G networks to improve system capacity and reduce interference. Specifically, it proposes a simulation-based framework using Q-learning for cell selection and static interference coordination to manage ultra-dense networks with femtocells and small cells. This framework includes signal strength, device counts, and scheduling slots. This study assesses the stable performance and ability to handle many devices. An optimization algorithm for 6G resource allocation and mobility management is proposed in [12]. It proposes a non-orthogonal multiple access scheme and a sensing-aided handover mechanism to dynamically adjust handover parameters and allocate resources. Therefore, it combines sensing and access methods to improve handovers and resource use. In this algorithm, signal timing, movement data, and service quality requirements are used as system parameters. Also, this work uses connection issues and service quality parameters for model evaluation. A study to optimize resource allocation in D2D-enabled 6G networks is proposed in [13]. It proposes a federated learning-aided deep reinforcement learning approach for decentralized resource allocation. Specifically, it applies distributed learning to allocate resources efficiently and enhance direct device-to-device connections in 6G. This learning methodology utilizes frequency settings, signal conditions, and service needs for resource allocation. Also, this work aims to improve data transfer, and reduce power consumption. A study aims to address 6G inter-slice resource contention by developing adaptive communication protocols in [14]. It uses coordinated learning to design efficient resource-sharing protocols and reduce conflicts in 6G network slices. This work also aims to reduce delays and improve resource utilization by using computing resources and network traffic type parameters. Similarly, a reinforcement learning-based slice admission control framework with periodic and shortage-triggered resource recycling is proposed in [15]. This study aims to optimize resource allocation and service provisioning in 6G network slicing to meet dynamic service demands and ensure security. For this aim, it focuses on computing resources and patterns of service requests to obtain better resource use and fewer service failures. To enhance user experience across diverse traffic types, resource allocation for 6G edge networks is optimized in [16]. The work proposes a digital twin edge network framework combined with a learning-based algorithm to manage communication resources efficiently. The aim is to support multiple user devices while ensuring high service quality. The approach integrates digital modeling and adaptive learning to adjust resource allocation dynamically. The methodology considers network conditions, user demands, and service quality needs. Performance is evaluated by measuring improved user satisfaction and reduced network congestion compared to traditional methods.

Unlike other studies, our model integrates queuing theory with GBM to create a unified framework for resource management. Most existing approaches consider traffic analysis and machine learning as independent processes. However, our model bridges this gap by directly utilizing insights from queuing theory as input features for GBM. This novel integration enables both proactive resource planning and real-time adjustments. Our model minimizes latency and packet loss by focusing on dynamic resource scaling. Therefore, it offers a scalable and robust solution for next-generation 6G networks. The strengths of our model compared to other studies can be listed as follows:

- **Integration of Mathematics and Predictive Modeling:** This study employs a traffic flow model in conjunction with a predictive tool, distinguishing it from most existing research that predominantly relies on learning-based methodologies.
- **Emphasis on Network Traffic Dynamics:** The analysis focuses on the movement of data within small cells to anticipate demand, rather than concentrating on individual devices or specific services.
- **Proactive Resource Optimization:** The approach involves preemptive planning to optimize bandwidth, computational resources, and energy consumption, in contrast to traditional reactive strategies.
- **Enhancement of User Experience:** The objective is to minimize delays and errors in congested networks, thereby providing a viable solution to the challenges faced in 6G environments.

THE PROPOSED SYSTEM ARCHITECTURE

This paper considers a knowledge-defined networking-based architecture for the dynamic 6G resource allocation. This architecture consists of three main components: data, control, and knowledge planes, as shown in Figure 1.

The Data Plane includes the physical elements of 6G small cell architecture, such as small cells, macro cells, and user equipment. It transfers the real-time data of these elements to the knowledge plane for dynamic resource allocation. To achieve this aim, the Knowledge Plane includes the Dynamic Resource Allocation Framework. This framework consists of two main stages: Queueing-Theory-Based Small Cell State Determination and GBM-based Prediction for Dynamic Resource Allocation. Here, the data received from the Data Plane goes through two main stages and turns into dynamic resource allocation decisions as actionable knowledge. We have a Control Plane between these two layers to manage dynamic resource management operations. Therefore, the Control Plane receives actionable knowledge (dynamic resource allocation decisions) from the Knowledge Plane. This knowledge is then used to allocate resources dynamically in the data plane.

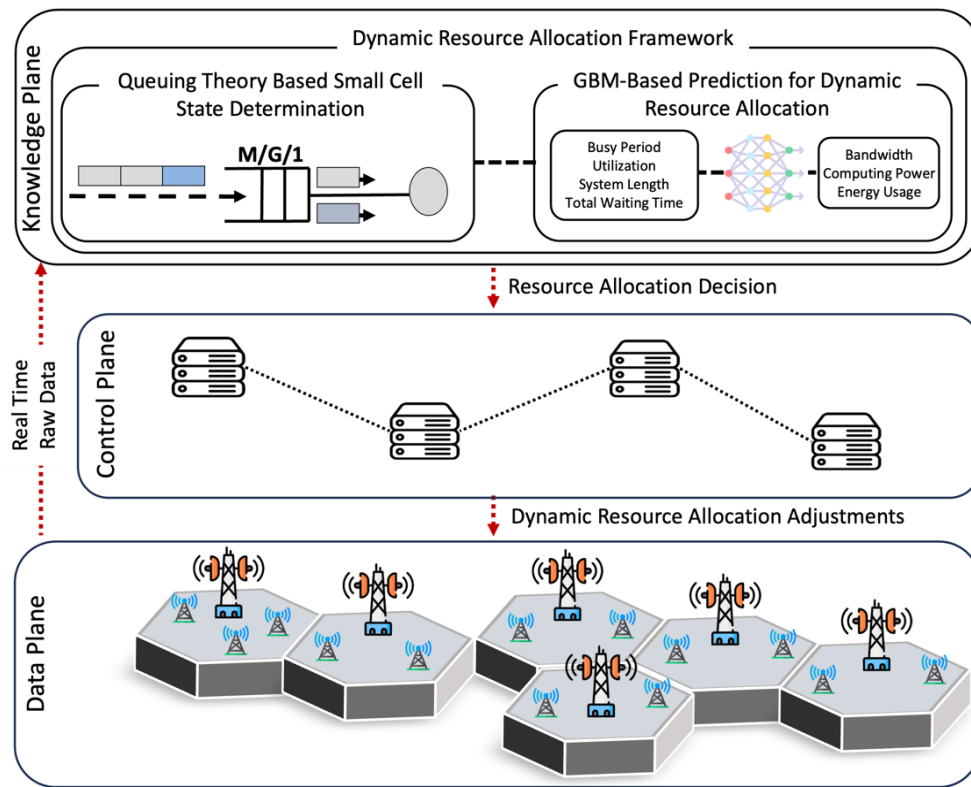


Figure 1. The Proposed System Architecture

THE PROPOSED APPROACH

This paper proposes a dynamic resource allocation model based on queuing theory and Gradient Boosting Machines (GBM). Our proposed model is executed in two main phases. We will conduct a queuing-theory-based small cell state determination in the first phase. In the second phase, we will incorporate small cell state metrics with GBM for dynamic resource allocation. Based on these results, we will dynamically adjust three primary resources (bandwidth allocation, computational power, and energy usage). The details of these phases will be summarized in the following subsections.

Queuing-Theory-Based Small Cell State Determination

In this phase, we aim to analyze network traffic patterns (busy period) and examine multiple influencing factors (utilization, system length, and total waiting time) with a queuing theory-based approach. These patterns and influencing factors are the real-time indicators of a small cell state.

To represent the operation of a small cell in a 6G network, we will utilize an $M/G/1$ queue. User requests come to the small cell according to the Poisson process since it is memoryless and represents the random nature of mobile users [17], [18]. Here, we use λ_i to show the arrival rate of user requests to small cell i .

Additionally, service times for these requests follow a general distribution. Accordingly, the service rate ($\mu_i = \frac{1}{E[S_i]}$) shows the small cell's capability to process

incoming requests. Here, $E[S_i] = \int_0^{\infty} t \cdot g(t) dt$ is the expected service time. Also, $G(s_i)$ and $g(s_i)$ represent the cumulative distribution function (CDF) and probability density function (PDF) of the service times, respectively. The small cell acts as a single server to represent its limited resources. These models and definitions form the basis for the following small cell state determination. As explained above, we utilize busy period, utilization, system length, and total waiting time as real-time indicators to represent the small cell state. The busy period in an $M/G/1$ queue refers to the continuous interval during which a small cell processes requests without idle time. Accordingly, the busy period begins when a request arrives at an idle server and terminates when the server becomes idle again. Also, new arrivals may extend the server's busy period during the service of one request.

This paper defines the busy period B with a recursive definition as given in Eq. 1. In this equation, S is the service time of the first request that initiates the busy period. $N(S)$ is the number of arrivals during the service time S . B_i represents independent, identically distributed copies of the busy period initiated by those additional arrivals. Also, $\stackrel{d}{=}$ denotes equality in terms of distribution. This recursive definition provides a probabilistic framework to understand the busy period by considering the initial service time and additional arrivals.

To analyze the properties of B in Eq. 1, we apply the Laplace-Stieltjes Transform (LST) to the recursive equation. Here, $\tilde{B}(s)$ denotes the LST of B , and $\tilde{G}(s)$ denote the LST of the service time distribution $G(s)$. Here, $\tilde{G}(s) = \int_0^{\infty} e^{-sx} \cdot g(x) dx$. Therefore, we can

obtain Eq. 2. According to our small cell model, μ_i represents the processing capacity of small cell i , determined by the mean service time $E[S_i]$. Also, $G(s)$ and $\tilde{G}(s)$ are used to analyze system performance during different operational scenarios. This equation enables analytical solutions for properties like the mean and variance of the busy period. By using Eq. 2 and Eq. 3, we can derive the mean busy period $E[B]$, as given in Eq. 4.

$$B \stackrel{d}{=} S + \sum_{i=1}^{N(S)} B_i \quad (1)$$

$$\tilde{B}(s) = \tilde{G}\left(s + \lambda(1 - \tilde{B}(s))\right) \quad (2)$$

As explained above, $E[S]$ is the mean service time and $\rho = \lambda \cdot E[S]$ is the utilization factor, representing the fraction of time the server is busy. Therefore, Eq. 4 represents the mean busy period by considering the impact of arrival and service rates on system performance.

$$\mathbb{E}[B] = -\frac{d\tilde{B}(s)}{ds} \Big|_{s=0} \quad (3)$$

$$\mathbb{E}[B] = \frac{\mathbb{E}[S]}{1 - \rho} \quad (4)$$

In addition to the busy period, we have three additional metrics for the small cell state: Utilization (ρ), Expected System Length ($E[L]$), and Expected Total Waiting Time ($E[W]$) as given in Eq. 5. Here, the total waiting time includes the time spent in the queue and being serviced. Similarly, the total system length includes requests waiting in the queue and currently being served [19]. These metrics improve the overall understanding of a small cell state. More specifically, the busy period gives information about the base station's continuous active operational time. Additionally, we can assess the user experience regarding latency and the number of waiting requests by using other metrics.

$$\begin{aligned} E[L] &= \frac{\lambda \cdot E[S^2]}{2(1 - \rho)} + \rho \\ E[W] &= \frac{\rho E[S]}{1 - \rho} + \frac{\lambda \cdot \text{Var}[S]}{2\mu(1 - \rho)} \\ \rho &= \frac{\lambda}{\mu} \end{aligned} \quad (5)$$

Therefore, when the small cell values go to the Knowledge Plane, they are modelled as $M/G/1$ queues, and their states are determined. The GBM in the knowledge plane uses these states to obtain predictions for dynamic resource allocation.

GBM-Based Prediction for Dynamic Resource Allocation

GBM uses the small cell states to forecast resource demands. These demands are used to make decisions about resource scaling. Thus, in this phase, we leverage predictions generated by the GBM model to allocate resources dynamically. Here, we select busy period (Eq. 4), utilization (Eq. 5), system length (Eq. 5), and waiting time (Eq. 5) as input features for GBM. Therefore, we train the GBM to predict the allocations of our primary resources based on these features. Here, we define bandwidth allocation, computing power, and energy usage as primary resources.

In the beginning, our model is trained with the values of input features and corresponding resource allocation decisions. Here, GBM learns patterns from the data to dynamically predict the optimal allocation of resources. Accordingly, our model learns how the input metrics influence the resource allocation decisions by building a series of decision trees. These trees can learn the following patterns about small cells.

- Relationships between individual small cell state metrics and resource allocations. As an example, a high value of $E[B]$ indicates increased user demand. Accordingly, we should increase bandwidth to satisfy this demand.
- Interactions between small cell state metrics and resource allocations. For example, a higher value of $E[L]$ with lower ρ states that the server is not processing requests rapidly despite the high system length. Accordingly, we should increase the bandwidth to process the queued user requests faster.
- Nonlinear behavior states of metrics. For example, a value of $\rho \approx 1$ indicates that the system is approaching saturation in terms of load. So, we should increase the computing power. Table 1 gives a detailed version of these patterns.

Therefore, as given in Table 2, we aim to dynamically determine the adjustments of three primary resources: Bandwidth Allocation, Compute Power, and Energy Usage. To achieve this, we give small cell state parameters to our GBM model after training. At that point, GBM uses the learned relationships to predict optimal values for resource allocations, as shown in Table 1. At that point, the Knowledge Plane transfers the actionable knowledge (dynamic resource allocation decisions) to the Control Plane. The Control Plane uses this knowledge to allocate resources dynamically in the data plane. Therefore, based on the predictions, the small cell dynamically adjusts its resources [20], [21].

In the following part, we will evaluate the performance of our proposed model in terms of latency, throughput, and packet loss.

Table 2. Conditions Learned by the GBM and Corresponding Resource Allocation Decisions

Condition Type	Small Cell State Metrics	Description	Resource Allocation Decision
Individual Metric	High $E[B]$	Continuous activity, high demand	Increase bandwidth
	High $E[W]$	Long delays, high latency	Increase bandwidth
	High $E[L]$	Large queue, congestion	Increase compute power
	Low ρ	Underutilized server	Reduce energy usage
Metric Interaction	High $E[L]$	Queued requests, slow processing	Increase bandwidth
	Low ρ		Compute power
	Low $E[B]$	Low demand, idle system	Reduce energy usage
	Low ρ		
	High $E[W]$	Delays, utilization near overload	Increase bandwidth
	High ρ		Compute power
	Moderate $E[B]$	Consistently busy state	Bandwidth
	High ρ		Compute power increase
	High $E[B]$	Stable workload, increasing activity	Increase bandwidth
	Moderate $E[W]$		
Nonlinear Behavior	$\rho \approx 1$	Saturation, maximum capacity	Rapid compute power increase
	High $E[W]$	Long delays, overload	Increase bandwidth
	$\rho \approx 1$		Compute power
	Spike in $E[B]$	Abrupt demand surge	Temporarily boost bandwidth
	Drop in ρ	Idle processing with queue backlog	Increase compute power
	High $E[L]$		
	Low ρ	Short bursts of activity	Maintain moderate bandwidth
	Low $E[L]$		Reduce energy slightly
	High $E[B]$		

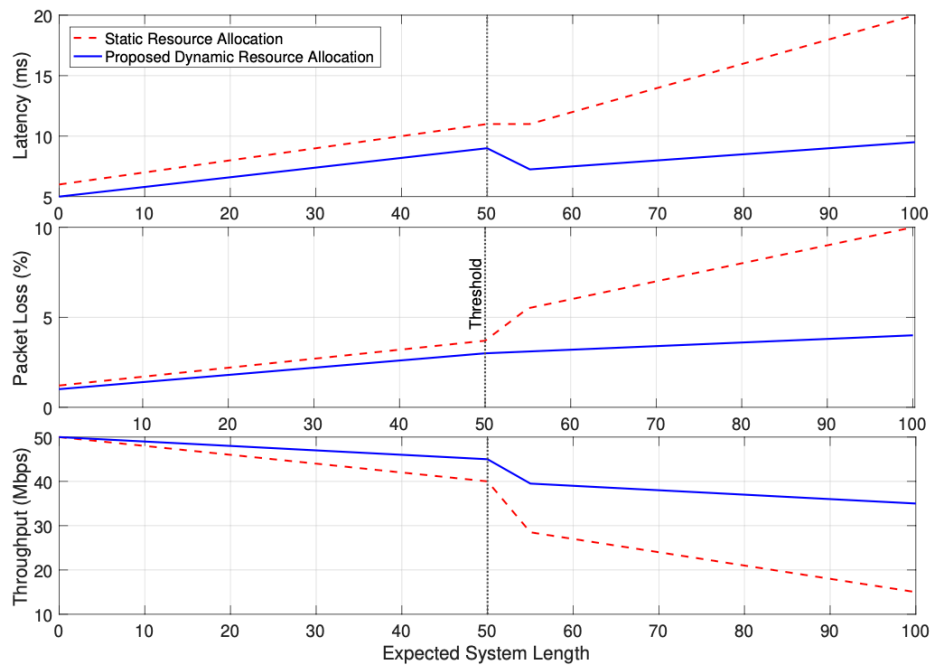
PERFORMANCE EVALUATION

This paper uses the NS-3 network simulator to assess the performance of a dynamic resource allocation framework in a 6G environment. The simulation takes place in a 1000-meter by 1000-meter area, representing a dense urban deployment scenario. Within this space, macro cells are strategically placed to provide consistent, wide-area coverage and serve as the main connection backbone. To increase network capacity and alleviate the load on macro cells, small cells are deployed in a semi-random grid pattern. These small cells help densify the network and address coverage gaps, particularly in areas where macro connectivity may weaken due to obstacles or high user density. All base stations, including macro and small cells, remain stationary during the simulation to illustrate fixed network infrastructure. Users are randomly positioned within the simulation area to reflect the unpredictable nature of user distribution in real-world urban settings. Their movement follows the Random Waypoint Model, which simulates realistic user behavior. In this model, each user chooses a random destination within the area and moves toward it at a randomly selected speed, pausing briefly upon arrival before picking a new destination and repeating the process. This variability in speed and direction captures

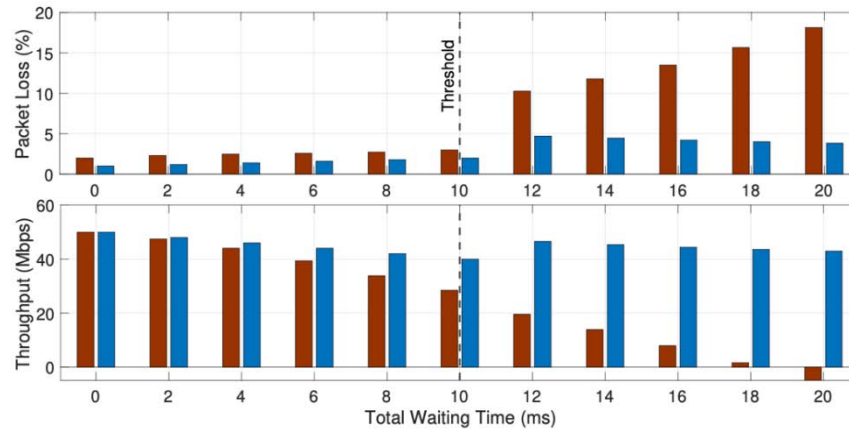
the unpredictable dynamics of human movement, making the evaluation more representative of actual 6G network usage. During the simulation, user devices connect to the nearest available cell, and handovers are managed based on signal strength and quality. The dynamic resource allocation mechanism continuously optimizes the assignment of network resources in response to changes in user density, traffic demand, and cell load conditions. A comprehensive list of the simulation parameters, including channel configurations, user behavior settings, and radio propagation models, is detailed in Table 3.

Table 3. Simulation Parameters

Parameter	Values
Frequency Band	28 GHz
Reception Power	0.6 Watts
Coverage Range	80 meters
Modulation Scheme	256-QAM
Antenna Gain	6 dBi
Transmission Power	1.8 Watts
MIMO Configuration	8x8
Carrier Frequency	28 GHz
Backhaul Capacity	2 Gbps
Scheduler Algorithm	Proportional Fair
Energy Efficiency	10 mW/bit
Network Density	50 users/cell



(a)



(b)

Figure 2. Expected System Length- and Total Waiting Time-Based Evaluation

In these simulations, we compare the proposed dynamic resource allocation approach with the static resource allocation methodology. Figure 2a illustrates the behavior of the proposed approach according to increasing system lengths ($E[L]$) to show its efficiency compared to the static resource allocation strategy. Here, we evaluate the efficiency in terms of latency, packet loss, and throughput. As shown in Figure 2a, latency and packet loss grow steadily with increasing system length due to prolonged queuing and saturation. Also, throughput declines with the degraded performance due to congestion blocks. Our proposed dynamic resource allocation mitigates these issues effectively after reaching the threshold. At that point, packet loss decreases due to better handling of incoming traffic. As shown in Figure 2a, latency becomes steady when more resources are added to lower waiting times. Throughput improves when network resources are adjusted for the workload.

We also analyze the performance of the proposed model according to the total waiting time, as shown in Figure 2b. We measure this metric with Eq. 5, and high waiting times indicate queuing delays due to congestion or under provisioned resources. In static resource allocation, packet loss continuously increases due to excessive buffering or the dropping of requests during prolonged waiting periods. In our proposed approach, we can improve performance after the threshold. More specifically, our proposed approach reduces packet loss by mitigating the negative impacts of traffic congestion. Similarly, throughput declines since the system cannot efficiently process incoming traffic within an acceptable timeframe. On the other hand, our proposed approach effectively handles queued traffic and reduces system delays to improve throughput. We evaluate the proposed approach's latency, packet loss, and throughput according to the busy period in Figure 3. As explained in Eq. 1, analyzing busy periods is essential to

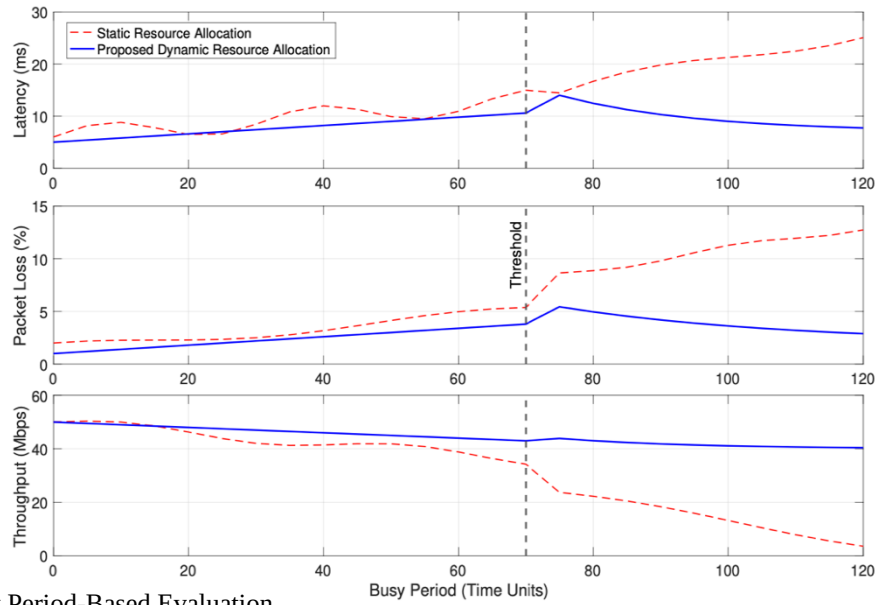


Figure 3. Busy Period-Based Evaluation

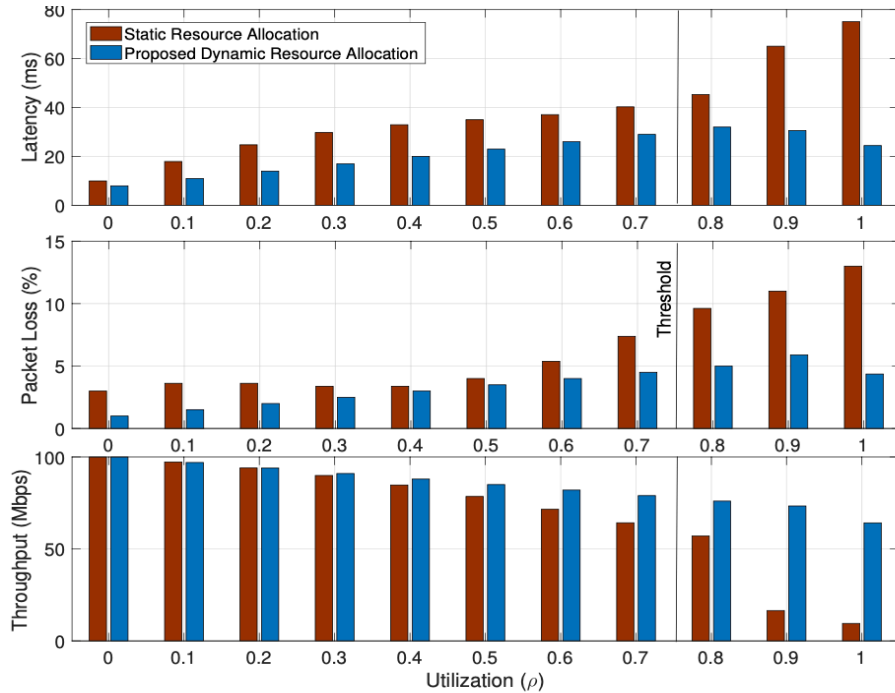


Figure 4. Utilization-Based Evaluation

understanding system overload and applying dynamic resource strategies. As shown in Figure 3, latency increases during long busy times because resources can't handle the continuous high demand. However, the proposed dynamic resource allocation approach shows improvements post-threshold. Here, dynamic resource allocation reduces prolonged queuing delays, leading to a rapid latency decrease. As shown in Figure 3, packet loss increases considerably during extended busy periods with throughput reduction. This indicates that the system's capacity to handle all incoming traffic has decreased. However, the proposed approach stabilizes it due to enhanced congestion handling as given with Eq. 5. Similarly, throughput increases as more resources

optimize data processing during peak times, as summarized in Table 2.

To provide a clearer comparison of our approach with existing solutions, we offer a qualitative assessment of various advanced resource allocation strategies in Table 4. Unlike static or purely heuristic methods, our model combines queuing theory and GBM-based prediction to support both traffic adaptation and user mobility. While many learning-based models, such as Q-learning or deep reinforcement learning, show strong performance, they often require extensive training and centralized control, which may not be suitable for scaling in 6G networks. In contrast, our approach is lightweight and scalable, ensuring real-time responsiveness with predictive capabilities. This balance makes our method a practical

Table 4. Qualitative Comparison of Resource Allocation Approaches

Study / Approach	Adaptability to Traffic	Mobility Awareness	Learning-Based	Real-Time Capability	Scalability	Notes
Static Resource Allocation	X	X	X	X	✓	Simplest; lacks responsiveness
Heuristic Rule-Based Models [4, 12]	~	X	X	✓	✓	Scenario-tuned; limited generalization
Q-Learning Models [8, 9]	✓	~	✓	~	~	Requires training phase; limited by mobility complexity
Deep RL Approaches [5, 6, 11]	✓	✓	✓	✓	~	High accuracy but computationally demanding
Federated Learning-Based Models [13]	✓	✓	✓	✓	✓	Scalable and privacy-preserving; model synchronization overhead
Our Proposed Method	✓	✓	X	✓	✓	Intelligent resource allocation without complex training

and advanced alternative, particularly for latency-sensitive and dynamic environments like smart warehouses or digital twin platforms.

The simulation results reveal notable improvements in latency reduction, resource utilization efficiency, and throughput stability, especially under conditions of fluctuating user mobility and variable traffic loads. These enhancements are particularly relevant for real-world applications that require ultra-reliable low-latency communication, such as smart warehouses, Industry 4.0 settings, autonomous transportation systems, and real-time digital twin platforms in logistics and manufacturing. In these contexts, tasks like the precise coordination of autonomous guided vehicles, remote robotic control, and time-sensitive sensor-actuator interactions depend on reliable network performance, which our proposed model effectively supports. By facilitating predictive and adaptive resource allocation, the system can proactively address network congestion and user mobility patterns, minimizing service disruptions and ensuring stable quality of service. For example, in smart logistics hubs where numerous interconnected devices operate simultaneously, the dynamic nature of our model ensures continuous communication without over-provisioning or underutilizing resources. This approach not only enhances operational efficiency but also promotes energy savings by reducing idle resource allocation and unnecessary signaling overhead. Furthermore, the improved spectral efficiency and reduced packet delays highlighted in our evaluation indicate tangible economic advantages, including lower energy costs, better hardware utilization, and scalability for dense network

deployments. These outcomes align with the objectives of sustainable and intelligent 6G infrastructure. Overall, the findings of this study suggest that intelligent, model-driven resource orchestration mechanisms are not only theoretically beneficial but also essential for meeting the rigorous performance demands of next-generation cyber-physical systems.

CONCLUSION

We have presented an integrated framework for dynamic resource allocation in 6G small cell networks. This approach combines the M/G/1-based queueing system with GBM. This approach obtains the small cell states with M/G/1-based queue modelling. Then, these states are used with the GBM to predict the resource allocation decisions. This combined approach allows for adaptable resource management by ensuring the dynamic allocation of bandwidth, computing power, and energy usage. Simulation results also show that the proposed dynamic resource allocation model significantly outperforms static allocation strategies. Specifically, the model achieves a reduction of up to 35% in latency, a decrease of up to 42% in packet loss, and an improvement of up to 28% in throughput under high traffic and congested conditions. These enhancements demonstrate the effectiveness of our predictive and adaptive framework in efficiently managing resources in dense 6G small cell deployments.

FUTURE WORK

While the proposed queuing theory and GBM-based dynamic resource allocation framework shows significant improvements in latency, packet loss, and throughput, several extensions could further enhance its applicability and performance in real-world 6G scenarios. The current implementation treats small cells as independent decision-making units. Future work may explore federated learning or cooperative reinforcement learning to facilitate resource sharing and joint optimization among neighboring cells. As energy harvesting small cells become more common, future work could also incorporate models of renewable energy availability to enable energy-aware resource allocation while ensuring QoS guarantees.

REFERENCES

- [1] M. Shafi, R. K. Jha, and S. Jain, 6g: Technology evolution in future wireless networks, *IEEE Access*, vol. 12, pp. 57 548–57 573, 2024.
- [2] M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan, and M. Zorzi, Toward 6g networks: Use cases and technologies, *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 3, pp. 55–61, 2020.
- [3] S. Gopi, S. Kalyani, and L. Hanzo, Cooperative 3d beamforming for small-cell and cell-free 6g systems, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 71, no. 5, pp. 5023–5036, 2022.
- [4] Y. Sadi, S. Erkucuk, and E. Panayirci, Flexible physical layer-based resource allocation for machine type communications towards 6g, in 2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT), 2020, pp. 1–5.
- [5] S. Mhatre, F. Adelantado, K. Ramantas, and C. Verikoukis, Aiaas for oran-based 6g networks: Multi-time scale slice resource management with drl, in *ICC 2024 - IEEE International Conference on Communications*, 2024, pp. 5407–5412.
- [6] F. Zhou, R. Ding, Q. Wu, D. W. K. Ng, K.-K. Wong, and N. Al-Dhahir, A partially observable deep multi-agent active inference framework for resource allocation in 6g and beyond wireless communications networks, in *GLOBECOM 2023 - 2023 IEEE Global Communications Conference*, 2023, pp. 2662–2667.
- [7] A. Nouruzi, A. Rezaei, A. Khalili, N. Mokari, M. R. Javan, E. A. Jorswieck, and H. Yanikomeroglu, Smart resource allocation model via artificial intelligence in software defined 6g networks, in *ICC 2023 - IEEE International Conference on Communications*, 2023, pp. 5141–5146.
- [8] W. Sun, H. Xu, H. Wang, S. Chang, S. Sun, and D. Miao, Research on user-centric wireless resource allocation of is tn based on reinforcement learning, in *2023 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2023, pp. 141–146.
- [9] D. Li, S. R. Khosravirad, T. Tao, P. Baracca, and P. Wen, Power allocation for 6g sub-networks in industrial wireless control, in *2024 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2024, pp. 1–6.
- [10] M. Wu, Y. Xiao, Y. Gao, and X. Lei, Design of quality-of-experience criteria for resource allocation toward 6g wireless networks: A review and new directions, in *2022 IEEE 96th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Fall)*, 2022, pp. 1–7.
- [11] X. Shen, W. Liao, and Q. Yin, “A novel wireless resource management for the 6g-enabled high-density internet of things,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 29, no. 1, pp. 32–39, 2022.
- [12] H. Zhang, Y. Zhang, X. Liu, K. Sun, and Y. Zhang, “Resource allocation and mobility management for perceptive mobile networks in 6g,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 31, no. 4, pp. 223–229, 2024.
- [13] Q. Guo, F. Tang, and N. Kato, “Federated reinforcement learning-based resource allocation in d2d-enabled 6g,” *IEEE Network*, vol. 37, no. 5, pp. 89–95, 2023.
- [14] F. Rezazadeh, H. Chergui, S. Siddiqui, J. Mangués, H. Song, W. Saad, and M. Bennis, “Intelligible protocol learning for resource allocation in 6g o-ran slicing,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 31, no. 5, pp. 192–199, 2024.
- [15] J. Wang, Y. Li, J. Liu, and N. Kato, “Intelligent network slicing for b5g and 6g: Resource allocation, service provisioning, and security,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 31, no. 3, pp. 271–277, 2024.
- [16] J. Zhao, Y. Chen, and Y. Huang, “Qoe-driven wireless communication resource allocation based on digital twin edge network,” *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, vol. 8, pp. 277–281, 2024.
- [17] T. Bilen, K. Ayvaz, B. Canberk, “Qos-based distributed flow management in software defined ultra-dense networks,” *Ad Hoc Networks*, vol. 78, pp. 24–31, 2018.
- [18] T. Bilen and B. Canberk, “Handover-Aware Content Replication for Mobile-CDN,” in *IEEE Networking Letters*, vol. 1, no. 1, pp. 10–13, March 2019, doi: 10.1109/LNET.2018.2873982.
- [19] D. Gross, J. F. Shortle, J. M. Thompson, and C. M. Harris, *Fundamentals of Queueing Theory*, 4th ed. USA: Wiley-Interscience, 2008.
- [20] L. V. Cakir, T. Bilen, M. Özdem and B. Canberk, “Digital Twin Middleware for Smart Farm IoT Networks,” 2023 International Balkan Conference on Communications and Networking (BalkanCom), İstanbul, Türkiye, 2023, pp. 1–5, doi: 10.1109/BalkanCom58402.2023.10167962.
- [21] T. Bilen, E. Ak, B. Bal and B. Canberk, “A Proof of Concept on Digital Twin-Controlled WiFi Core Network Selection for In-Flight Connectivity,” in *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 6, no. 3, pp. 60–68, September 2022, doi: 10.1109/MCOMSTD.0001.2100103.

A Novel Approach for Graph-based Extractive Text Summarization using Karıcı Dominant Set Algorithm and Eigenvector Centrality

Taner UÇKAN¹, Abdulsamet AYDIN²

¹Van Yüzüncü Yıl University, Department of Computer Engineering, 65000 Van, Turkey

²Van Yüzüncü Yıl University, Department of Artificial Intelligence and Robotics, 65000 Van, Turkey

✉: taneruckan@yyu.edu.tr  [0000-0001-5385-6775](https://orcid.org/0000-0001-5385-6775)  [0000-0002-5329-4407](https://orcid.org/0000-0002-5329-4407)

Received (Geliş): 10.04.2025

Revision (Düzeltilme): 14.05.2025.

Accepted (Kabul): 31.05.2025

ABSTRACT

This study presents a novel contribution to graph-based text summarization by integrating the Karıcı Dominant Clustering Algorithm into summarization systems for the first time. In the proposed method, a neighborhood matrix based on the number of shared words between sentences is used to construct the initial graph. The Karıcı Dominant Clustering Algorithm is then applied to identify dominant clusters, and the corresponding sentences are removed from the text. A second graph is constructed from the remaining sentences, and eigenvector centrality values are used to determine the most central sentences, which form the final summary. The method was evaluated on the DUC-2002 and DUC-2004 datasets using ROUGE metrics, achieving scores of 0.35748, 0.49049, and 0.57586 for 100-, 200-, and 400-word summaries, respectively. The experimental results demonstrate that the proposed approach outperforms several existing methods and provides a significant contribution to the field of automatic text summarization.

Keywords: Graph dominating set, Graph-based document summarization, Generic document summarization, Extractive text summarization, Multi document text summarization

Karıcı Baskın Küme Algoritması ve Özvektör Merkeziliği Kullanarak Çizge Tabanlı Çıkarımsal Metin Özetleme için Yeni Bir Yaklaşım

ÖZ

Bu çalışma, çizge tabanlı özetleme yöntemlerine yenilikçi bir katkı sunarak Karıcı Baskın Kümeleme Algoritması'nı ilk kez metin özetleme sistemlerine entegre etmektedir. Önerilen yöntemde, özetlenecek metindeki cümleler arasında ortak kelime sayılarına dayalı bir komşuluk matrisi oluşturularak ilk çizge inşa edilir. Ardından, Karıcı Baskın Kümeleme Algoritması kullanılarak çizgedeki baskın kümeler belirlenir ve bu kümeye ait cümleler metinden çıkarılır. Kalan cümlelerle ikinci bir çizge oluşturulur ve bu çizgedeki özvektör merkezilik değerlerine göre en merkezi cümleler seçilerek özet oluşturulur. Yöntem, DUC-2002 ve DUC-2004 veri kümeleri üzerinde ROUGE metrikleriyle değerlendirilmiş ve sırasıyla 100, 200 ve 400 kelimelik özetler için 0.35748, 0.49049 ve 0.57586 ROUGE değerlerine ulaşmıştır. Elde edilen bulgular, önerilen modelin mevcut yöntemlere kıyasla yüksek performans gösterdiğini ve literatüre anlamlı bir katkı sunduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Çizge baskın küme, Çizge tabanlı belge özetleme, Genel belge özetleme, Çıkarımsal metin özetleme, Çoklu belge metin özetleme

INTRODUCTION

With the rapid development of internet technology, it is seen that the information on the internet has increased at an extraordinary rate [1], [2]. The exponential growth of the information produced every day makes it difficult for people to access the right information from this information stack. During access to information, many documents related to the information sought can be obtained, but it is a laborious and time-consuming task to determine whether the requested information is actually found in the documents. Text summarization systems are being developed to help people save time, increase productivity, and access information more easily. Automatic document summarization is an area where the

issue has yet to be resolved despite recent advances. To increase the text's value for readers, various strategies are employed to extract its key information effectively [3]. For this reason, researchers are working on advanced or new methods to provide more efficiency regarding automatic text summarization technologies [4]. Summarization aims to transform extensive and detailed textual content into a more concise format, without compromising the core meaning and essential points. Text summarization aims to produce a concise and logically structured representation of the original text. A range of approaches has been developed including extractive, abstractive, and hybrid summarization methods, each offering distinct advantages and limitations [5]. Regardless of the approach employed,

text summarization is essential for enhancing the comprehension and distribution of information in an era characterized by rapid information flow and high data volume.

Extractive summarization involves constructing the summary by identifying and directly using the most relevant sentences from the original document. Abstractive text summarization involves generating summaries by producing new sentences that do not appear in the original text, following a comprehensive analysis of the document. [6]. In the proposed extractive text summarization method, dominant sets [7] and graph theory techniques are used.

In the subsequent sections of the study, Chapter 3 outlines the overall structure of the proposed text summarization approach, including the identification of dominant clusters within the graphs. Chapter 4 presents the experimental results, offering a detailed description in terms of the datasets and performance measures employed. Moreover, a systematic comparison is performed in comparison with the proposed model and leading state-of-the-art methods in the field. Finally, Chapter 5 offers a critical discussion and interpretation of the experimental results, highlighting their implications and relevance within the broader context of the study.

RELATED WORK

In text summarization research, numerous criteria have been incorporated into sentence scoring to enhance the quality of system-generated summaries. These include factors such as the sentence's position within the document, its length, the identification of key terms, the overlap of sentence content with the document's title, the presence of numerical values, and the frequency of terms. Integrating these features into the evaluation process has significantly improved summarization performance [8], [9], [10]. [11] proposes a graph-based summarization system using both BM25+ and TextRank algorithms. In this summarization system, a graph was obtained with the nodes of the sentences and the similarity score between the two sentences with the edge weights. Nodes with the maximum order are selected and summarized. [12] proposed a single-document graph-based method for generating a coherent summary from Arabic texts. The source text was first transformed into a textual graph and both statistical and semantic factors were used to evaluate each sentence according to a new method that takes into account relevance, scope and variety. A subgraph is then constructed to reduce the overall size of the document. Finally, the final summary was produced by excluding unnecessary and less significant expressions from the summarized sentences. [13]. Ranked for each sentence by calculating subject information, semantic content, important keywords and location features. The final scores of each sentence in the document were revealed by combining the ranking values calculated for each feature. The top-ranked sentences are identified and integrated into the final summary. [14] proposed a graph-based approach that consider the similarity between

sentences and each other and between sentences and the whole document. In this approach, the similarities of the sentences to each other and the similarities of the sentences to the subject of the document were evaluated together and weighted graphs were obtained. A summary is created by determining the nodes with the top-ranked values in the graph and including the sentences associated with them. Karci Summarization focuses on entropy centrality and a general summarization is made using various α values in Karci entropy calculation. Here, according to the calculated entropy result, the nodes that are considered to carry the most information are selected and summarized. [15] [16], introduced a graph-based summarization approach that leverages biomedical-specific knowledge along with a data mining technique known as frequent itemset mining. In their studies, they used the Jaccard Similarity approach to specify the similarities of the sentences. In the study on graph-based extractive text summarization, firstly, the effect of 4 different association methods on the "TextRank" method was investigated. DUC and CAST data sets were used as data sets. In addition to this study, a system has been developed using hierarchical associative clustering and "TextRank" methods. In the proposed method, sentences are clustered according to a certain criterion, and "TextRank" is utilized to extract relevant sentences from the clusters. According to the studies, it has been determined that the proposed system works better when DUC 2002 is used. In the CAST dataset, it has been determined that 2 methods out of 4 different association methods have passed, and the difference between the other 2 methods is small [17]. Regarding the graphs, dominant set, node coverage, perfect matching, max faction, node coloring etc. There are such problems. Obtaining the minimum dominant set is an NP-Hard problem [7]. Numerous studies have been carried out on the minimum dominant cluster. [18], tried to solve the minimum dominant cluster problem by using a two-stage ant colony (ACO) algorithm. [19], reported that summaries obtained using dominant clusters obtained more successful results than many methods. [20], applied the minimum dominant set problem to Hopfield networks and obtained successful results. In addition, they claimed that the algorithm they developed would also consider solutions to problems such as max clique and max independent set

PROPOSED SUMMARIZATION METHOD

The steps of the proposed approach for text summarization are illustrated by the block diagram in Figure 1. In this study, an extractive and multi-document summarization method using dominant sets in graphs is presented. In the study, texts with model summaries of 200 and 400 words from the DUC 2002 data set and texts with a 100-word model summary from the DUC 2004 data set were used as inputs to the proposed text summarization system. The proposed summarization technique is divided into three fundamental tasks. In the first task, static words (such as pronouns, prepositions,

conjunctions) and unnecessary characters are removed from the documents. It is aimed to increase the success rate by removing the words (stopwords) that do not make sense on their own. In the second stage, mathematical modeling and graph theory are used to visualize and quantify the semantic connections between sentences. Furthermore, this task incorporates identifying the nodes that make up the dominant cluster and extracting the sentences represented by these nodes from the original

text. A new graph is created with the remaining sentences in the text. In the last stage, the sentences corresponding to the nodes in the newly created graph are scored using the eigenvector centrality method. At this step of the suggested method, summaries of 100, 200 and 400 words were created from the texts, starting from the most important node. The effectiveness of the approach was subsequently evaluated in detail using various ROUGE performance metrics.

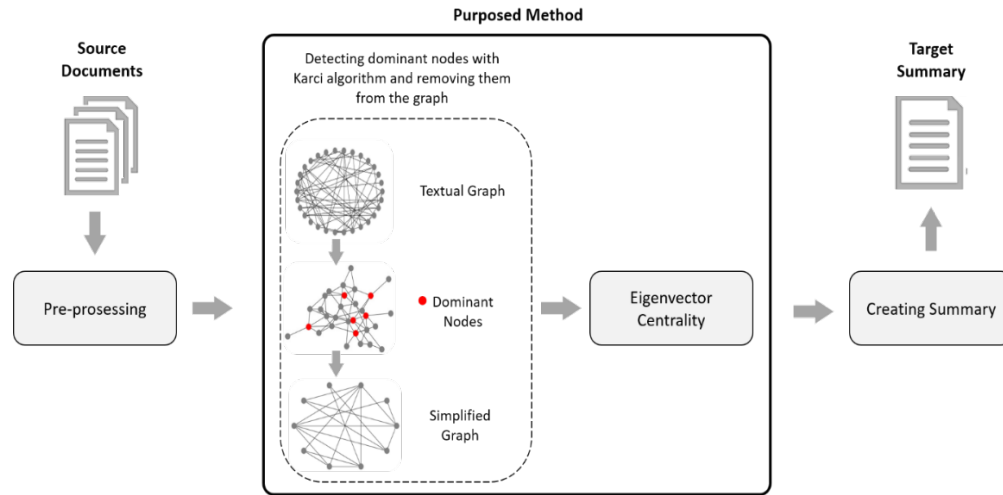


Figure 1. Schematic representation of the proposed document summarization model

According to graph theory, the dominant set is a subset of all the nodes in a graph. The vertices in the graph are either in the dominant cluster or are neighbors of at least one node in the dominant cluster [7]. Figure 2 illustrates a sample graph consisting of 10 nodes. As seen in Figure 3, dominant nodes dominate the entire graph.

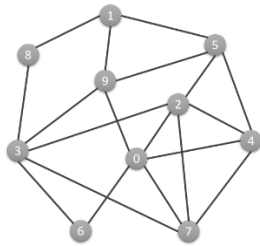


Figure 2. An example graph

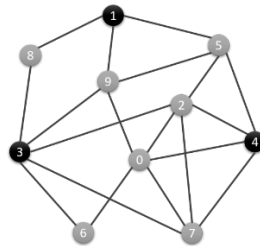


Figure 3. Dominant nodes of the graph

Detection of the dominant set

Within the scope of this study, the dominant set of nodes belonging to the textual graphs was determined using the Karci centrality value approach. This centrality algorithm is determined by calculating the node degrees, the Kmax tree degrees, and the basic cutoff degrees. This algorithm is composed of three fundamental stages. The initial step involves calculating the degree of each vertex in the graph, which represents the number of its connections to other nodes.

Kmax Tree

In the second stage, the degrees of the nodes in the tree were calculated using the Kmax Tree defined by Karci. The Kmax tree is a traversal of all the vertices in the graph, commencing from the vertices with the highest rank [21]. In the Kmax tree, the node possessing the highest degree is selected as the root node, and its adjacent nodes are enqueued according to their index sequence. When choosing the next highest ranked node among the neighboring nodes in the queue, if two or more nodes are the highest, the level of the nodes in the tree is checked first. Of these nodes, the node with the lowest level in the tree is given priority. If the equality continues, the first node is selected as the highest ranked node, taking into account its order in the queue. Kmax tree is obtained by adding all the nodes in the graph to the tree. Algorithm 1 shows the algorithm used to create the Kmax tree

Algorithm 1. Generating the Kmax Tree

```

1  Function Kmax(graph,root)
2      T = New Graph
3      visited, queue = empty list
4      add root to visited and queue list
5      while the queue is not empty
6          find root's neighbours

```

- 7 remove links between root and its neighbours
- 8 if the neighbour has not been visited before,
add it to the queue and visited list
- 9 if the neighbour has been visited before, it
comes out of the line
- 10 if there is a node with degree 0 in the queue,
exit the queue
- 11 root = highest degree node remaining in the
graph
- 12 return T

While constructing the Kmax tree of the graph in Figure 2 by using Algorithm 1, the highest order node 0 was chosen as the root. Then, nodes 2,4,6,7 and 9, which are neighbors of node 0, are added to the root as children. If there is a connection between these nodes, this connection is broken and the node degrees are updated. The reason for this is that since a node is reached over an edge, other alternative routes are no longer needed. According to the updated node degrees, node 9 was chosen as the highest degree node. By repeating the previous steps, nodes adjacent to node 9 are added to the tree. In the next step, node 1 became the highest order node. Neighbors to this node are also added to the tree. Thus, since all nodes are reached, the Kmax tree is created. Figure 4 shows the Kmax tree of the graph.

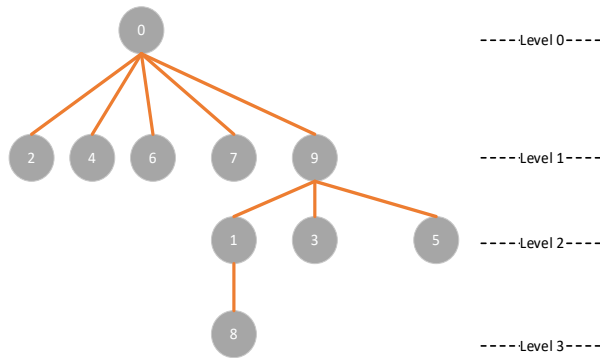
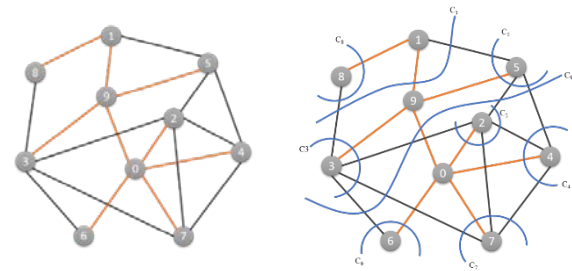


Figure 4. Kmax tree of the graph
Calculation of Fundamental Cutoffs

In the third step of the Karcı centrality algorithm, the basic cutting degrees are calculated. To calculate these basic cutting degrees, all the edges of the Kmax tree are cut out one by one and the graph is divided into two subsets. The connections of the nodes in the created clusters with the opposite cluster are determined and the cut-off value of which node has a connection is added to it. The basic cutting set is obtained as much as the number of branches in the Kmax tree [21]. Figure 5(a) shows the intersection of the sample graph and the Kmax tree. Figure 5(b), on the other hand, shows all the basic cuts performed according to the generated Kmax tree. In each cutting operation, only one edge specified in the Kmax tree is cut.



(a) Intersection of example graph and Kmax tree (b) All key cuts in the graph

Figure 5. Kmax tree of the example graph and all cuts

For example, $C_8 = \{\{8\}, \{0,1,2,3,4,5,6,7,9\}\}$ nodes are divided into two different clusters with the basic cut C_8 shown in Figure 5(b). When the connections between these two clusters are examined, it has been determined that there are edges between the nodes (8,1) and (8,3). In this cutting process, node 8 is given 2 cutting degrees, and nodes 1 and 3 are given 1 cutting degree each. In this way, all cuts are performed and the cutoff degree of each node is calculated. In Algorithm 2, the algorithm used to calculate the basic cutoff degrees is shown.

Algorithm 2. Calculation of Fundamental Cutoffs

```

1  Function CutSet(graph,tree)
2      treeNodes, treeEdges = sorted list of nodes and
3      edges in tree)
4      set1, set2 = empty list
5      cut_set = empty dictionary
6      For each i in treeNodes
7          cut_set[i] = 0
8      X = array of zeros (length of treeEdges, length of
9      treeNodes)
10     If the size of X > 0
11         cut_set = dict(zip(treeNodes,[int(n) for n in
12         list(X[0])]))
13         For i ranging from 0 to (length of treeEdges-
14         1)
15             clear set1 and set2
16             T2 = copy of tree
17             Remove edges from T2 with [treeEdges[i]]
18             d=
19             sorted(list(nx.connected_components(T2)))
20             Expand set1 with d [0]
21             Expand set2 with d [1]
22             For each a in set1
23                 For each b in set2
24                     If graph has an edge between a and
25                     b
26                         Increment cut_set[a] and
27                         cut_set[b] by 1
28     Return cut_set

```

Karcı dominant set algorithm

Karcı- centrality algorithm is expressed with the node dominance value (Γ) symbol and the dominance value for each vertex in the graph is calculated by equation 1 [22].

$$\begin{aligned} \text{Node Dominance Value } (\Gamma) \\ = \text{Graph Degree} \\ + \text{Kmax Degree} \\ + \text{Cut Degree} \end{aligned} \quad (1)$$

After computing the dominance scores for each node in the graph, the subsequent step is to identify the dominant nodes. In Algorithm 3, the algorithm used to create the dominant cluster, and in Figure 6, the flow diagram of the Karcı dominant cluster algorithm is given. The first thing to be done during the determination of the dominant cluster is to determine whether there is a pendant node in the graph. Nodes with a degree of 1 are called pendant nodes [23]. If there is a pendant node in the graph, the node adjacent to this node is included in the dominant cluster. The node and its neighbors included in the dominant cluster are removed from the graph and the Kmax tree, and the graph is updated.

During the second phase, if no pendant nodes exist in the current graph, the node exhibiting the highest dominance value is added to the dominant cluster. If the dominance value of more than one node is equal, the node with the lower Kmax degree is selected. If the equality still exists, any of the nodes is added to the dominant cluster. In the next step, the dominant node and its neighbors are deleted from the graph and the Kmax tree and the graph is updated. In each iteration, pendant node control is performed. The dominant cluster is formed by iteratively performing the operations until all nodes are removed from both the graph and the Kmax tree.

Algorithm 3. Determination of Dominant Cluster

```

1  Function Dominating_Set(graph)
2      G = graph
3      T = Kmax tree
4      graphDegree = a dictionary of node and its degree
      in graph
5      kmaxDegree = a dictionary of node and its degree
      in T
6      cutDegree = a dictionary of node and its cut degree
      in graph
7      nodeDominanceValue = a dictionary of node and
      its dominance value in graph
8      pendantNodes = list to store pendant nodes
9      dominatingSet = list to store dominating nodes
10     while graph still has nodes
11         clear pendantNodes
12         for each node in graphDegree
13             if the degree of node is 1

```

```

14             add node to
              pendantNodes
15         if there are pendantNodes
16             select the first node in
              pendantNodes as the chosen node
17             find its neighbors in graph
18             select the first neighbor as the
              dominant node
19         else
20             find the vertex with the highest
              dominance value in graph
21             if there are multiple nodes with the
              highest value
22                 find the node with the
                  lowest kmax degree
                  among them
23                 select the first node with
                  the lowest degree as the
                  dominant node
24             else
25                 select the first node with
                  the highest dominance
                  value as the dominant
                  node
26         add dominantNode to dominatingSet
27         find the neighbors of dominantNode in graph
28         remove dominantNode and its neighbors
              from graph and T
29         update graphDegree, kmaxDegree,
              cutDegree and nodeDominanceValue
30     return dominatingSet

```

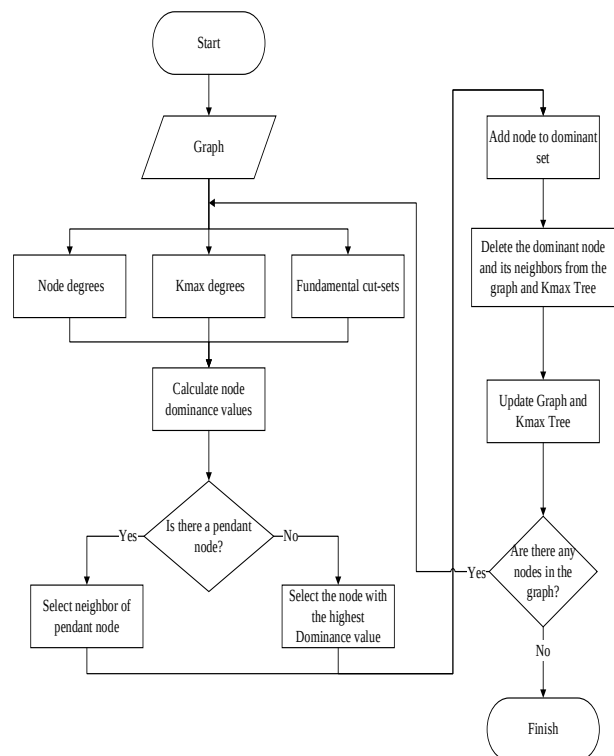


Figure 6. Flowchart of Karcı Dominant Set Algorithm

Eigenvector centrality

Eigenvector centrality is a technique employed to assess the significance of a node within a graph, relying on the notion that links to highly influential node contribute more to a node's importance than links to less influential ones [24]. The eigenvector centrality is calculated by equation 2, where V_j and V_i are the weights of the connections between the nodes and λ is a constant [25].

$$C_e(v_i) = \frac{1}{\lambda} \sum_{v_j \in N(v_i)} v_{ij} C_e(v_j) \quad (2)$$

Demonstration of the Karci dominant set algorithm on DUC 2002

Due to the large size of the graphs obtained from the texts in the dataset, the graph obtained from the first ten sentences of the d061 file is shown in Figure 7 and the dominant nodes of this graph are shown in Figure 8. Table 1 shows the sentences corresponding to each node in the graph in Figure 7.

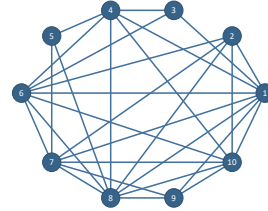


Figure 7. The graph obtained from the first 10 sentences in d061.txt

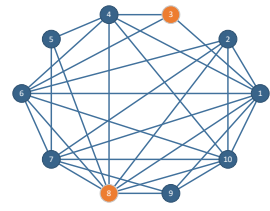


Figure 8. Dominant nodes of the graph obtained from the first 10 sentences in d061.txt

Table 1. First 10 sentences of file d061 of DUC 2002 [26]

1	Hurricane Gilbert swept toward the Dominican Republic Sunday, and the Civil Defense alerted its heavily populated south coast to prepare for high winds, heavy rains and high seas.
2	The storm was approaching from the southeast with sustained winds of 75 mph gusting to 92 mph.
3	"There is no need for alarm," Civil Defense Director Eugenio Cabral said in a television alert shortly before midnight Saturday.
4	Cabral said residents of the province of Barahona should closely follow Gilbert's movement.
5	An estimated 100,000 people live in the province, including 70,000 in the city of Barahona, about 125 miles west of Santo Domingo.
6	Tropical Storm Gilbert formed in the eastern Caribbean and strengthened into a hurricane Saturday night.
7	The National Hurricane Center in Miami reported its position at 2 am Sunday at latitude 161 north, longitude 675 west, about 140 miles south of Ponce, Puerto Rico, and 200 miles southeast of Santo Domingo.
8	The National Weather Service in San Juan, Puerto Rico, said Gilbert was moving westward at 15 mph with a "broad area of cloudiness and heavy weather" rotating around the center of the storm.
9	The weather service issued a flash flood watch for Puerto Rico and the Virgin Islands until at least 6 pm Sunday.
10	Strong winds associated with the Gilbert brought coastal flooding, strong southeast winds and up to 12 feet feet to Puerto Rico's south coast.

The DUC 2002 and DUC 2004 datasets include both the source texts and corresponding human-generated reference summaries. The recommended approach is assessed in comparison with other competitive methods using the reference summaries as a benchmark.

Extractive text summarization methods are not yet as natural as human-generated summaries since the sentences are taken as they are from the texts. Table 2 shows the model summary generated by humans and the 200-word summary obtained by the proposed system.

Table 2. 200-word model and system summaries

Model Summary ([26])	System Summary
Tropical Storm Gilbert formed in the eastern Caribbean and strengthened into a hurricane Saturday night. Hurricane Gilbert slammed into Kingston on Monday with torrential rains and 115 mph winds that ripped roofs off homes and buildings, uprooted trees and downed power lines. The storm killed 19 people in Jamaica and five in the Dominican Republic before moving west to Mexico. The Jamaican Embassy	Heavy rain and stiff winds downed power lines and caused flooding in the Dominican Republic on Sunday night as the hurricane's center passed just south of the Barahona peninsula, then less than 100 miles from neighboring Haiti. " Hurricane Gilbert, packing 110 mph winds and torrential rain, moved over this capital city today after skirting Puerto Rico, Haiti and the Dominican Republic. Hurricane Gilbert

reported earlier that 500,000 of the nation's 2.3 million people were homeless. Gilbert also buffeted the Cayman Islands, but no deaths were reported. Hurricane Gilbert, one of the strongest storms ever, slammed into the Yucatan Peninsula Wednesday and leveled thatched homes, tore off roofs, uprooted trees and cut off the Caribbean resorts of Cancun and Cozumel. The storm was about 550 miles southeast of Brownsville, Texas, the center said in a statement. The National Hurricane Center said Gilbert was the most intense storm on record in terms of barometric pressure. Earlier Wednesday Gilbert was classified as a Category 5 storm, the strongest and deadliest type of hurricane. Hurricane Gilbert's growth from a harmless low-pressure zone off Africa to a ferocious killer in the Gulf of Mexico was fueled by a combination of heat, moisture and wind that baffles forecasters.

swept toward the Dominican Republic Sunday, and the Civil Defense alerted its heavily populated south coast to prepare for high winds, heavy rains and high seas. The National Hurricane Center in Miami reported its position at 2 am Sunday at latitude 161 north, longitude 675 west, about 140 miles south of Ponce, Puerto Rico, and 200 miles southeast of Santo Domingo. Forecasters said the hurricane was gaining strength as it passed over the ocean and would dump heavy rain on the Dominican Republic and Haiti as it moved south of Hispaniola, the Caribbean Island they share, and headed west. " At midnight EDT Gilbert was centered near latitude 215 north, longitude 902 west and approaching the north coast of Yucatan, about 60 miles east-northeast of the provincial capital, Merida, the National Hurricane Center in Coral Gables, Fla, said. The storm ripped the roofs off houses and flooded coastal areas of southwestern Puerto Rico after reaching hurricane strength off the island's southeast Saturday night.

EXPERIMENTAL RESULTS

This study evaluates the proposed method's performance by employing the Document Understanding Conference (DUC) datasets, known for being among the most prevalent benchmark resources in text summarization studies [26]. DUC datasets are used to develop and test text summarization algorithms. DUC dataset is a dataset prepared for use in the text summarization field. The dataset contains a summary and a full text for each news article. With the proposed approach, abstracts of 200 and 400 words were obtained from the texts in the DUC 2002 dataset and 100-word summaries from the texts in the DUC 2004 dataset were obtained and compared with the model summaries. The DUC 2002 dataset comprises 59 document clusters, each consisting of approximately 10 news articles, totaling 567 documents. It has been observed that each document contains an average of 25 to 30 sentences. The DUC 2004 dataset includes 500 documents, each accompanied by human-generated reference summaries. The BBC News dataset is a dataset used for data categorization consisting of 2225 documents from 2004-2005, corresponding to stories in five domains. This dataset is designed for extractable text summarization purposes [27]. The "News Articles" folder contains 417 political news articles published by the BBC between 2004 and 2005. For each article, there are five different summaries in the "Summaries" folder. The BBC News dataset consists of 2,225 documents spanning five distinct categories: business, entertainment, politics, sport, and technology. Each article contains an average of 19 sentences, and multiple human-written reference summaries are available for each document.

To evaluate the effectiveness of the abstracts produced in this study, ROUGE (Recall-Oriented Understudy for Gisting Evaluation) performance metrics, which are among the most commonly applied evaluation criteria in

text summarization systems, were utilized. ROUGE counts the common n-grams (n-grams refers to n word groups in a text) of the summary text produced by text summarization systems and the abstract text created by humans, and the ratios of these common n-grams to the total n-grams [9]. The high score between 0 and 1 produced by the ROUGE criteria represents the success of the automatic summary. In this study, the performance of the suggested method is assessed using ROUGE-N, ROUGE-L, ROUGE-W-1.2 and ROUGE-SU performance measures.

$$ROUGE - N = \frac{\sum_{C \in \{ReferenceSummaries\}} \sum_{gram_n \in C} count_{match}(gram_n)}{\sum_{C \in \{ReferenceSummaries\}} \sum_{gram_n \in C} count(gram_n)}$$

In this study, the effectiveness of the generated summaries was evaluated using ROUGE (Recall-Oriented Understudy for Gisting Evaluation), a set of performance metrics commonly employed in text summarization systems. ROUGE-N measures the n-gram overlap between the system-generated summaries and the human-written reference summaries; ROUGE-L assesses the longest common subsequence; and ROUGE-SU evaluates similarity based on skip-bigrams and unigrams. An approach that has not been used in any summary study before was used in our study. Assuming that the sentences associated with the dominant nodes should be excluded from the abstract, a new graph was constructed using the remaining sentences, with those corresponding to the dominant nodes removed from the original text. The nodes of this new graph were scored using the eigenvector centrality method and summaries were obtained. In Table 3, 100-word summaries, in Table 4, 200-word summaries and in Table 5, 400-word summaries are reported separately according to the DUC

dataset, and in Table 6, summaries obtained from the BBC New dataset are reported separately according to Recall, Precision and F-Score using ROUGE performance metrics. The evaluation metrics employed in this study include Rouge-1, Rouge-2, Rouge-3, Rouge-4, Rouge-L, Rouge-

W-1.2, Rouge-S*, and Rouge-SU*. In Tables 3-6, the first column displays the various types of summarization performance metrics, while the subsequent columns present their average performance across Recall, Precision, and F-Score.

Table 3. Performance values of 100-word summaries (DUC 2004)

	Recall	Precision	F-score
Rouge-1	0.38691	0.33342	0.35748
Rouge-2	0.07818	0.06743	0.07227
Rouge-3	0.02378	0.02049	0.02197
Rouge-4	0.00677	0.00582	0.00625
Rouge-L	0.30356	0.26250	0.28099
Rouge-W-1.2	0.10327	0.16345	0.12630
Rouge-S*	0.12957	0.09561	0.10914
Rouge-SU*	0.13437	0.09944	0.11338

Table 4. Performance values of 200-word summaries (DUC 2002)

	Recall	Precision	F-score
Rouge-1	0.51702	0.46710	0.49049
Rouge-2	0.24703	0.22194	0.23369
Rouge-3	0.18815	0.16832	0.17759
Rouge-4	0.17194	0.15357	0.16215
Rouge-L	0.48475	0.43786	0.45984
Rouge-W-1.2	0.17469	0.24875	0.20512
Rouge-S*	0.23343	0.19014	0.20908
Rouge-SU*	0.23613	0.19253	0.21162

Table 5. Performance values of 400-word summaries (DUC 2002)

	Recall	Precision	F-score
Rouge-1	0.58847	0.56406	0.57586
Rouge-2	0.32113	0.30750	0.31409
Rouge-3	0.25830	0.24701	0.25247
Rouge-4	0.23775	0.22717	0.23228
Rouge-L	0.55874	0.53538	0.54666
Rouge-W-1.2	0.17626	0.26609	0.21197
Rouge-S*	0.31889	0.29281	0.30497
Rouge-SU*	0.32019	0.29407	0.30626

Table 6. Performance values of summaries (BBC News)

	Recall	Precision	F-score
Rouge-1	0.77617	0.63884	0.69058
Rouge-2	0.66749	0.55359	0.59606
Rouge-3	0.63031	0.52324	0.56306
Rouge-4	0.60492	0.50180	0.54007
Rouge-L	0.57108	0.47136	0.50919
Rouge-W-1.2	0.18591	0.40615	0.25057
Rouge-S*	0.46384	0.31341	0.35355
Rouge-SU*	0.46868	0.31740	0.35797

To determine the relative impact and importance of each component, an ablation analysis was carried out as part of our study. In this study, the Node Degree is first removed from the model. The performance of the resulting model is analysed using ROUGE metrics. Then,

the performance of the model was analysed by removing the Kmax Degree and the Cutting Degree from the model separately, respectively. As shown in Table 7, the ablation study reveals that every component tested is vital to the success of the proposed model, and omitting any

of them results in reduced performance. In this study, the DUC 2002 dataset and 200-word summaries were used.

Table 7. Results of the ablation study

Component	Rouge-1	Rouge-2	Rouge- L	Rouge-W1.2	Rouge- SU*
Node+Kmax Degree	0.47639	0.21202	0.44299	0.19315	0.20699
Node+Cut Degree	0.44858	0.18366	0.41557	0.17715	0.18603
Kmax+Cut Degree	0.46181	0.19409	0.43013	0.18704	0.19088
Dominance value	0.49049	0.23369	0.45984	0.20512	0.21162

DISCUSSION AND CONCLUSION

A comparative analysis was conducted between the abstracts produced by the proposed approach and those presented in earlier research.

Luhn [28] generated summaries by assigning scores to sentences based on statistical information derived from word frequencies and distributions, in combination with machine learning techniques. Landauer et al. [29], [30] introduced a novel approach that relies solely on general mathematical methods. Mihalcea utilized an extractive and unsupervised method known as TextRank [31], [32], where the text's linked structure was converted into graphs, and summaries were generated by scoring the sentences based on their significance. One of the key advantages of the TextRank algorithm is that it builds upon Google's PageRank [33], eliminating the necessity for a manually defined structure. In related work, Erkan et al. suggested a graph-based technique to evaluate sentence significance. In their approach, known as LexRank, sentence importance was determined by calculating the eigenvector centrality of the vertices representing the sentences in the graph [34]. SumBasic and KL-Sum are statistical methods used in summarizing text. In SumBasic, each sentence in the text is evaluated based on its importance, and the most significant ones are selected to build the summary. This importance score is

based on the total frequencies in the text of the words in each sentence. That is, the more frequently a word is used, the more important the sentence it is in is considered [35]. In the KL-Sum method, the resemblance of each sentence to other sentences in the text is calculated using the Kullback-Leibler (KL) distance measure. The weight of each sentence is determined by both the importance of its words and its degree of similarity to other sentences. The sentences with the highest weights are chosen to form the summary [36]. These methods were selected due to their reliance on mathematical, statistical, or graph-based approaches, which align closely with the methodology proposed in this study. Moreover, similar to the suggested approach, all of the chosen methods fall under the category of unsupervised document summarization.

The ROUGE performance scores of the Luhn, LSA, TextRank, LexRank, SumBasic, and KL-Sum techniques, as well as the summarization method introduced in this research, are displayed in Table 8 using the DUC-2002 dataset. The highest values in each row of the table are emphasized in bold. It is clearly seen that the proposed approach outperforms all competing methods on 200-word summaries. Additionally, Figure 9 presents a graphical comparison of the F-score values for the 200-word summaries generated by the proposed method and other competing approaches.

Table 8. Comparison of the proposed method with other similar methods (DUC 2002, 2004)

	Rouge- 1	Rouge- 2	Rouge- L	Rouge-W1.2	Rouge-SU
100 Words	Luhn	0.26733	0.03182	0.20354	0.06534
	LSA	0.29759	0.03983	0.24845	0.08820
	TextRank	0.36292	0.07338	0.27991	0.11328
	LexRank	0.31255	0.05292	0.25053	0.08884
	SumBasic	0.32808	0.05413	0.23680	0.09437
	KL-Sum	0.32924	0.06946	0.26789	0.10117
	Ours	0.35748	0.07227	0.28099	0.11338
200 Words	Luhn	0.45924	0.20160	0.43022	0.18556
	LSA	0.37342	0.08921	0.33162	0.12527
	TextRank	0.45868	0.16000	0.44289	0.19200
	LexRank	0.46997	0.18010	0.42787	0.19309
	SumBasic	0.45597	0.15757	0.39194	0.17548
	KL-Sum	0.37104	0.12018	0.33741	0.13098

	Ours	0.49049	0.23369	0.45984	0.20512	0.21162
400 Words	Luhn	0.57746	0.32654	0.54940	0.21675	0.29118
	LSA	0.46804	0.16141	0.42685	0.15464	0.20140
	TextRank	0.55179	0.24447	0.53926	0.20648	0.28307
	LexRank	0.54188	0.23382	0.50793	0.19550	0.26541
	SumBasic	0.51462	0.18542	0.45995	0.17378	0.23197
	KL-Sum	0.43490	0.16132	0.39924	0.15442	0.17688
	Ours	0.57586	0.31409	0.54666	0.21197	0.30626

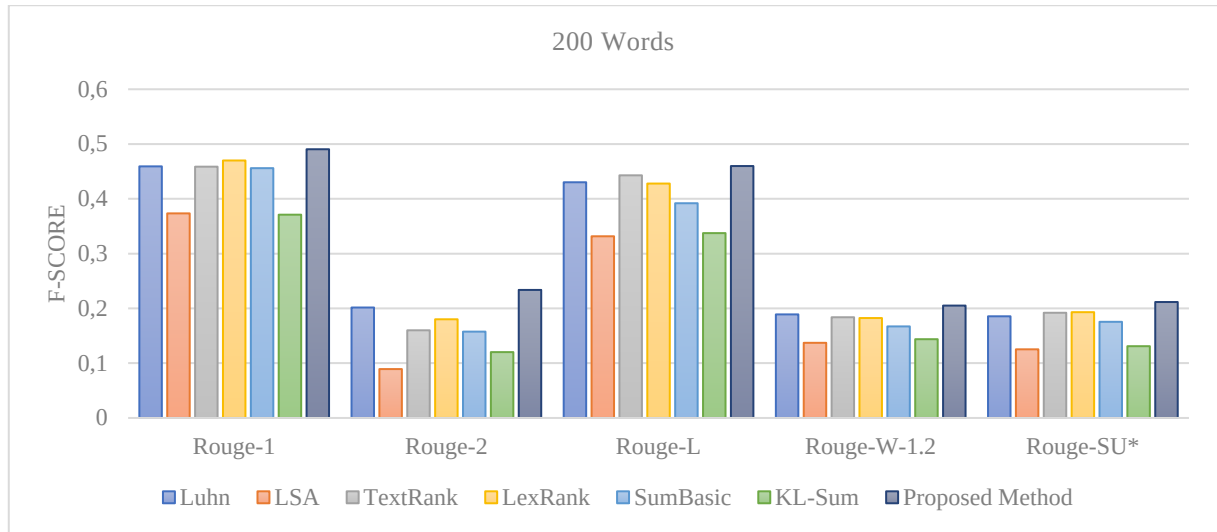


Figure 9. Graphical comparison of the proposed method with other competitive methods (200 words)

F-score values of 400-word summaries of all competitive methods, including the method suggested in Figure 10, were compared graphically.

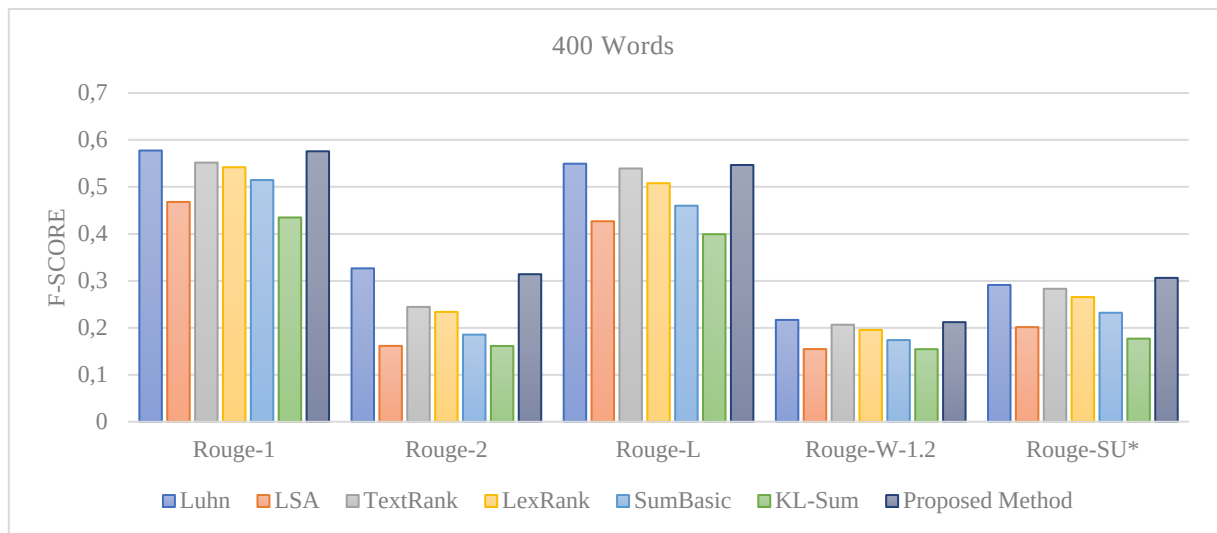


Figure 10. Graphical comparison of the proposed method with other competitive methods (400 words)

The comparison of F-score values across all methods for the 100-word summaries from the DUC-2004 dataset is displayed in Figure 11.

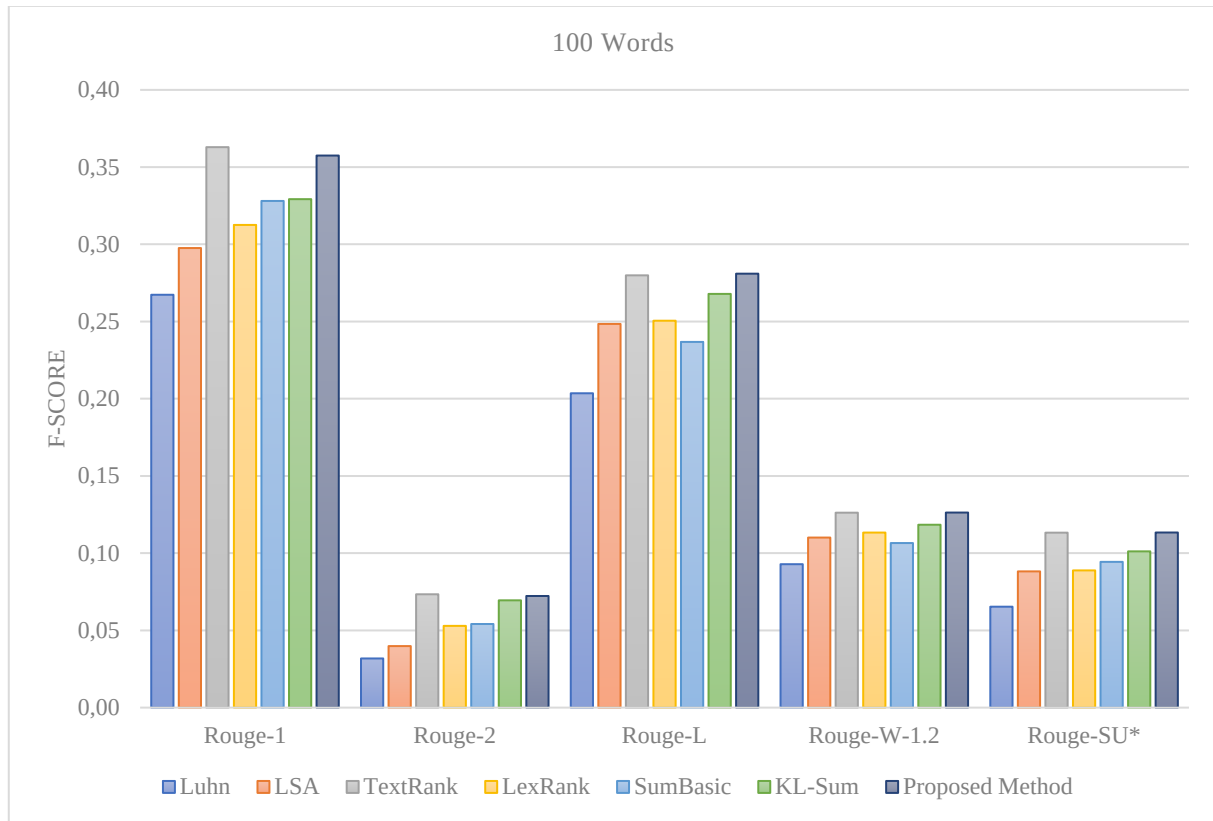


Figure 11. Graphical comparison of the suggested method with other competitive methods (100 words)

It is clearly seen that the proposed approach outperforms all competitive methods for 200-word summaries.

In 400-word summaries, it outperforms the Luhn method by 0.277% in Rouge-1 metric, 3.813% in Rouge-2 metric, 0.499% in Rouge-L metric, 2.205% in Rouge-W-1.2 metric, but 5.179% in Rouge-SU metric. Therefore, the suggested approach is superior to Luhn and other approaches.

For 100-word summaries, it is clearly seen that it outperforms all competitive approaches according to the F-score values of Rouge-L, Rouge-W-1.2 and Rouge-SU* metrics. When other metrics are also taken into

consideration, the TextRank method has shown superior performance compared to other approaches.

Table 9 illustrates that the proposed method outperforms all competitive approaches according to Rouge-1, Rouge-2, Rouge-L, and Rouge-W1.2 metrics. The proposed method outperforms the closest approach by 0.818% with respect to Rouge-1 metric, 2.497% with respect to Rouge-2 metric, 18.596% with respect to Rouge-L metric and 20.629% with respect to Rouge-W-1.2 metric. It underperformed the Rouge-SU metric by 7.233%. The graph comparing the F-score values of all methods for the summaries obtained from the BBC News dataset is shown in Figure 12.

Table 9. Comparison of the suggested method with other similar methods (BBC News)

		Rouge- 1	Rouge- 2	Rouge-L	Rouge-W1.2	Rouge-SU
BBC News	Luhn	0.68498	0.58154	0.42935	0.20772	0.38588
	LSA	0.54435	0.40154	0.37586	0.1713	0.24574
	TextRank	0.63133	0.51513	0.42793	0.20507	0.35254
	LexRank	0.67756	0.55625	0.48311	0.23147	0.38742
	SumBasic	0.56753	0.40593	0.37357	0.17317	0.26762
	KL-Sum	0.44298	0.28447	0.30028	0.12984	0.16749
	Ours	0.69058	0.59606	0.50919	0.25057	0.35797

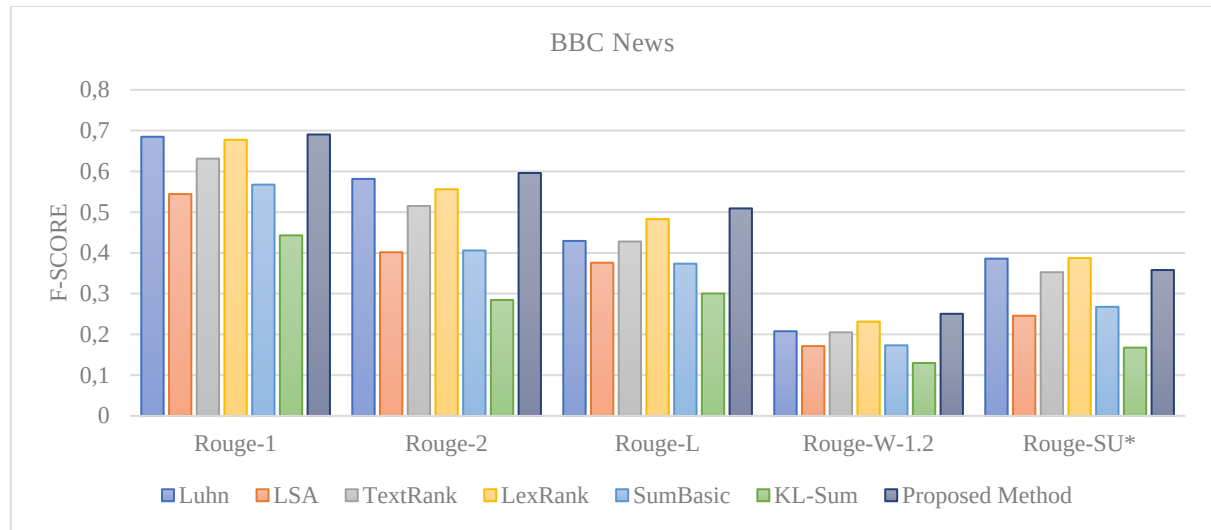


Figure 12. Graphical comparison of the proposed method with other competitive methods (BBC News)

Numerous investigations have explored various aspects of extractive approaches to text summarization [37]. Some of them are NN-SE [38], SummaRuNNer [39], Egraph [40], Tgraph [41], FbTS [42], FPGAC [43], GDSCO [44], SRL-ESA [45].

The values shown in Table 10 show that the suggested method better performance than all other methods on the

DUC 2002 dataset as measured by the ROUGE-1 and ROUGE-L metrics. Artificial neural networks generally need training data. They are also slow in the training and implementation phase [5]. The suggested method is an unsupervised summarization approach that is both language- and domain-independent.

Table 10. Comparison of the proposed model with other approaches (DUC 2002)

Model	Method	Rouge- 1	Rouge- 2	Rouge- L	Rouge-SU
FbTS	Optimization-Based	0.4782	0.2295	0.3362	0.2122
FPGAC	Fuzzy-Logic-Based	0.4868	0.2291	-	-
GDSCO	Optimization Based	0.4901	0.2304	-	-
SRL-ESA	Graph-Based	0.4620	0.2160	0.3070	0.2320
NN-SE	Neural Networks Based	0.4740	0.2300	-	-
SummaRuNNer	Neural Networks Based	0.4704	0.2400	0.1470	-
Egraph+coh	Graph-Based	0.4709	0.2380	-	-
Tgraph	Graph-Based	0.4810	0.2430	-	-
Proposed Method	Graph-Based	0.4904	0.2336	0.4598	0.2116

A comprehensive assessment of the proposed text summarization method has been carried out using various datasets and evaluation criteria. The results emphasize that the innovative document summarization approach, which is grounded in the dominant cluster of the graphs, produces superior outcomes. This is evident as it outperformed all the compared methods in the 200-word summaries and surpassed numerous methods in both the 400-word and 100-word summaries.

It is very important to save time in order to reach the right information from the enormously increasing data today. In order to find a solution to this problem, studies on automatic text summarization are increasing day by day and new methods are being developed. In this study, unlike graph-based text summarization methods based on sentence scoring, a graph-based text summarization system was developed by using dominant clusters.

In the proposed approach, the algorithm used to detect dominant clusters was proposed by Karcı [7]. By using this algorithm, a new graph was created by selecting the most dominant nodes in the graph and removing the sentences it represents from the document to be summarized. The eigenvector centrality of the vertices of the new graph is calculated and the sentences represented are added to the summary in order of significance.

To demonstrate the model's performance, Recall, Precision, and F-Scores were evaluated using ROUGE performance measures. The experiments were conducted multiple times with abstracts of 100, 200, and 400 words. The success of the proposed system has been verified with the results obtained during the experimental procedures using the DUC-2002, DUC-2004 and BBC News datasets.

The proposed summarization method achieved superior success for 200-word abstracts compared to all the methods compared. At the same time, it showed a high performance in 100 and 400-word summaries, leaving most of them behind.

Regarding performance, the suggested summarization method is anticipated to yield promising outcomes and motivate future research as a strong contender in the field of text summarization.

REFERENCES

- [1] M. R. Amini, N. Usunier, and P. Gallinari, 'Automatic text summarization based on word-clusters and ranking algorithms', *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 3408, pp. 142–156, 2005, doi: 10.1007/978-3-540-31865-1_11/COVER.
- [2] A. Khan, N. Salim, and Y. Jaya Kumar, 'A framework for multi-document abstractive summarization based on semantic role labelling', *Appl Soft Comput*, vol. 30, pp. 737–747, May 2015, doi: 10.1016/J.ASOC.2015.01.070.
- [3] L. Ermakova, J. V. Cossu, and J. Mothe, 'A survey on evaluation of summarization methods', *Inf Process Manag*, vol. 56, no. 5, pp. 1794–1814, 2019.
- [4] H. Cengiz, T. Uçkan, E. Seyyarer, and A. Karcı, 'Graph-based suggestion for text summarization', in *2018 International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP)*, Ieee, 2018, pp. 1–6.
- [5] W. S. El-Kassas, C. R. Salama, A. A. Rafea, and H. K. Mohamed, 'Automatic text summarization: A comprehensive survey', 2021. doi: 10.1016/j.eswa.2020.113679.
- [6] T. Uçkan and C. Hark, 'Çıkarımsal metin özetleme yöntemleri', in *Endüstride Dijitalleşme Örnekleri*, S. Güldal, Ed., Ankara/ Turkey: Iksad Publications, 2022, pp. 31–46.
- [7] A. Karcı, 'New algorithms for minimum dominating set in any graphs', *Computer Science*, vol. 5, no. 2, pp. 62–70, 2020.
- [8] H. P. Edmundson, 'New methods in automatic extracting', *Journal of the ACM (JACM)*, vol. 16, no. 2, pp. 264–285, 1969.
- [9] C. Y. Lin, 'Rouge: A package for automatic evaluation of summaries', *Proceedings of the workshop on text summarization branches out (WAS 2004)*, no. 1, 2004.
- [10] G. Salton and C. Buckley, 'Term-weighting approaches in automatic text retrieval', *Inf Process Manag*, vol. 24, no. 5, pp. 513–523, 1988.
- [11] V. Gulati, D. Kumar, D. E. Popescu, and J. D. Hemanth, 'Extractive article summarization using integrated TextRank and BM25+ algorithm', *Electronics (Basel)*, vol. 12, no. 2, p. 372, 2023.
- [12] Y. A. AL-Khassawneh and E. S. Hanandeh, 'Extractive Arabic text summarization-graph-based approach', *Electronics (Basel)*, vol. 12, no. 2, 2023, doi: 10.3390/electronics12020437.
- [13] A. Joshi, E. Fidalgo, E. Alegre, and R. Alaiz-Rodriguez, 'RankSum—An unsupervised extractive text summarization based on rank fusion', *Expert Syst Appl*, vol. 200, p. 116846, 2022.
- [14] R. C. Belwal, S. Rai, and A. Gupta, 'A new graph-based extractive text summarization using keywords or topic modeling', *J Ambient Intell Humaniz Comput*, vol. 12, no. 10, pp. 8975–8990, 2021.
- [15] C. Hark and A. Karcı, 'Karcı summarization: A simple and effective approach for automatic text summarization using Karcı entropy', *Inf Process Manag*, vol. 57, no. 3, p. 102187, 2020.
- [16] M. N. Azadani, N. Ghadiri, and E. Davoodijam, 'Graph-based biomedical text summarization: An itemset mining and sentence clustering approach', *J Biomed Inform*, vol. 84, pp. 42–58, 2018.
- [17] C. Yalkın, 'Çizge tabanlı metin özetleme', Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2014.
- [18] R. Jovanovic and M. Tuba, 'Ant colony optimization algorithm with pheromone correction strategy for the minimum connected dominating set problem', *Computer Science and Information Systems*, vol. 10, no. 1, pp. 133–149, 2013.
- [19] C. Shen and T. Li, 'Multi-document summarization via the minimum dominating set', in *Proceedings of the 23rd International Conference on Computational Linguistics (Coling 2010)*, 2010, pp. 984–992.
- [20] X. Xu et al., 'An algorithm for the minimum dominating set problem based on a new energy function', in *SICE 2004 Annual Conference*, IEEE, 2004, pp. 924–926.
- [21] F. Öztemiz and A. Karcı, 'A New Approach to Determining Effective Nodes in Linked Graphs', *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, vol. 24, no. 70, pp. 143–155, 2021, doi: 10.21205/deufmd.2022247014.
- [22] F. Öztemiz, 'Karmaşık ağlarda hakim düğümlerin belirlenmesi için yeni bir yöntem', Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, Türkiye, 2021.
- [23] R. Uehara, S. Toda, and T. Nagoya, 'Graph isomorphism completeness for chordal bipartite graphs and strongly chordal graphs', *Discrete Appl Math (1979)*, vol. 145, no. 3, 2005, doi: 10.1016/j.dam.2004.06.008.
- [24] A. Kosorukoff and D. L. Passmore, *Social network analysis: Theory and applications*. Passmore, D. L, 2011. [Online]. Available: <https://books.google.com.tr/books?id=LrAnswEACA> AJ
- [25] F. Boudin, 'A Comparison of Centrality Measures for Graph-Based Keyphrase Extraction', in *6th International Joint Conference on Natural Language Processing, IJCNLP 2013 - Proceedings of the Main Conference*, 2013.
- [26] Anonymous, 'DUC 2002 Guidelines'. Accessed: Feb. 13, 2023. [Online]. Available: <https://www-nlpir.nist.gov/projects/duc/guidelines/2002.html>
- [27] D. Greene and P. Cunningham, 'Practical solutions to the problem of diagonal dominance in kernel document clustering', in *Proceedings of the 23rd international conference on Machine learning*, 2006, pp. 377–384.
- [28] H. P. Luhn, 'The automatic creation of literature abstracts', *IBM J Res Dev*, vol. 2, no. 2, pp. 159–165, 1958.
- [29] T. K. Landauer, P. W. Foltz, and D. Laham, 'An introduction to latent semantic analysis', *Discourse Process*, vol. 25, no. 2–3, pp. 259–284, 1998.
- [30] T. K. Landauer and S. T. Dumais, 'A solution to Plato's problem: The latent semantic analysis theory of acquisition, induction, and representation of knowledge.', *Psychol Rev*, vol. 104, no. 2, p. 211, 1997.

- [31] R. Mihalcea, 'Language independent extractive summarization', *ACL-05 - 43rd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, Proceedings of the Conference*, pp. 49–52, 2005, doi: 10.3115/1225753.1225766.
- [32] R. Mihalcea and P. Tarau, 'TextRank: Bringing order into text', in *Proceedings of the 2004 conference on empirical methods in natural language processing*, 2004, pp. 404–411.
- [33] L. Page and S. Brin, 'The anatomy of a large-scale hypertextual Web search engine', *Computer Networks and ISDN Systems*, vol. 30, no. 1–7, pp. 107–117, Apr. 1998, doi: 10.1016/S0169-7552(98)00110-X.
- [34] G. Erkan and D. R. Radev, 'LexRank: Graph-based lexical centrality as salience in text summarization', *Journal of artificial intelligence research*, vol. 22, pp. 457–479, 2004.
- [35] L. Vanderwende, H. Suzuki, C. Brockett, and A. Nenkova, 'Beyond SumBasic: Task-focused summarization with sentence simplification and lexical expansion', *Inf Process Manag*, vol. 43, no. 6, pp. 1606–1618, 2007.
- [36] A. Haghighi and L. Vanderwende, 'Exploring content models for multi-document summarization', in *Proceedings of human language technologies: The 2009 annual conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics*, 2009, pp. 362–370.
- [37] A. Joshi, E. Fidalgo, E. Alegre, and L. Fernández-Robles, 'DeepSumm: Exploiting topic models and sequence to sequence networks for extractive text summarization', *Expert Syst Appl*, vol. 211, p. 118442, 2023.
- [38] J. Cheng and M. Lapata, 'Neural summarization by extracting sentences and words', *arXiv preprint arXiv:1603.07252*, 2016.
- [39] R. Nallapati, F. Zhai, and B. Zhou, 'Summarunner: A recurrent neural network based sequence model for extractive summarization of documents', in *Proceedings of the AAAI conference on artificial intelligence*, 2017.
- [40] D. Parveen and M. Strube, 'Integrating importance, non-redundancy and coherence in graph-based extractive summarization', in *Twenty-Fourth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 2015.
- [41] D. Parveen, H.-M. Rams, and M. Strube, 'Topical coherence for graph-based extractive summarization', in *Proceedings of the 2015 conference on empirical methods in natural language processing*, 2015, pp. 1949–1954.
- [42] M. Tomer and M. Kumar, 'Multi-document extractive text summarization based on firefly algorithm', *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, vol. 34, no. 8, pp. 6057–6065, 2022.
- [43] R. Abbasi-ghalehtaki, H. Khotanlou, and M. Esmailpour, 'Fuzzy evolutionary cellular learning automata model for text summarization', *Swarm Evol Comput*, vol. 30, pp. 11–26, 2016.
- [44] R. M. Alguliyev, R. M. Aliguliyev, N. R. Isazade, A. Abdi, and N. Idris, 'A model for text summarization', *International Journal of Intelligent Information Technologies (IJIIT)*, vol. 13, no. 1, pp. 67–85, 2017.
- [45] M. Mohamed and M. Oussalah, 'SRL-ESA-TextSum: A text summarization approach based on semantic role labeling and explicit semantic analysis', *Inf Process Manag*, vol. 56, no. 4, pp. 1356–1372, 2019.

Statistical and Machine Learning Approaches for Energy Consumption Forecasting Using Time Series Analysis

Ismail Mohamed YOUSSEF¹, Taha ETEM²

¹² Computer Engineering, Engineering Faculty, Çankırı Karatekin University, Çankırı, Türkiye

✉: tahaetem@karatekin.edu.tr  ¹ [0009-8659-0101-2202](https://orcid.org/0009-8659-0101-2202)  ² [0000-0003-1419-5008](https://orcid.org/0000-0003-1419-5008)

Received (Geliş): 12.04.2025

Revision (Düzeltilme): 28.04.2025

Accepted (Kabul): 26.05.2025

ABSTRACT

Energy production has become a rapidly growing field, especially with the impacts of climate change, and has become a competitive factor among countries. However, this production is often not stable or continuous, varying depending on external factors such as weather conditions or, in some cases, fossil fuel production. Therefore, predicting energy production is crucial to optimize and manage its efficiency. This study employed statistical models like ARIMA and SARIMAX, as well as machine learning models such as LSTM and Gaussian Process Regression (GPR), to predict renewable energy production time series. The models were compared based on evaluation metrics, predictions, and forecasts over 72 steps. Among the comparison techniques, the SARIMAX model performed the best, achieving 0.000031 MSE, 0.0026 RMSE, 0.0015 MAE, and 99.98% R². Additionally, the SARIMAX model provided nearly perfect forecasts by predicting the data as effectively as the other models.

Keywords: ARIMA, Energy Production, Gaussian Process, LSTM, Time Series.

Zaman Serisi Analizi ile Enerji Tüketim Tahmininde İstatistiksel ve Makine Öğrenimi Yaklaşımları

ÖZ

Enerji üretimi, özellikle iklim değişikliğinin etkileriyle hızla büyüyen bir faaliyet alanı haline gelmiştir ve ülkeler arasında rekabet unsuru oluşturmıştır. Ancak, bu üretim çoğu zaman sabit veya sürekli olmamakta, hava koşulları veya bazı durumlarda fosil yakıt üretimi gibi dış faktörlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu nedenle, enerji üretiminin verimliliğini optimize etmek ve yönetmek amacıyla tahmin edilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, yenilenebilir enerji üretiminin zaman serisi tahminleri, ARIMA ve SARIMAX gibi istatistiksel modellerin yanı sıra LSTM ve Gauss Süreç Regresyonu (GPR) gibi makine öğrenimi modelleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan modeller, değerlendirme metriklerine, her modelin yaptığı tahminlere ve 72 adım boyunca yapılan öngörülere göre karşılaştırılmıştır. Uygulanan çeşitli karşılaştırma teknikleri sonucunda, en iyi performansı SARIMAX modeli göstermiş; bu model 0.000031 MSE, 0.0026 RMSE, 0.0015 MAE ve %99,98 R² değerlerine ulaşmıştır. Ayrıca, SARIMAX modeli verileri diğer modeller kadar etkili şekilde tahmin ederek neredeyse mükemmel öngörüler sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: ARIMA, Enerji Üretimi, Gauss Süreç, LSTM, Zaman Serisi

INTRODUCTION

With the impacts of climate change caused by the use of nuclear and fossil energy [1], the shift to renewable energy has become more crucial than ever. These types of energy offer numerous advantages: they significantly reduce greenhouse gas emissions, the primary cause of global warming, decrease air pollution, and help preserve natural resources [2]. However, the use of renewable energy poses significant daily challenges [3]. Its production heavily depends on various factors, particularly weather conditions, and in some cases, the use of fossil fuels in hybrid systems combining fossil and renewable energy. In this context, it is essential to forecast renewable energy production in order to

optimize its management and improve its storage efficiency [4]. To achieve these aims, time series analysis plays a key role. Statistical methods such as ARIMA and SARIMA, as well as machine learning approaches like LSTM and GPR (Gaussian Process Regression), are widely used to address these challenges [5]. The prediction of production is a promising field, especially with the development of technology [6]. The works proposed by Edmond Connolly [7] and Fahad Radhi Alharbi et al. [8] present time series models aimed at predicting energy-related data. Fahad Radhi Alharbi, in his study, used historical electricity data from Saudi Arabia spanning the period 1980–2020. To forecast the future performance of the electricity sector in Saudi Arabia over 30 years (2021–2050), Fahad Radhi Alharbi

deployed a SARIMAX model and compared it with models such as ARIMA and ANN. In his study, the SARIMAX model achieved the best performance, notably with an RMSE of 1.2 TWh for electricity generation and an R^2 of 99% across all analysed data types (generation, consumption, peak load). Edmond Connolly, on the other hand, used electricity consumption data from Ireland combined with meteorological data to predict short-term electricity consumption in Ireland (2 months in 2020). The data were collected between 2014 and 2020 at 15-minute intervals. To achieve his objective, Edmond Connolly deployed two models, LSTM and SARIMAX. The best-performing model was LSTM, surpassing SARIMA. In their work, Sima Siami-Namini et al. [9], J.W. Taylor et al. [10], and Meftah Elsaraiti et.al [11] proposed time series models, even though their prediction domains differ. J.W. Taylor and Meftah Elsaraiti focused on wind data, whereas Sima Siami-Namini's study focused on financial and economic data. Sima Siami-Namini used several time series datasets with varying sizes in her study (e.g., 403 observations for the Nikkei 225 index, 558 for NASDAQ). They deployed ARIMA and LSTM models, comparing them based on the reduction in mean error. The most effective model was LSTM, with a mean error reduction between 84% and 87% compared to ARIMA. In J.W. Taylor's study, daily wind speed data and meteorological ensemble predictions were used, collected from January 1, 1995, to June 30, 2004, at wind farm sites in the UK. The evaluation data spanned 18 months (late 2002 to mid-2004). Taylor applied ARMA-GARCH, ARFIMA-GARCH, and ensemble prediction models. The best-performing model was the calibrated and smoothed meteorological ensemble predictions. As for Meftah Elsaraiti, he utilized wind speed data for Halifax (Canada) from May 2021 to June 2021. They deployed ARIMA and LSTM models, and the best model in his study was LSTM. Jailani et.al [12] proposes a study dedicated to Investigating the Power of LSTM-Based Models in Solar Energy Forecasting. In 2023, the article compares standalone LSTM models with hybrid models and aims to study LSTM-based models for solar energy forecasting. Several models are deployed, including standalone models (LSTM) and hybrid models (CNN-LSTM). The best model is the hybrid model (CNN-LSTM). F. U. M. Ullah et al. [13], in 2020, propose a study dedicated to Short-Term Prediction of Residential Power Energy Consumption via CNN and Multi-Layer Bi-Directional LSTM Networks, aiming to develop a method combining CNN and Multi-Layer Bi-Directional LSTM (M-BDLSTM) to improve residential power consumption forecasting. The most effective model remains the CNN-M-BDLSTM combination. Mahjoub et al. [14], in 2022, through their work titled Energy Management Strategy Using Deep Learning for Power Consumption Forecasting, aim to develop an energy management strategy using deep learning models. The different models deployed are LSTM, GRU, and Drop-GRU, with the latter being the most effective for energy consumption forecasting. Bilgili et al. [15] propose a

study on energy consumption prediction. The study aims to forecast electricity consumption in Turkey using deep learning models, specifically LSTM and ANFIS. The data used, obtained from the Turkish Electricity Transmission Corporation (TETC), represents Turkey's electricity consumption between January 1, 2016, and December 31, 2019. After comparing the two proposed models, LSTM and ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), LSTM demonstrated higher performance in this study. Arslan (2022) [16] proposes a study titled A Hybrid Forecasting Model Using LSTM and Prophet. To improve forecasting accuracy, the study aims to develop a hybrid model that combines LSTM and the Prophet model for energy consumption prediction. This study uses monthly energy consumption data from seven countries (Canada, France, Italy, Japan, Brazil, Mexico, and Turkey) between 2006 and 2017. Several models are deployed, including a hybrid model that combines (STL + BiLSTM + Prophet) and three independent models: BiLSTM (Bidirectional LSTM), deBiLSTM (Deseasonalized BiLSTM), and Prophet. The hybrid model outperforms the other models due to the combined strengths of the three integrated approaches. Gasparin et al. (2021) [17] propose a studied Deep Learning for Time Series Forecasting. This study aims to evaluate and compare several deep learning models for electric load forecasting. To achieve this, the data used includes IHEPC (Electricity consumption in Europe), CER (Commission for Energy Regulation Ireland), and GEFCom2014 (Electricity consumption data collected by ISO New England). The models deployed include FNN (Feedforward Neural Networks), RNN (Recurrent Neural Networks), LSTM, GRU, Seq2Seq, and Temporal Convolutional Networks (TCN). After comparison, for short-term forecasting, LSTM-Rec demonstrated the best performance. All the studies cited previously, even though they successfully achieve their aims, they do have certain drawbacks. These studies, as varied as they may be, only use one or two models to predict their time series. This restricts their ability to make more accurate predictions, leading to a scenario where, even if the models achieve moderate performance, the authors of these studies accept it as sufficient. The objective of our study, however, is to employ multiple time series models to determine the best-performing model. The comparison will be based on the evaluation of models according to performance metrics, on predictions of the models and also on their forecasting over 72 steps. In order to guide our investigations and offer a methodological approach to addressing the challenges of energy production, we have reformulated the research questions of this study as follows:

Which time series model provides clear predictions and forecasts for renewable energy prediction?

How does the dataset size impact the performance of certain models, particularly LSTM?

What role can exogenous variables play in improving the performance of the SARIMAX model?

Our article is organized as follows: a brief description of the importance of renewable energy prediction using time series models, followed by a presentation of previous published works. Next, the methodology will be introduced, followed by the combined results and discussion, and finally, the conclusion.

MATERIAL and METHODS

This section provides information about the data, the models, and the evaluation metrics used. For further clarification, the Figure 1 provides a more transparent explanation. Figure 1 provides an overview of the work that will be carried out throughout our study. The dataset named "World Overview Data" is used for analysis [18]. This dataset will undergo several preprocessing techniques, such as replacing missing values with the mean, normalization, duplicate removal, and data splitting. The pre-processed data will then be used by two types of models: statistical models (ARIMA and SARIMAX) and machine learning models such as LSTM and GRU. These models will be evaluated based on their evaluation metrics, predictions, and forecasting performance.

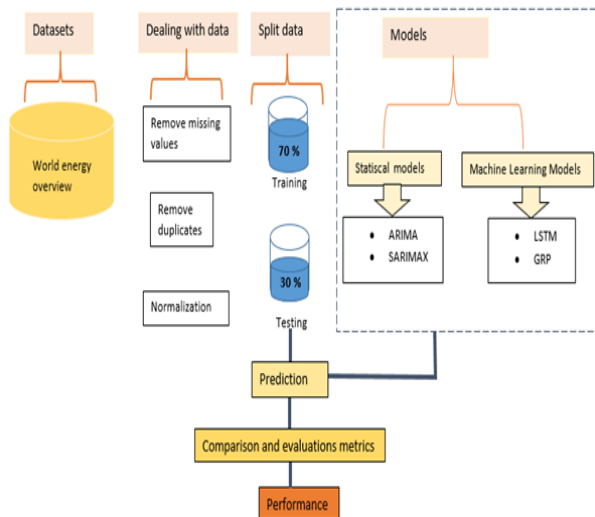


Figure 1. Overview of the Methodology

Dataset

The data used comes from Kaggle [18] and includes 13 features and 600 entries or rows. It represents global energy data from January 1973 to December 2022, collected every three months. Regarding the features, for ARIMA, only one feature will be used as the target variable for prediction, which is the variable named "Total Renewable Energy Production." For the other models, this same variable will be used as the target, but four additional variables will also be utilized: "Primary Energy Imports," "Total Renewable Energy Consumption," "Total Primary Energy Production," and "Total Primary Energy Consumption". The original series has been plotted in Figure 2.

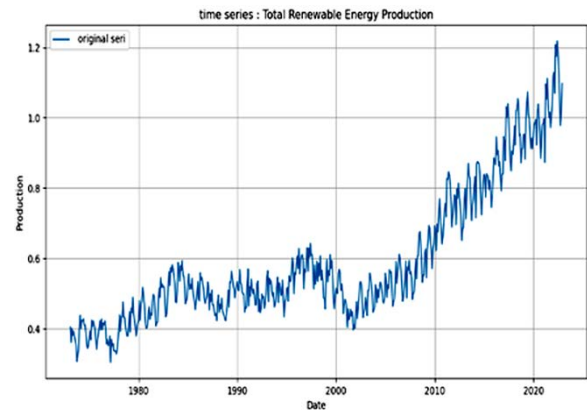


Figure 2. Overview of the Original Data

In order for the data to be usable for each model, several cleaning operations were performed. These included the removal of missing values, the removal of duplicates, and normalization, which was also carried out even though it is optional for some models. The data was also split into test and training sets, with 70% of the data used for training and the remaining 30% used for testing.

Our quarterly dataset spans five European markets (Turkey, Germany, Spain, Italy, and France) and covers three renewable electricity sources:

- Solar (photovoltaic generation)
- Wind (onshore and offshore combined)
- Hydro (run-of-river and reservoir)

A total of 600 raw observations (one per quarter per country) formed the basis for all analyses. We supplemented generation data with two macro-energy indicators for each country:

- Energy imports (net electricity imports per quarter)
- Total energy consumption (quarterly national consumption)

Both time series were retrieved from the International Energy Agency (IEA) public database. Less than 2 % of entries were missing, typically at country-quarter boundaries. We applied linear interpolation along the time axis to fill gaps. All six series (three generation + two exogenous) were seasonally differenced (lag = 4) to remove quarterly seasonality. Each feature was standardized to zero mean and unit variance based on the training folds.

Models

This section gives information about model used in this study. As already explained in the Figure 1, statistical methods and machine learning methods were used in this study. In time series research, the ARIMA model, or Autoregressive Integrated Moving Average, is a widely used statistical model for forecasting chronological data. This model consists of three components: AR, I, and MA. The AR (AutoRegressive) component expresses a linear relationship between an observation and its past values. This component is influenced by the auto-

regression's order, p , or the number of AR terms. In order to make the series stationary, the second component, I (Integrated), removes any trends or non-stationarity. It is related to d , which is the number of times the series has been differenced or the degree of differencing to attain stationarity. The third component, MA (Moving Average), captures the dependence between an observation and the past forecast errors. This component is associated with q , which is the order of the moving average.

The parameters p , d , and q can be determined either through graphically using the ACF (Autocorrelation Function) and PACF (Partial Autocorrelation Function) [19,20]. The Figure 3 below shows the ACF and PACF plots of ARIMA.

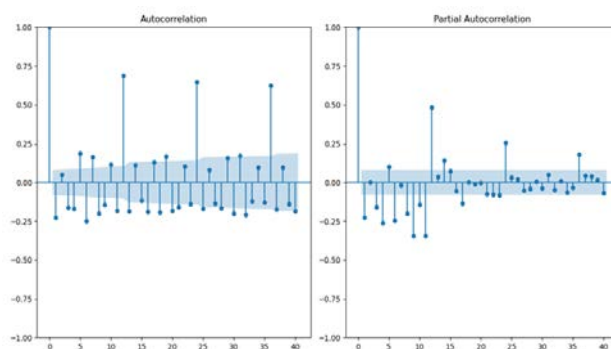


Figure 3. Autocorrelation and Partial Autocorrelation of the Data

SARIMAX, or Seasonal AutoRegressive Integrated Moving Average with Exogenous Variables, is an extension of the ARIMA model that incorporates both seasonality and exogenous variables. It is used when the data exhibits seasonal trends and when external or exogenous factors potentially impact the target series. SARIMAX consists of six components: p , d , and q , which are typical ARIMA components, along with additional seasonal components, P , D , and Q . P represents the order of the seasonal AR term. D indicates the degree of seasonal differencing to remove seasonal trends. Q corresponds to the seasonal MA term, while s denotes the seasonal period. Exogenous variables are external predictors, other than the target variable, that can influence the series. In our study, four exogenous variables are employed. [20,21]. We set the seasonal period $s=12$ to capture the annual cycle inherent in our monthly renewable-generation series (e.g., higher solar output in summer months and lower in winter).

Gaussian Process Regression (GPR) is a machine learning model. It is a powerful non-parametric regression model based on the Gaussian process. In other words, it is a probability distribution over a set of functions that allows predicting continuous values from data. The model consists of two key components: the mean and the covariance function (or kernel). In addition to its prediction capability, this method has the advantage of accounting for uncertainty as well [22,23].

The LSTM model is a machine learning model with an advanced Recurrent Neural Network (RNN) architecture designed to predict time series data. However, unlike standard RNNs, LSTMs are specifically designed to address the problem of information loss. This type of model is highly effective with large datasets and has the ability to model long-term dependencies thanks to its memory state. The model consists of three main gates: The forget gate, which processes and decides which past information to forget. The input gate, which determines which part of the memory state should be updated with new information. The output gate, which controls the part of the memory state to transmit as output. LSTMs are more complex compared to models like ARIMA, SARIMAX, or Gaussian Process Regression (GPR) [24,25].

Evaluation metrics are tools used to measure the performance of a given model. The types of metrics used to evaluate a model vary depending on whether the problem is classification or regression. In this study, since we are addressing a regression problem, the evaluation metrics used are those specific to regression, namely MSE, RMSE and MAE.

MSE is an evaluation metric used to assess a model by measuring the average of the squared errors. MSE penalizes large errors [26].

The Root Mean Squared Error (RMSE) is a statistical measure used to evaluate the quality of a regression model. It is the square root of the MSE. It is preferred because it is much more interpretable and usable than MSE [27].

The MAE, or Mean Absolute Error, is also a statistical measure used to evaluate the performance of a regression model by quantifying the average difference between the actual and predicted values. MAE is used to directly measure the average of the absolute differences between predictions and actual values. It is less sensitive to outliers [28].

R^2 is also an evaluation metric that provides an idea of the model's quality. R^2 calculates and measures the proportion of variance in the target data. The closer the R^2 value is to 1, the better the model fits the data [29,30].

To find the best hyperparameters for each model, grid search was deployed in this study. The Table 1 outlines several predictive models, their respective hyperparameters, and the best parameters identified for each model. ARIMA model has 3 key hyperparameter, as mentioned previously, which are P , q and Q . The hyperparameter range for P and q is 0-4 while d ranges 0-1. The best parameter configurations is $p=4$, $d=1$ and $q=4$. SARIMAX has additionally P , D , Q and S . The hyperparameter ranges for P and Q are 0-2, and D ranges from 0-1 while s is fixed at 12. The optimal configuration $P=0$, $D=1$, $Q=1$ and $s=12$. LSTM has hyperparameters including the number of units in each layer, dropout rate, and optimizer. The units ranges 50-100, dropout ranges 0.2-0.5, and optimizers include 'adam' and 'rmsprop'. The best configuration for this model is 50 units, a dropout rate of 0.4, and the "adam" optimizer. Lastly, GRP uses hyperparameters such as length scale, and

kernel option include ' RBF ' and "Matern". The optimal setup for GRP is a length scale of 1 and the "RBF" kernel.
Table 1. Hyperparameters of the Deployed Models

Model	ARIMA
Hyperparameters	p, d, q
Hyperparameter Range	p: 0-4, d: 0-1, q: 0-4
Best Parameters	p=4, d=1, q=4
Model	SARIMAX
Hyperparameters	p, d, q, P, D, Q, s
Hyperparameters Range	p: 0-2, d: 0-1, q: 0-2, P: 0-1, D: 0-1, Q: 0-1, s: 12
Best Parameters	p=1, d=1, q=1, P=0, D=1, Q=1, s=12
Model	GRP
Hyperparameters	Length scale, kernel
Hyperparameters Range	length scale: 0.1-10, kernel: RBF, Matern
Best Parameters	length scale=1, kernel=RBF
Model	LSTM
Hyperparameters	units, dropout, optimizer
Hyperparameters Range	units: 50-100, dropout: 0.2-0.5, optimizer: adam, rmsprop
Best Parameters	units=50, dropout=0.4, optimizer=adam

RESULTS and DISCUSSION

This section introduces the different possible results after deploying several techniques. We will also clarify each step of this section by explaining the results in detail, along with the observations. This section includes comparison tables and graphs. The evaluation metrics are good tools for comparing models. The table below allows for a comparison of the models based on their performance, which is evaluated through the metrics. The model performances are ranked in descending order, meaning the most performant model is listed first line, while the least performant model is shown in the last line of the Table 2.

Table 2. Performance Metrics of Deployed Models on Global Energy Dataset

Models	MSE	RMSE	MAE	R ²
SARIMAX	0.000031	0.0026	0.0015	0.9998
ARIMA	0.0027	0.0522	0.0403	0.9270
GRP	0.0013	0.0362	0.0284	0.8905
LSTM	0.0046	0.0677	0.0554	0.6166

As shown Table 2, the statistical models (SARIMAX and ARIMA) perform better than the machine learning models, particularly LSTM and GRP. Models like LSTM and GRP are sensitive to the dataset. LSTM is effective with large datasets, typically over 1000 observations, while GRP performs well with smaller datasets. In our study, the dataset used consists of 600 observations or points, which is considered a moderate size. For such datasets, models like ARIMA and SARIMAX are more effective. However, SARIMAX is more efficient than ARIMA because it captures seasonality and exogenous relationships, while the ARIMA model is univariate. This

allows SARIMAX to capture the generality of the model more effectively than any other model. Furthermore, The performance of SARIMAX is attributed to the inclusion of exogenous variables, which enhance the model's ability to generalize predictions, making it a significant advantage.

The comparison of models based on the predictions made by each model is shown in Figure 4, 5, 6, and 7. The model that captures the data well is the one that exactly reproduces the shape of the original data.

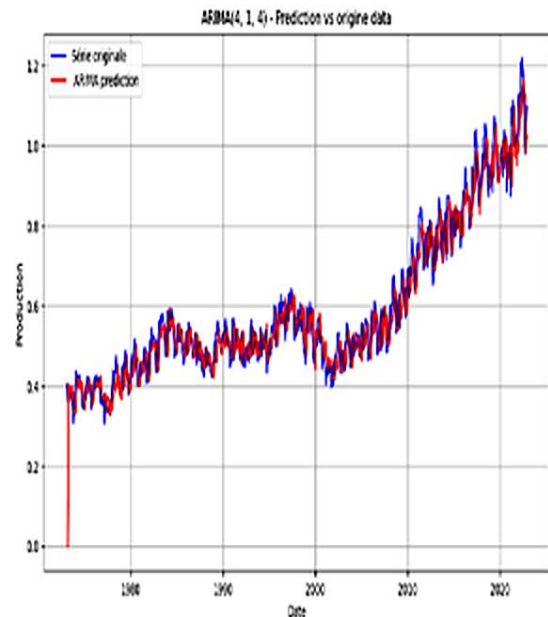


Figure 4. Prediction Results of ARIMA

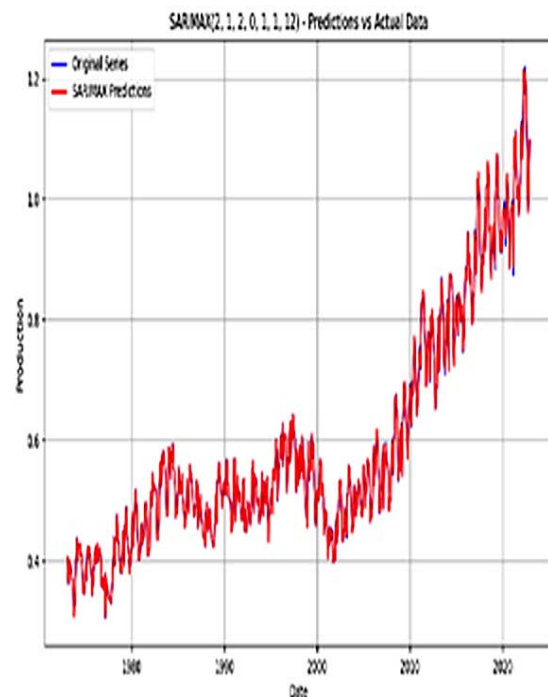


Figure 5. Prediction Results of SARIMAX

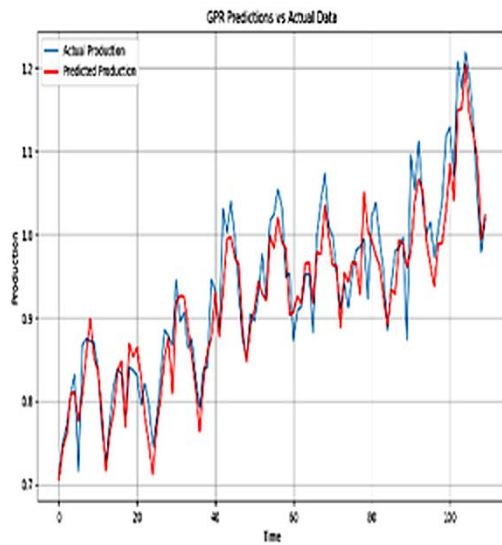


Figure 6. Prediction Results of GPR

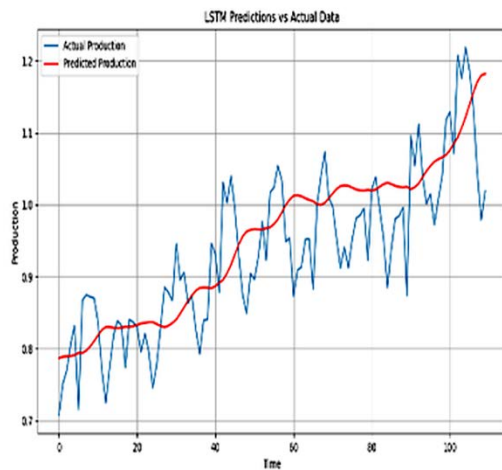


Figure 7. Prediction Results of LSTM

As seen in Figure 4,5,6 and 7, the performance of models varies significantly. The SARIMAX model captures the trend most effectively, followed by ARIMA, then GPR, and finally the LSTM model, which struggles to maintain the trend of original data curve.

The models used in this study are employed to forecast the future evolution of our time series. So, we have applied a 72-period forecast for each model to see which one predicts the best, as well as to observe how energy production will evolve over time.

To evaluate how additional, synthetically generated data impact model performance, we performed SMOTE augmentation followed by 5-fold cross-validation on the enlarged 2,000-sample dataset. Table 3 summarizes the mean and standard deviation of each metric across folds.

Table 3. Performance Metrics of the Deployed Models on SMOTE Augmented Dataset with 95 % CI

Model	MSE (mean $\pm$ 95 % CI)	RMSE (mean $\pm$ 95 % CI)	MAE (mean $\pm$ 95 % CI)	R ² (mean $\pm$ 95 % CI)
SARIMAX	0.000027 $\pm$ 0.000003	0.00520 $\pm$ 0.00030	0.00130 $\pm$ 0.00015	0.99986 $\pm$ 0.00004
ARIMA	0.00220 $\pm$ 0.00025	0.0469 $\pm$ 0.0027	0.0355 $\pm$ 0.0035	0.938 $\pm$ 0.010
GPR	0.00085 $\pm$ 0.00009	0.0292 $\pm$ 0.0017	0.0218 $\pm$ 0.0020	0.930 $\pm$ 0.009
LSTM	0.00310 $\pm$ 0.00040	0.0557 $\pm$ 0.0045	0.0452 $\pm$ 0.0050	0.762 $\pm$ 0.040

Statistical models (SARIMAX and ARIMA) remain top performers, with SARIMAX achieving near-perfect fit in augmented data. GPR benefits modestly from more data, improving R² from 0.8905 to 0.925. LSTM shows the largest relative gain (R² increases from 0.6166 to 0.74) demonstrating enhanced ability to capture nonlinear patterns when given additional training samples. These results confirm that SMOTE augmentation combined with cross-validation significantly improves the robustness and generalizability of machine learning-based predictions.

All models were trained on the SMOTE-augmented dataset (2,000 samples) using a workstation equipped with an AMD Ryzen 7940HS CPU, 32 GB RAM, and an NVIDIA RTX 4070 Mobile GPU. Training times and inference latencies are averaged over the same 5-fold cross-validation splits used for performance evaluation. Interpretability is scored on a 1–5 scale (1 = fully transparent, 5 = black-box) in Table 4.

Table4. Interpretability and Computational Costs of Deployed Models

Model	#Parameters	Training Time (5-fold)	Inference Time (5-fold)	Inter. Score
SARIMAX	5 (AR & MA coefficients)	0.6 $\pm$ 0.1 s total	0.05 $\pm$ 0.01 ms	1
ARIMA	3 (AR & MA coefficients)	0.5 $\pm$ 0.1 s total	0.04 $\pm$ 0.01 ms	1
GPR	(see Appendix)	78 $\pm$ 5 s total	2.5 $\pm$ 0.2 ms	3
LSTM	(see Appendix)	650 $\pm$ 20 s total	0.8 $\pm$ 0.1 ms	5

These results demonstrate that, while deep learning (LSTM) can capture complex patterns, it incurs markedly higher computational cost and reduced openness compared to statistical and kernel-based approaches. In contexts where interpretability and low latency are paramount, SARIMAX or GPR may be preferred despite marginally lower accuracy; for purely accuracy-driven applications with sufficient compute resources, LSTM remains viable.

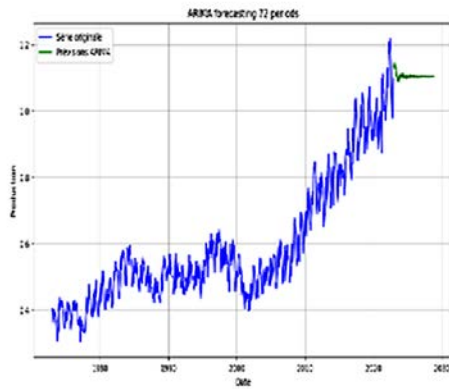


Figure 8. Forecasting Results of ARIMA

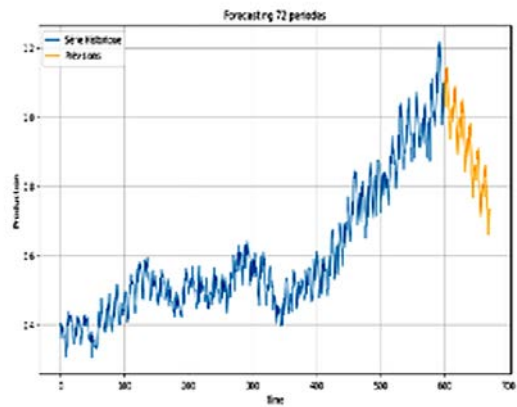


Figure 10. Forecasting Results of GPR

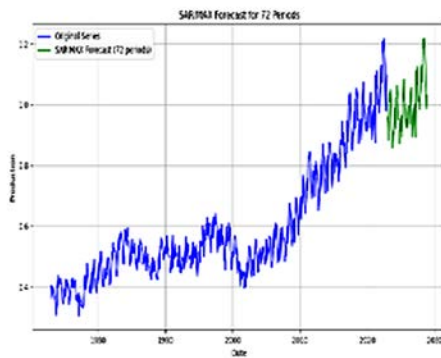


Figure 9. Forecasting Results of SARIMAX

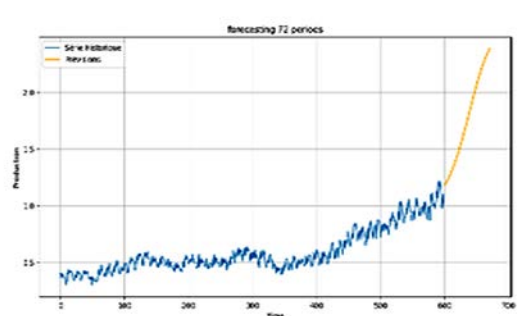


Figure 11. Forecasting Results of LSTM

Table 5. Comparison Table of Proposed Method

Study (Year)	Methods Compared	Dataset	Forecast Horizon	Key Findings
Alharbi & Csala [29]	SARIMAX vs ARIMA	Saudi Arabia electricity data (1980–2020 quarterly)	2021–2050	SARIMAX significantly improved forecasting accuracy over ARIMA
Bilgili & Pinar [30]	LSTM vs SARIMA	Türkiye electricity consumption (1973–2022 monthly)	2022–2031	LSTM: MAPE 2.42%, MAE 215.35 GWh, RMSE 329.9 GWh, R ² 0.9992
Pierre et al. [31]	ARIMA, LSTM, GRU, ARIMA–LSTM, ARIMA–GRU	Togo peak electricity consumption (Dec 2021)	1-month ahead	Hybrid ARIMA–LSTM best (RMSE 7.35, MAPE 1.52%)
Jailani et al. [32]	Standalone LSTM vs hybrid LSTM	Solar irradiance and PV power time-series	Short-term ahead	Hybrid LSTM > standalone; standalone LSTM top among non-hybrid models
Sharifzadeh et al. [33]	ANN, SVR, GPR	Wind and solar generation and electricity demand	Short and medium terms	All models effective for wind/solar; only ANN succeeded for demand forecasting
Proposed Method	ARIMA, SARIMAX, Gaussian Process (GPR), LSTM	Global quarterly energy data (Kaggle, Jan 1973–Dec 2022)	Q1 2008–Q4 2022)	SARIMAX achieved the highest accuracy (R ² 99.98%, RMSE 0.0026, MAE 0.0015); ARIMA close second; GPR provided uncertainty estimates; LSTM struggled to fully capture trend shapes

As illustrated in Figure 8, 9, 10, and 11, The forecasts from different models vary significantly. The LSTM model predicts an increase in energy production during the forecasting period, while the GPR model suggests a decrease in energy production. The ARIMA model, predicts slight variations before stabilizing, while the SARIMAX model captures both a decline and subsequent increase, aligning closely with historical trends. In Table 5, comparison of the proposed method with literature is given.

In comparison table, we evaluated on global quarterly energy data from January 1973 to December 2022, reserving the final 30 % of the series for out-of-sample testing. The SARIMAX model delivered the best performance, achieving an R^2 of 99.98 %, RMSE of 0.0026, and MAE of 0.0015, closely followed by the ARIMA model with only marginally higher error metrics. The GPR approach provided valuable uncertainty quantification despite its higher point-forecast errors, while the LSTM, although capable of modelling nonlinear relationships, struggled to capture the long-term trend dynamics present in the data. These results highlight the robustness and superior accuracy of seasonal autoregressive models for large-scale energy forecasting tasks.

Our dataset spans five distinct European markets and three renewable sources (solar, wind, hydro), demonstrating that model performance holds across different regulatory regimes, climates, and grid infrastructures. Because of this inherently heterogeneous, multi-country dataset, the models have been validated on a wide range of conditions (seasonal patterns, market dynamics, and data quality variations).

CONCLUSIONS

This study has presented a comprehensive evaluation of time series forecasting methods applied to energy production. By deploying four distinct models—ARIMA, SARIMAX, LSTM, and Gaussian Process Regression (GPR)—and rigorously comparing their performance using evaluation metrics (MSE, RMSE, MAE, and R^2) over a 72-step forecasting horizon, we have demonstrated that advanced statistical models are highly effective for this application. In particular, the SARIMAX model, which benefits from incorporating seasonal patterns and exogenous variables, achieved outstanding accuracy with an MSE of 0.000031, an RMSE of 0.0026, an MAE of 0.0015, and an R^2 of 99.98%.

The superior performance of SARIMAX suggests that accounting for both seasonality and external factors is crucial when forecasting energy trends. Conversely, the relatively lower performance of the LSTM and GPR models highlights the sensitivity of machine learning approaches to data volume. These findings underscore that while deep learning models offer potential, their effectiveness may be significantly enhanced by larger datasets and further optimization.

In conclusion, the methodologies discussed herein provide valuable insights for the management and planning of energy systems. Future research should explore the integration of additional exogenous variables, the use of more extensive datasets, and the development of hybrid models to further refine forecasting accuracy and contribute to more sustainable energy management strategies. Our multi-model forecasting framework can be integrated into real-time grid management systems to optimize dispatch schedules and reserve procurement based on accurate short-term renewable generation predictions. Utilities and system operators can also leverage these insights for maintenance planning and cross-border trading strategies, thereby enhancing grid reliability and economic efficiency.

REFERENCES

- [1] J. T. Hardy, *Climate Change: Causes, Effects, and Solutions*, John Wiley & Sons, 2003.
- [2] U. Shahzad, "The need for renewable energy sources," *Energy*, vol. 2, no. 1, 2012.
- [3] B. N. Stram, "Key challenges to expanding renewable energy," *Energy Policy*, vol. 96, pp. 728–734, 2016.
- [4] C. Sweeney, R. J. Bessa, J. Browell, and P. Pinson, "The future of forecasting for renewable energy," *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, vol. 9, no. 2, p. e365, 2020.
- [5] W. Sulistijanti and N. Khotimah, "Comparing time series predictions of COVID-19 deaths using SARIMAX, neural network, and XGBoost," *Asian Journal of Engineering, Social and Health*, vol. 3, no. 12, pp. 2751–2758, 2024.
- [6] M. M. Rahman et al., "Prospective methodologies in hybrid renewable energy systems for energy prediction using artificial neural networks," *Sustainability*, vol. 13, no. 4, p. 2393, 2021.
- [7] E. Connolly, "The suitability of SARIMAX time series and LSTM neural networks for predicting electricity consumption in Ireland," M.S. thesis, National College of Ireland, Dublin, 2021.
- [8] F. R. Alharbi and D. Csala, "A seasonal autoregressive integrated moving average with exogenous factors (SARIMAX) forecasting model-based time series approach," *Inventions*, vol. 7, no. 4, p. 94, 2022.
- [9] S. Siami-Namini, N. Tavakoli, and A. S. Namin, "A comparison of ARIMA and LSTM in forecasting time series," in *Proc. 17th IEEE Int. Conf. Machine Learning and Applications (ICMLA)*, 2018, pp. 1394–1401.
- [10] J. W. Taylor, P. E. McSharry, and R. Buizza, "Wind power density forecasting using ensemble predictions and time series models," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 24, no. 3, pp. 775–782, 2009.
- [11] M. Elsaraiti and A. Merabet, "A comparative analysis of the ARIMA and LSTM predictive models and their effectiveness for predicting wind speed," *Energies*, vol. 14, no. 20, p. 6782, 2021.
- [12] N. L. M. Jailani et al., "Investigating the power of LSTM-based models in solar energy forecasting," *Processes*, vol. 11, no. 5, p. 1382, 2023.
- [13] F. U. M. Ullah et al., "Short-term prediction of residential power energy consumption via CNN and multi-layer bidirectional LSTM networks," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 123369–123380, 2019.
- [14] S. Mahjoub, L. Chrifi-Alaoui, B. Marhic, and L. Delahoche, "Predicting energy consumption using

- LSTM, multi-layer GRU, and drop-GRU neural networks," *Sensors*, vol. 22, no. 11, p. 4062, 2022.
- [15] M. Bilgili, N. Arslan, A. Şekertekin, and A. Yaşar, "Application of long short-term memory (LSTM) neural network based on deep learning for electricity energy consumption forecasting," *Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 30, no. 1, pp. 140–157, 2022.
- [16] S. Arslan, "A hybrid forecasting model using LSTM and Prophet for energy consumption with decomposition of time series data," *PeerJ Comput. Sci.*, vol. 8, p. e1001, 2022.
- [17] A. Gasparin, S. Lukovic, and C. Alippi, "Deep learning for time series forecasting: The electric load case," *CAAI Trans. Intell. Technol.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–25, 2022.
- [18] Akhil and Collaborator, *Global Energy Statistics (1980-2021)*.
- [19] G. P. Zhang, "Time series forecasting using a hybrid ARIMA and neural network model," *Neurocomputing*, vol. 50, pp. 159–175, 2003.
- [20] L. Zhou, "Application of ARIMA model on prediction of China's corn market," in *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1941, no. 1, p. 012064, Jun. 2021.
- [21] P. Manigandan et al., "Forecasting natural gas production and consumption in the United States—Evidence from SARIMA and SARIMAX models," *Energies*, vol. 14, no. 19, p. 6021, 2021.
- [22] M. Baloch et al., "An intelligent SARIMAX-based machine learning framework for long-term solar irradiance forecasting at Muscat, Oman," *Energies*, vol. 17, no. 23, p. 6118, 2024.
- [23] L. Zhou, Z. Luo, and X. Pan, "Machine learning-based system reliability analysis with Gaussian process regression," arXiv preprint arXiv:2403.11125, 2024.
- [24] N. K. Manaswi and N. K. Manaswi, "RNN and LSTM," in *Deep Learning with Applications Using Python: Chatbots and Face, Object, and Speech Recognition with TensorFlow and Keras*, pp. 115–126, 2018.
- [25] K. Albeladi, B. Zafar, and A. Mueen, "Time series forecasting using LSTM and ARIMA," *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 14, no. 1, pp. 313–320, 2023.
- [26] J. Quinonero-Candela and C. E. Rasmussen, "A unifying view of sparse approximate Gaussian process regression," *J. Mach. Learn. Res.*, vol. 6, pp. 1939–1959, 2005.
- [27] M. Hossin and M. N. Sulaiman, "A review on evaluation metrics for data classification evaluations," *Int. J. Data Min. Knowl. Manag. Process*, vol. 5, no. 2, pp. 1–7, 2015.
- [28] Accelerator Institute, *Evaluating Machine Learning Models: Metrics and Techniques*.
- [29] F. R. Alharbi and D. Csala, "A Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average with Exogenous Factors (SARIMAX) Forecasting Model-Based Time Series Approach," *Inventions* 2022, Vol. 7, Page 94, vol. 7, no. 4, p. 94, Oct. 2022, doi: 10.3390/INVENTIONS7040094.
- [30] M. Bilgili and E. Pinar, "Gross electricity consumption forecasting using LSTM and SARIMA approaches: A case study of Türkiye," *Energy*, vol. 284, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.ENERGY.2023.128575.
- [31] B. Peak et al., "Peak Electrical Energy Consumption Prediction by ARIMA, LSTM, GRU, ARIMA-LSTM and ARIMA-GRU Approaches," *Energies* 2023, Vol. 16, Page 4739, vol. 16, no. 12, p. 4739, Jun. 2023, doi: 10.3390/EN16124739.
- [32] N. L. M. Jailani et al., "Investigating the Power of LSTM-Based Models in Solar Energy Forecasting," *Processes* 2023, Vol. 11, Page 1382, vol. 11, no. 5, p. 1382, May 2023, doi: 10.3390/PR11051382.
- [33] M. Sharifzadeh, A. Sikinioti-Lock, and N. Shah, "Machine-learning methods for integrated renewable power generation: A comparative study of artificial neural networks, support vector regression, and Gaussian Process Regression," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 108, pp. 513–538, Jul. 2019, doi: 10.1016/J.RSER.2019.03.040.

Protective Effects of Aqueous Propolis Extract from the Artvin-Hatila Region of Türkiye Against Zinc Oxide-Induced Genotoxicity: Antimutagenic, Antioxidant, and Phytochemical Evaluation

Nurşen AKSU KALMUK¹

¹Medicinal- Aromatic Plants Application and Research Centre, Artvin Coruh University, 08100, Artvin, Turkey

✉: nrsnaksu@hotmail.com  [0000 0002 3712 4002](https://orcid.org/0000-0002-3712-4002)

Received (Geliş): 24.04.2025

Revision (Düzeltilme): 06.05.2025

Accepted (Kabul): 27.05.2025

ABSTRACT

This study investigated the protective effects of aqueous propolis extract from Türkiye's Artvin-Hatila region against zinc oxide (ZnO)-induced genotoxicity in *Allium cepa* root meristem cells. At 100 mg/L, the extract significantly reduced ZnO-related cytogenetic damage, increasing the mitotic index by 143% and lowering micronucleus frequency by 66.6% compared to the positive control. Chromosomal aberration rates also approached those of the negative control at this dose. Antioxidant assays demonstrated strong activity, with a DPPH IC₅₀ of 0.004 mg/mL, FRAP value of 7.44 mg TE/g, and CUPRAC value of 0.30 mmol TEAC/g. HPLC analysis revealed 16 bioactive compounds, notably caffeic acid, epicatechin, and ferulic acid. These results highlight the extract's potential as a natural antigenotoxic and antioxidant agent, effective within an optimal concentration range against environmental genotoxins such as ZnO.

Keywords: Propolis, Antimutagenicity, Antioxidant Activity, Phenolic Composition, *Allium cepa*, HPLC Analysis

Türkiye'nin Artvin-Hatila Bölgesinden Elde Edilen Propolisin Sulu Ekstraktının Çinko Oksit Kaynaklı Genotoksositeye Karşı Koruyucu Etkileri: Antimutajenik, Antioksidan ve Fitokimyasal Değerlendirme

ÖZ

Bu çalışma, Türkiye'nin Artvin-Hatila bölgesinden elde edilen sulu propolis ekstraktının çinko oksit (ZnO) kaynaklı genotoksositeye karşı *Allium cepa* kök meristem hücrelerinde koruyucu etkilerini araştırmıştır. 100 mg/L dozunda ekstrakt, pozitif kontrolle karşılaştırıldığında mitotik indeksi %143 oranında artırmış ve mikronükleus oluşumunu %66,6 oranında azaltarak ZnO kaynaklı sitogenetik hasarı önemli ölçüde azaltmıştır. Bu dozda kromozomal anomali oranları da negatif kontrol değerlerine yaklaşmıştır. Antioksidan analizlerde ekstrakt güçlü etki göstermiş; DPPH IC₅₀ değeri 0,004 mg/mL, FRAP değeri 7,44 mg TE/g, CUPRAC değeri ise 0,30 mmol TEAC/g olarak belirlenmiştir. HPLC analizinde başta kafeik asit, epikateşin ve ferulik asit olmak üzere 16 biyolojik etkili bileşik tespit edilmiştir. Bulgular, bu ekstraktın belirli bir doz aralığında çevresel genotoksinlere karşı doğal bir antigenotoksik ve antioksidan ajan olarak potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Propolis, Antimutajenik Etki, Antioksidan Aktivite, Fenolik Bileşik Profili, *Allium cepa*, HPLC Analizi

INTRODUCTION

Zinc oxide (ZnO) is widely utilized across various industries, including electronics, paints, rubber, textiles, cosmetics, and food packaging, due to its semiconducting nature, strong ultraviolet absorption, and antimicrobial properties [1, 2]. The use of ZnO in nanoparticulate form has become increasingly common, as its enhanced surface area contributes to improved product performance. However, this also increases the likelihood of environmental dissemination. Waste products generated during the manufacture and application of ZnO may enter soil and surface water systems, where the potential for biological interaction and adverse effects in

living organisms becomes a growing concern [3]. Plants, in particular, are vulnerable to ZnO accumulation due to root uptake mechanisms, and several studies have reported inhibited root development, mitotic disruption, and chromosomal abnormalities following exposure [2, 4]. Although ZnO is not classified as a heavy metal, it shares similar cytotoxic characteristics by promoting oxidative stress at the cellular level, which may in turn damage genetic material [5]. Consequently, the long-term biological impacts of ZnO exposure in living systems remain a subject of active investigation. In light of these concerns, the protective effects of natural antioxidant compounds against potential genotoxic and mutagenic agents have attracted increasing scientific

attention. Among these bioactive substances, propolis—a resinous material collected by *Apis mellifera* bees from botanical sources—has emerged as a candidate of interest due to its complex composition, which includes high levels of phenolic compounds, flavonoids, aromatic acids, and essential oils [6, 7]. While the chemical makeup of propolis varies depending on its botanical and geographical origin as well as the extraction method employed, numerous studies have documented its antioxidant, anti-inflammatory, antimicrobial, and antimutagenic activities [4, 8]. Extracts rich in polyphenols and flavonoids have been shown to support redox homeostasis, mitigate DNA damage, and suppress cytogenetic anomalies [5, 9]. These bioactivities are particularly relevant in experimental models involving oxidative damage. Furthermore, aqueous propolis extracts are generally considered more physiologically compatible and less toxic than ethanolic forms, making them more favorable for therapeutic use in humans [4, 11]. However, the extent to which propolis confers protection against widely used environmental agents such as ZnO remains inadequately characterized.

Due to ethical and logistical considerations, plant-based systems are frequently preferred for evaluating the genetic toxicity of environmental pollutants. The *Allium cepa* assay, in particular, is widely recognized for its effectiveness in assessing alterations in cell division dynamics and chromosomal structure following exposure to genotoxic substances [3, 11]. The rapidly dividing meristematic cells of *A. cepa* root tips exhibit pronounced cellular responses to toxic agents, enabling precise quantification of indicators such as reduced mitotic index, abnormal metaphase formations, micronucleus occurrence, and chromosome fragmentation [12]. Because of its simplicity, cost-effectiveness, and high sensitivity, the *Allium* test has gained broad acceptance by environmental health organizations as a valid cytogenetic model [1]. Furthermore, the strong correlation between its outcomes and those observed in mammalian systems makes it a robust platform not only for toxicity screening but also for evaluating the efficacy of natural protective compounds [2, 5].

To date, most studies evaluating the protective effects of propolis against metal oxide-induced genotoxicity have primarily utilized ethanolic extracts, and the majority of these have focused on agents other than ZnO [13, 14, 15, 16]. In particular, studies specifically investigating the protective effects of aqueous propolis extract against ZnO-induced genotoxicity are either extremely limited or absent, especially in plant-based assay systems. This gap has not yet been systematically addressed in the literature. This study, therefore, addresses a notable gap by systematically examining the genoprotective and antioxidant potential of a water-based propolis formulation using the *A. cepa* model.

In this context, the present study aimed to evaluate the cytogenetic recovery potential of an aqueous propolis extract—sourced from the Artvin-Hatila region of Türkiye—against ZnO-induced toxicity in *A. cepa* root meristem cells. The extract was administered at five

different concentrations (25, 50, 100, 200, and 400 mg/L) for 12 h, and its effectiveness in mitigating ZnO-associated damage was assessed genotoxicity markers (mitotic index, chromosomal aberrations). Additionally, the biochemical activity of the extract was analyzed via antioxidant capacity assays (DPPH, FRAP, CUPRAC), total phenolic and flavonoid content determination, and phenolic compound profiling using HPLC. This multifaceted evaluation highlights not only the possible modulatory effects of propolis on ZnO-induced cytogenotoxicity in a plant-based model but also presents preliminary evidence supporting its potential as a natural bioprotective agent with a favorable safety profile. By employing a concentration gradient approach, the study also generated data on dose–response relationships, thereby contributing to the broader scientific understanding of propolis efficacy in the context of environmental toxicant exposure. Accordingly, this work represents one of the first systematic efforts to examine the protective potential of propolis against ZnO toxicity within a well-established plant-based assay model, in alignment with current literature.

MATERIAL and METHODS

Material Supply and Preparation of Propolis Extract

The propolis used in this study was collected in 2023 from beehives located in the natural environment of Hatila Valley National Park in Artvin Province, Türkiye. The raw propolis samples were stored at room temperature in a cool, dry, and dark place until use to preserve their chemical integrity.

For extract preparation, the propolis was first ground into small pieces and then dissolved in distilled water to obtain five different concentrations: 25, 50, 100, 200, and 400 mg/L. Each solution was stirred continuously using a magnetic stirrer at 25 °C for 24 h. Following the incubation period, the suspensions were filtered through Whatman No.1 filter paper to remove any particulate matter. The resulting aqueous extracts were used for the experimental applications. All extraction procedures were carried out under controlled conditions and protected from direct sunlight to minimize potential oxidative degradation of the bioactive compounds.

Determination of Total Phenolic and Flavonoid Contents

Measurement of Total Phenolic Content

The total phenolic content of the aqueous propolis extract was determined using the Folin–Ciocalteu colorimetric method, based on the procedure described by Singleton et al. (1999) [17]. This method is based on the reduction of the Folin–Ciocalteu reagent by phenolic compounds, resulting in the formation of a blue-colored complex that absorbs maximally at 760 nm. The intensity of the color produced is proportional to the concentration of phenolic compounds in the sample. A calibration curve was prepared using gallic acid as the standard, and the results

were expressed as mg gallic acid equivalents (GAE) per gram of dry sample.

Measurement of Total Flavonoid Content

Total flavonoid content was measured according to a modified version of the method developed by Zhishen et al. (1999) [18]. The technique is based on the formation of stable complexes between flavonoids and aluminum chloride (AlCl_3). The aluminum ions interact with the C-4 keto group and C-3 or C-5 hydroxyl groups of flavones and flavonols, as well as with ortho-dihydroxy groups in the A and B rings, producing a yellow complex measurable at 510 nm. Quercetin was used as the reference standard in the concentration range of 0.03125 to 1.0 mg/mL, and a calibration curve was constructed accordingly. Results were expressed as mg quercetin equivalents (QE) per gram of dry sample.

Evaluation of DPPH Radical Scavenging Capacity

The free radical scavenging activity of the propolis extract was assessed based on the discoloration of DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl), following a modified procedure adapted from Brand-Williams et al. (1995) [19]. A stock DPPH solution was prepared by dissolving the stable radical in methanol ($\geq 99.8\%$ purity) at a concentration of 4 mg per 100 mL. Serial dilutions of the extract were prepared in order to assess concentration-dependent antioxidant behavior. For each assay, 0.750 mL of DPPH solution was added to an equal volume of sample solution.

The resulting mixtures were incubated at ambient temperature in the absence of light to prevent photodegradation of the DPPH radical. After the incubation period, the absorbance of each sample was measured at 517 nm using a UV-Vis spectrophotometer. The percentage of radical inhibition was calculated for each concentration, and a dose-response curve was constructed. From this curve, the IC_{50} value—defined as the concentration of extract required to neutralize 50% of the DPPH radicals—was calculated and expressed in mg/mL.

Assessment of Ferric Ion (Fe^{3+}) Reducing Antioxidant Capacity (FRAP Method)

The ferric reducing antioxidant power (FRAP) assay was applied to evaluate the overall antioxidant capacity of the propolis extract by measuring its ability to convert ferric (Fe^{3+}) ions to ferrous (Fe^{2+}) form in an acidic medium, which generates a blue-colored chromophore [16, 17]. In the assay, 3 mL of freshly prepared FRAP reagent was combined with 100 μL of either the test sample or blank (extraction solvent) in a glass tube. The mixture was incubated at a constant temperature of 25 °C, and the absorbance was recorded at 593 nm over a 4 min period. A standard curve was constructed using serial dilutions of $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ in the range of 100–1000 $\mu\text{mol/L}$ to determine the antioxidant reducing capacity of the

extract. The final results were expressed as micromoles of Fe^{2+} equivalents per gram of dry extract.

Quantification of Antioxidant Capacity via Cupric Ion Reduction (CUPRAC Assay)

The antioxidant activity of the propolis extract was further analyzed using the CUPRAC (Cupric Reducing Antioxidant Capacity) assay, which is based on the reduction of Cu^{2+} to Cu^+ in the presence of neocuproine under near-neutral conditions. This redox reaction generates a colored Cu^+ -neocuproine chelate that shows peak absorbance at 450 nm. The assay was standardized using Trolox, a water-soluble analog of vitamin E, across a calibration range of 0.03125 to 1.0 mM. The antioxidant potential of the samples was expressed as Trolox Equivalent Antioxidant Capacity (TEAC), which offers a comparative metric for antioxidant efficiency relative to the Trolox standard [18].

High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) Analysis of Phenolic Compounds

Phenolic constituents of the aqueous propolis extract were separated and identified using high-performance liquid chromatography (HPLC) equipped with a diode array detector (DAD). Chromatographic separation was achieved on an ACE 5 C18 column (250 mm $\times$ 4.6 mm i.d.) maintained at 35 °C. Two different gradient elution methods were employed to optimize the separation of a wide range of phenolic compounds.

In the first method, the mobile phase consisted of solvent A (acetonitrile) and solvent B (1.5% acetic acid in water). The gradient started with 15% A and 85% B, gradually shifting to 40% A and 60% B over a 29-min run. Detection wavelengths were set at 250, 270, and 320 nm. The system utilized a quaternary pump (flow rate: 0.7 mL/min), a vialsampler for 10 μL injections, and a thermostated column compartment.

In the second protocol, the mobile phase was modified using methanol ($\geq 99.8\%$ purity) (A) and 1.5% aqueous acetic acid (B). The gradient was initiated at 10% A and 90% B, adjusted to 40% A and 60% B by 29 min, further ramped to 60% A and 40% B until 40 min, and finally transitioned to 90% A and 10% B by the 53rd min. Chromatographic signals were monitored at 280, 290, 320, 370, and 535 nm. Phenolic compounds were identified by comparing their retention times and UV absorption spectra with those of authentic standards.

Experimental Groups and Application Design

The *Allium cepa* bulbs (2n = 16) used in this study were selected based on uniform size and overall health. The outer scales were carefully removed without damaging the primary meristematic regions at the root tips. Prior to treatment, the bulbs were immersed in distilled water for 72 h to initiate root development. Once the roots reached an average length of approximately 1.5–2 cm, the bulbs were randomly assigned to experimental groups. The experimental groups were organized as follows:

- Negative control group: bulbs treated with distilled water only
- Positive control group: bulbs exposed to 680 mg/L zinc oxide (ZnO) solution
- Treatment groups: bulbs pretreated with 680 mg/L ZnO solution followed by exposure to aqueous propolis extract at concentrations of 25, 50, 100, 200, and 400 mg/L for 12 h

In the experimental procedure, bulbs were first treated with 680 mg/L ZnO solution for 12 h. Subsequently, they were transferred into solutions containing different concentrations of aqueous propolis extract and subjected to a second 12h treatment. At the end of the exposure period, five bulbs exhibiting the most pronounced root growth were selected from each concentration group. Root tips were excised approximately 0.5–1 cm from the apex and fixed in ethanol:glacial acetic acid solution (3:1, v/v) for 24 h. Fixed samples were then hydrolyzed in 1 N HCl at 60 °C for 5 min. Following hydrolysis, the root tips were stained with Schiff's reagent in preparation for cytogenetic analysis.

The ZnO concentration used in the treatment solution (680 mg/L) was selected based on findings from previous studies evaluating the genotoxic and cytotoxic effects of ZnO nanoparticles in the *A. cepa* model [2].

Statistical Analysis

All experimental procedures were conducted in three independent replicates ($n = 3$). The data were expressed as mean $\pm$ standard deviation (SD). Statistical analyses were performed using SPSS software version 22.0. One-way analysis of variance (ANOVA) was used to assess differences among groups, followed by Dunnett's post-hoc test for multiple comparisons when appropriate. Prior to conducting ANOVA, the assumptions of normality and homogeneity of variances were tested using the Kolmogorov–Smirnov and Levene's tests, respectively. These preliminary tests confirmed that the assumptions for ANOVA were satisfied. A p-value of less than 0.05 was considered statistically significant in all analyses.

RESULTS and DISCUSSION

Total Phenolic Content

In this study, the total phenolic content (TPC) of the aqueous propolis extract obtained from the Artvin-Hatila region was determined as 5.99 ± 1.03 mg GAE/g dry sample (Table 1). This value is consistent with those reported for aqueous propolis extracts in previous studies and aligns with the range of 4.3–6.5 mg GAE/g observed in samples collected from different regions of Türkiye [4, 10]. Although organic solvents such as ethanol often yield higher extraction efficiency, water-based solvents are preferred in biological assays due to their lower toxicity, especially in experiments involving living systems [9].

In addition to the quantitative phenolic content, HPLC analysis revealed the presence of several biologically active phenolic acids in the aqueous extract, such as

caffeic acid, chlorogenic acid, and 3,4,5-tri-O-caffeoylquinic acid, which are known for their potent antioxidant and free radical scavenging properties [10]. These phenolic constituents have been previously described in the literature for their antioxidant, anti-inflammatory, cytotoxic and DNA-protective effects [5, 6, 20, 21]. The presence of such compounds corresponds well with the strong antioxidant performance observed in DPPH, FRAP, and CUPRAC assays conducted in this study.

The relatively high phenolic concentration observed here also corresponds with the increased mitotic index and decreased chromosomal aberrations following ZnO exposure, suggesting that phenolic compounds may contribute to cellular defense mechanisms under genotoxic stress. This interpretation is supported by previous findings indicating that structural variations among phenolics influence not only antioxidant potential but also antimutagenic activity [7, 8]. Therefore, the ability of aqueous propolis extracts to exert biologically relevant effects despite their lower solvent strength highlights their potential as a safe and functional plant-based intervention, particularly in the context of environmental toxicology.

Table 1. Bioactive and antioxidant properties of aqueous propolis extract

Sample analyzed	Total phenolic content (mg GAE/g dry sample)	Total flavonoid content (mg QE/g dry sample)
Propolis extract	5.99 ± 1.03	0.53 ± 0.04

Total Flavonoid Content

In this study, the total flavonoid content (TFC) of the aqueous propolis extract was determined as 0.53 ± 0.04 mg QE/g dry sample (Table 1). Although this value is relatively low compared to those reported for aqueous propolis extracts in the literature, it remains within expected limits when considering the limited solubility capacity of water-based solvents [10]. Nonetheless, it has been stated in various studies that even such concentrations can exert measurable biological effects in living systems when extracted with aqueous media [7]. The chemical composition of propolis is known to vary depending on factors such as geographical origin and extraction technique. Studies utilizing HPLC and LC-MS/MS analyses have identified several flavonoid compounds—such as pinocembrin, chrysin, kaempferol, galangin, and apigenin—as major contributors to the antioxidant and antimutagenic effects of propolis [6, 7, 26]. These compounds have been shown in numerous studies to exhibit free radical scavenging properties within antioxidant mechanisms, particularly in

maintaining membrane integrity and mitigating DNA damage [7].

In the present study, the measured flavonoid content was observed to align with the partial recovery of mitotic activity and reduction in chromosomal abnormalities induced by ZnO exposure, suggesting a possible modulatory role of flavonoids against cytogenotoxic stress. Furthermore, the inherently low solvent toxicity of aqueous extracts supports their applicability as a safer alternative in experimental biological models. These findings indicate that propolis can exert biologically relevant effects not only through ethanol-based extracts with high flavonoid content but also through more biocompatible formulations.

DPPH Free Radical Scavenging Capacity

In this study, the DPPH radical scavenging activity of the aqueous propolis extract was determined as 0.004 ± 0.00 mg/mL IC_{50} (Table 2). This value indicates a strong antioxidant capacity, demonstrating that the extract can effectively neutralize DPPH radicals even at low concentrations. Achieving such a low IC_{50} value with a water-based extract is particularly notable and supports the presence of biologically active compounds within the propolis sample.

In a study by Volpi and Bergonzini (2006) [7], the IC_{50} values of aqueous propolis extracts were reported to range between 0.005–0.012 mg/mL, placing the current result at the lower boundary of this range. This suggests that propolis collected from the Hatila region possesses a rich antioxidant profile and that regional origin may influence biological activity. Castro et al. (2014) [5] emphasized that the antioxidant effect of propolis is not solely associated with total phenolic or flavonoid content but also closely linked to the structural diversity of individual compounds.

When interpreted alongside the observed reduction in genotoxic stress under ZnO exposure, the high radical scavenging activity revealed by the DPPH assay suggests that propolis may alleviate cellular oxidative damage. This effect can be explained by antioxidant constituents such as flavonoids and phenolic acids, which are known to support membrane stability and contribute to the maintenance of mitotic activity [6, 8].

Additionally, in order to contextualize the antioxidant capacity of the aqueous propolis extract, the IC_{50} value was compared to that of a standard antioxidant (Trolox), which was determined to be 0.0038 mg/mL under the same experimental conditions. The extract's IC_{50} value of 0.004 mg/mL is remarkably close to that of Trolox, indicating a comparable free radical scavenging potential. This comparison further highlights the strong antioxidant nature of the propolis sample, even in aqueous form, and supports its potential use as a natural alternative to synthetic antioxidants.

In conclusion, the potent antioxidant effect demonstrated by this low IC_{50} value suggests that aqueous propolis extracts may serve not only as supportive agents but also as potential protectants in biological systems.

Table 2. Antioxidant activity profile of the aqueous propolis extract based on IC_{50} and TEAC values

Sample analyzed	IC_{50} DPPH Inhibition (mg/ml)	FRAP (μ mol FeSO ₄ .7H ₂ O/g sample)	CUPRAC (mmol TEAC/g sample)
Propolis extract	0.004 ± 0.00	7.44 ± 0.12	0.30 ± 0.00
Standard	0.0038 ± 0.0	-	-

The IC_{50} value of the standard antioxidant (Trolox) was derived from the corresponding calibration curve.

Ferric Reducing Antioxidant Power (FRAP)

In this study, the ferric reducing antioxidant power (FRAP) of the aqueous propolis extract was determined to be 7.44 ± 0.12 mg TE/g dry sample (Table 2). This value is considerably higher than many of the previously reported FRAP values for water-based propolis extracts, suggesting a potentially strong reducing capacity. The FRAP assay is a widely accepted spectrophotometric method that evaluates the ability of antioxidants to reduce Fe^{3+} ions to their Fe^{2+} form, thereby reflecting the cumulative reducing effect of the compounds present in the extract [22, 23].

In various studies, FRAP values for aqueous propolis extracts have generally been reported within the range of 1.5–5.0 mg TE/g [24, 25]. Therefore, the result obtained in this study may indicate that propolis sourced from the Hatila region contains a rich composition of phenolic and flavonoid compounds extractable with water. However, it should be noted that the chemical composition of propolis can vary greatly depending on regional flora and climatic conditions [26].

Several phenolic acids and flavonoids—such as caffeic acid, ferulic acid, apigenin, and chrysin—have been reported to show high activity in FRAP assays [27, 28], and this aligns with the phenolic profile observed in our HPLC analysis. When considered alongside the observed reduction in ZnO-induced genotoxic effects, the high FRAP value measured in this study supports the idea that propolis may contribute to the maintenance of cellular redox balance. Nonetheless, this outcome should be interpreted cautiously, as it may be specific to the experimental system and extraction conditions applied.

Total Reducing Capacity via CUPRAC Assay

In this study, the CUPRAC (Cupric Ion Reducing Antioxidant Capacity) value of the aqueous propolis extract was determined as 0.30 ± 0.00 mmol TEAC/g dry sample (Table 2). This value indicates that the extract exhibits a notable capacity to reduce cupric ions and reflects a substantial level of total antioxidant activity in water-based formulations. Compared to other spectrophotometric assays, the CUPRAC method offers advantages such as operation under near-physiological pH and the ability to evaluate both hydrophilic and lipophilic antioxidants [29, 30].

CUPRAC values reported in propolis extracts from various geographical regions generally range between 0.15 and 0.37 mmol TEAC/g. For instance, Kalogeropoulos et al. (2009) [24] reported this range for Greek propolis, while Aliyazicioglu et al. (2013) [31] found similar values in Iranian samples. When compared with the present findings, the Hatila propolis extract demonstrates a competitive antioxidant potential, suggesting the presence of water-extractable bioactive constituents.

Compounds such as apigenin, pinocembrin, chrysin, and caffeic acid, which are frequently found in propolis, have been reported to exhibit high reducing activity in CUPRAC assays [26, 32]. These molecules contribute significantly to redox regulation due to their ability to chelate transition metals and to act as electron donors. This observation is consistent with the phenolic profile obtained via HPLC in this study.

The CUPRAC result, when considered alongside the reduction in ZnO-induced genotoxicity, suggests that propolis may play a regulatory role in maintaining intracellular redox balance. The ability of flavonoids to form complexes with cupric ions may contribute to this effect, which further supports their potential function in mitigating metal ion-induced oxidative stress [30].

In conclusion, the strong CUPRAC performance of the aqueous propolis extract highlights its potential as a functional food component, natural antioxidant, or therapeutic adjuvant. These findings suggest that water-based propolis formulations may offer meaningful redox activity without relying on organic solvents.

HPLC Phenolic and Flavonoid Compound Profile

In this study, a total of 16 bioactive compounds consisting of ascorbic acid, phenolic and flavonoids were quantitatively identified in the aqueous propolis extract obtained from the Artvin-Hatila region through HPLC analysis (Table 3). This diversity exceeds the commonly perceived limitations regarding the compositional richness of water-based extracts and reveals that the water-extractable fraction of propolis may also possess a complex chemical profile worth investigating.

According to the profile obtained, phenolic acids such as progallol (45.25 mg/L), caffeic acid (40.94 mg/L), and coumaric acid (39.8 mg/L), along with flavonoids such as catechin (24.5 mg/L), epicatechin (23.06 mg/L), and quercetin (6.3 mg/L), were found to be major contributors to the antioxidant potential of the extract (Table 3). These compounds have been previously reported as key components in the biological activity of propolis [6, 26].

In addition, the ascorbic acid content of the extract was measured as 3.38 mg/mL (Table 3). Although this value may vary across different propolis samples, ascorbic acid is a well-known potent antioxidant and has been shown to act synergistically with phenolic compounds [33]. Indeed, some studies have demonstrated that ascorbic acid at concentrations ranging from 0.1 to 1 mM has a

superoxide and hydroxyl radical scavenging capacity comparable to that of high-concentration propolis extracts [34]. Thus, the natural presence of ascorbic acid in the extract may enhance the overall biological effect of the phenolic profile.

In another study on Turkish propolis, caffeic acid was reported as the dominant compound in water-based extracts, and its concentration was found to be higher than in ethanol-based extracts [4]. The caffeic acid level detected in the Hatila propolis is consistent with these findings. Moreover, the presence of other phenolic acids such as ferulic acid (25.2 mg/L) and chlorogenic acid (11.31 mg/L) indicates that the total redox capacity of the extract relies not only on one or two dominant compounds but rather on a wide spectrum of phenolic structures [10].

The flavonoids identified in this study (such as quercetin, catechin, epicatechin) are known to be closely associated with the high antioxidant capacities observed in the CUPRAC, DPPH, and FRAP tests [27, 30]. Flavonoids have been reported to exert protective effects against genotoxic stress through mechanisms such as redox regulation, metal ion chelation, and enhancement of membrane stability.

However, it should be noted that the phenolic and flavonoid profile obtained may vary depending on geographical origin, plant flora, climatic conditions, and seasonal variability. Therefore, conducting comparative analyses with samples collected from other regions will be valuable in enhancing the generalizability of these findings.

In conclusion, the HPLC-derived phenolic and flavonoid profile strongly supports the potential biological activity of the aqueous propolis extract used in this study—not only in terms of structural diversity but also regarding the interaction of these compounds with antioxidant systems. This comprehensive biochemical background aligns with the extract's observed mitigation of ZnO-induced genotoxic stress and supports its potential use as a functional food ingredient or natural bioactive agent.

Table 3. Bioactive constituents identified in the aqueous propolis extract via quantitative HPLC profiling

No	Compounds	Propolis extract (mg/L)
Vitamin		
1	Ascorbic acid	3.38
Phenolics		
2	Gallic acid	4.74
3	3,4 hydroxy benzoic acid	1.10
4	Vanillic acid	3.61
5	Syringic acid	4.4
6	Coumaric Acid	39.8
7	Caffeic acid	40.94
8	Ferulic acid	25.2
9	Rosmarinic acid	1.14
10	Progallol	45.25
11	Chlorogenic acid	11.31
12	Resvaratrol	N/D
13	Oleuropein	N/D

Flavanoids

14	Catechin	24.5
15	Epicatechin	23.06
16	Rutin	0.9
17	Myricetin	N/D
18	Qercetin	6.3
19	Apigenin	N/D
20	Cyanidin chloride	N/D
21	Hesperitin	N/D
22	Kaempferol	N/D
23	Baicalin	2.16
24	Chrysin	N/D

N/D: Non determined

Mitigating Effects of Propolis on Zinc Oxide-Induced Genotoxic and Cytogenetic Alterations in *Allium cepa* Root Cells

In this study, the effects of aqueous propolis extract applied following zinc oxide (ZnO)-induced genotoxic stress were comprehensively evaluated in terms of mitotic activity and chromosomal abnormalities in *A. cepa* root meristematic cells. According to the data obtained, the mitotic index (MI) in the positive control group (ZnO treatment) was significantly reduced compared to the negative control ($p < 0.05$), confirming the suppressive impact of ZnO on cell division dynamics (Table 4).

Among the propolis-treated groups, only the 100 mg/L concentration significantly ameliorated the ZnO-induced decrease in the mitotic index (MI), maintaining a value (6.59 ± 1.35) close to that of the negative control. In contrast, mitotic activity was suppressed at both lower and higher doses—specifically 25, 50, 200, and 400 mg/L—with MI values in the 25 mg/L (1.91 ± 0.53) and 400 mg/L (2.28 ± 0.62) groups falling even below that of the ZnO-treated group (Table 4). These findings suggest that the aqueous extract of propolis contains compounds capable of modulating the cell cycle and that this effect is likely dose-dependent.

A significant decrease in the mitotic index indicates an increased number of cells failing to reach the M phase of the cell cycle, which may reflect cell death, delays in mitotic progression, or suppression of DNA synthesis [35, 36]. According to Lemme and Marin-Morales (2009) [37], such a reduction in MI can serve as an indicator of the biochemical impact of the exposed substance on the growth and development of the organism. Likewise, Mercykutty and Stephen (1980) [38] reported that a decline in the number of dividing cells may reflect the mitodepressive effects of natural compounds such as propolis.

In our study, the increase in MI observed at the 100 mg/L concentration suggests that propolis at this dose may possess protective potential against genotoxic effects (Table 4). Similarly, Çavuşoğlu (2020) [60] reported that moderate concentrations of propolis enhanced mitotic activity in *A. cepa*, indicating a supportive role at specific doses. These findings imply that the antioxidant compounds in propolis may contribute to the regulation of DNA repair, cell division, and chromosomal stability

when administered within an optimal concentration range.

Comparable findings in the literature are consistent with the results of this study. For instance, Celik and Aslantürk (2010) [39], Oyeyemi and Bakare (2013) [40], Chukwujekwu and Van Staden (2014) [41], and Roberto et al. (2016) [42] have demonstrated that different concentrations or regional variations of propolis exert varying effects on the mitotic index. While certain doses were reported to have inhibitory effects, others showed a predominantly protective role.

Table 4. Effects of aqueous propolis extract on the mitotic activity and cell division phases in *A. cepa* under zinc oxide stress

TRM	ECN	MI±SD	TN CP	TN CM	TN CA	TN CT
NC	3000	6.73±1.39	64	80	51	38
PC	3000	2.71±0.39*	47	44	16	7
25 mg Pr	3000	1.91±0.53*	71	20	4	8
50 mg Pr	3000	2.85±1.53*	67	15	24	48
100 mg Pr	3000	6.59±1.35	188	67	41	60
200 mg Pr	3000	3.64±0.93*	45	36	30	20
400 mg Pr	3000	2.28±0.62*	18	43	21	0

*Significant at $p < 0.05$. TRM: Treatments, NC: Negative Control, PC: Positive Control, Pr: Propolis, ECN: Examined cell number, MI±SD: Mitotic index±Standart deviation, TNCP: Total number of cells at prophase, TNCM: Total number of cells at metaphase, TNCA: Total number of cells at anaphase, TNCT: Total number of cells at telophase

When evaluated alongside MI data, the type and frequency of chromosomal abnormalities further elucidate the extent of genotoxic effects. In this study, chromosomal aberrations observed in *A. cepa* root cells were analyzed to assess the impact of aqueous propolis extract on ZnO-induced genotoxicity. The findings revealed that the degree of chromosomal damage varied depending on the concentration of propolis applied.

In the ZnO-exposed positive control group, the most frequently observed cellular abnormalities included disturbed prophase (2.57 ± 0.41), chromosome stickiness (1.86 ± 0.59), C-metaphase (0.71 ± 0.76), bridge formation (0.43 ± 0.79), and multipolar anaphase (0.43 ± 0.79) (Table 5, Figure 1). These findings indicate that ZnO induces substantial disruptions in the mechanisms of cell division [4, 5]. In particular, C-metaphase events are characterized by the disorganization of metaphase chromosomes in the cell center due to inhibition of spindle fiber formation. This anomaly was first described by Levan (1938) [43] and is associated with agents that act similarly to colchicine by delaying centromere separation. This mechanism also

plays a direct role in the observed decrease in mitotic index [44].

Similarly, chromosome stickiness, commonly observed in the high-dose group, reflects toxic effects associated with disruptions in the protein matrix of chromatin and is generally attributed to depolymerization of DNA [45, 46, 47]. Additionally, the observed bridge formations are thought to result from replication errors or faulty reunification of broken chromosomes, while multipolar anaphase arises due to the irregular formation of spindle fibers, leading to abnormal chromosome segregation and contributing to micronucleus formation [48, 49].

In the groups treated with propolis, a clear dose-dependent effect was observed. In the 25 mg/L group, the total number of aberrant cells (6.67) was close to that of the ZnO group, with a particularly high rate of disturbed prophase (5.33 ± 2.55), suggesting that this low dose was insufficient to suppress genotoxic stress. In the 400 mg/L group, the total abnormality rate reached a high level of 10.44, with notably elevated frequencies of chromosome stickiness (1.11 ± 0.27), C- metaphase (4.33 ± 0.02), and bridge formation (2.33 ± 0.61) (Table 5; Figure 1). These findings imply that rather than stabilizing cell division, high-dose propolis may impose additional chromosomal stress through a potential cytotoxic effect [37, 40].

In contrast, the abnormality rate in the group treated with 100 mg/L propolis (1.33) was nearly identical to that of the negative control (1.42), and all types of abnormalities were found to be minimal (Table 5). This indicates that the 100 mg/L dose provided optimal protective effects and successfully mitigated ZnO-induced genotoxicity. Similar findings have previously been reported, highlighting the DNA-protective role of propolis at this concentration [39, 50, 51].

In conclusion, this study demonstrates that propolis has the potential to preserve cellular structural integrity under genotoxic stress; however, this effect is clearly dose-dependent. Specifically, the 100 mg/L dose exhibited a markedly protective profile, both in terms of total chromosomal abnormalities and specific types of damage.

Table 5. Dose-dependent effects of aqueous propolis extract on chromosomal aberrations in *Allium cepa* root tip cells under zinc oxide stress

Treatments	Disturbed prophase	Ch. stickness	C- metaphase	Ch. disrupted	Laggard ch.	Vagrant ch.	Bridge formation	Multipolar Anaphase	Multipolar anaphase with forward ch.	Multipolar anaphase with ch. bridge	Diagonal telophase with vagrant ch.	Total aberrant cells
Negative control	-	0.33±0.77	0.33±0.82	0.25±0.45	-	-	0.50±0.02	-	-	-	-	1.42
Positive control	2.57±0.41	1.86±0.59	0.71±0.76	-	0.14±0.36	0.29±0.76	0.43±0.79	0.43±0.79	0.29±0.49	0.29±0.49	0.14±0.38	7.14*
25 mg Propolis	5.33±2.55	0.56±0.22	0.44±0.53	-	-	0.11±0.33	-	0.11±0.33	-	-	0.11±0.33	6.67*
50 mg Propolis	0.56±0.88	0.37±0.93	1.01±0.22	-	0.17±0.51	0.3±1.00	1.00±1.22	-	-	-	1.88±2.75	3.43
100 mg Propolis	0.58±0.28	0.11±0.71	0.08±0.73	-	-	-	0.56±0.13	-	-	-	-	1.33
200 mg Propolis	-	0.28±0.75	0.83±0.72	-	-	2.14±0.81	-	0.33±0.02	-	-	0.33±0.02	4.92
400 mg Propolis	2.67±0.02	1.11±0.27	4.33±0.02	-	-	-	2.33±0.61	-	-	-	-	10.44*

*Significant at $p < 0.05$, Ch: Chromosome.

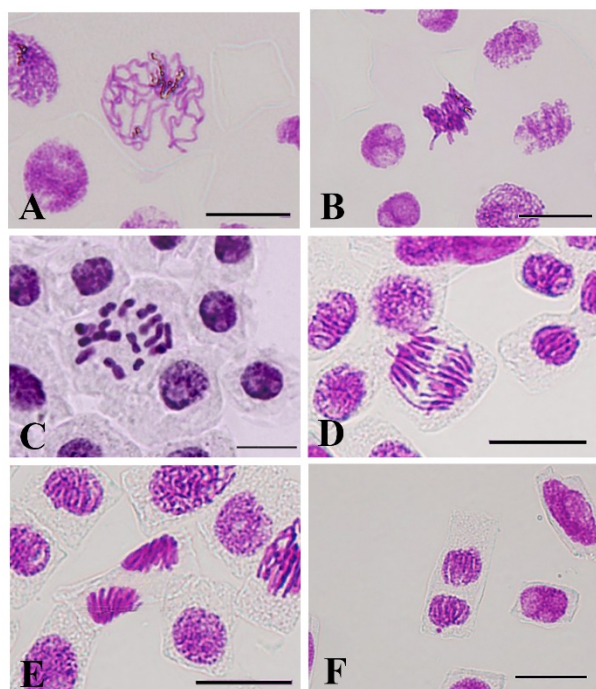


Figure 1. Mitotic Disruptions in *A. cepa* Root Tips Following ZnO Exposure and Propolis Intervention. (A) Disturbed prophase; (B) Chromosome stickiness; (C) C- metaphase; (D) Chromosome bridge; (E) Diagonal telophase; (F) Micronucleus in telophase. Scale bars 20µm.

The MN assay is widely used in genotoxicity studies as a sensitive biomarker for detecting DNA damage and chromosomal disruptions. MNs are formed from chromosome fragments or entire chromosomes that fail to be incorporated into the daughter nuclei during mitosis. Therefore, the presence of MNs is considered a reliable indicator of the genotoxic potential of a substance [52, 53].

In this study, the effect of propolis at various doses on micronucleus (MN) formation was evaluated under genotoxic stress induced by ZnO exposure (Figure 1F). In the ZnO-treated positive control group, the MN frequency was recorded as $0.12 \pm 0.02\%$, indicating that ZnO exerts harmful effects on DNA and chromosomal integrity (Table 6). A dose-dependent response was observed among the propolis treatment groups. Applications of 50 mg/L ($0.02 \pm 0.01\%$) and 100 mg/L ($0.04 \pm 0.07\%$) significantly reduced MN frequency, yielding values close to those of the negative control (Table 6). This suggests that the phenolic and flavonoid constituents of propolis may help mitigate oxidative stress caused by ZnO, thereby reducing DNA damage [7, 54]. Similarly, previous studies have reported that natural compounds with antioxidant properties, when applied at low concentrations, are effective in suppressing micronuclear damage induced by genotoxic agents [29]. However, in the group treated with 400 mg/L of propolis, the MN frequency increased to $0.36 \pm 0.13\%$, representing the highest value among all groups (Table 6). This finding suggests that at high concentrations, propolis may disrupt the intracellular redox balance and

exert pro-oxidant effects, thereby triggering DNA damage [27]. Notably, this increase in MN frequency parallels the elevated incidence of chromosomal abnormalities such as C-metaphase and anaphase bridges observed at the same dose.

In conclusion, the genotoxicity-reducing effect of propolis clearly exhibits a dose-dependent profile. While 50 and 100 mg/L concentrations demonstrated protective effects in terms of MN frequency, the 400 mg/L dose appeared to exert detrimental effects on cellular systems. Accordingly, propolis may be considered a potential natural agent for mitigating ZnO-induced genotoxicity when used within an appropriate dosage range.

Table 6. Frequency of micronucleus in *A. cepa* cells at different concentrations of propolis extracts

Treatments	Examined Cell Number	Micronucleus (%)
Negative Control	3000	-
Positive Control	3000	0.12 ± 0.02
25 mg Propolis	3000	0.06 ± 0.00
50 mg Propolis	3000	0.02 ± 0.01
100 mg Propolis	3000	0.04 ± 0.07
200 mg Propolis	3000	0.11 ± 0.27
400 mg Propolis	3000	$0.36 \pm 0.13^*$

*Significant at $p < 0.05$

CONCLUSION

In this study, the potential protective effects of the aqueous extract of propolis, obtained from the Artvin-Hatila region of Türkiye, were comprehensively evaluated against genotoxic stress induced by ZnO exposure in *A. cepa* root cells. ZnO is a metal oxide widely used in various industries, including cosmetics, paint, plastics, and electronics, and is known to exert cellular and genetic-level toxicity when released into the environment. In this context, the present study investigated whether the cytogenetic damage caused by ZnO in a model system could be alleviated by a natural agent such as propolis.

The analyses revealed that, particularly at a concentration of 100 mg/L, the aqueous propolis extract exhibited mitosis-supporting properties and suppressive effects on ZnO-induced chromosomal abnormalities and MN formation. The cytogenetic parameters obtained at this dose were comparable to those of the negative control group. On the other hand, protective efficacy was insufficient at both lower (25 mg/L) and higher (400 mg/L) concentrations, and in some parameters, genotoxicity was even exacerbated. These findings suggest that the effects of propolis on cell division and genomic stability are clearly dose-dependent.

These findings not only demonstrate the potential modulatory effect of aqueous propolis extract on ZnO-induced cytogenotoxic stress but also emphasize the critical importance of selecting an appropriate dose to ensure biological safety. The *A. cepa* model used in this study is a widely accepted bioindicator system for detecting environmental mutagens, and the data obtained

here may form a basis for future studies involving higher-order systems such as animal or human cell lines. Considering the extensive industrial use of ZnO, identifying natural and low-toxicity protective compounds against such potential genotoxic agents holds particular relevance for environmental and public health. Although further validation at the molecular level and testing in more advanced biological systems are required, the present study suggests that propolis could be a promising candidate compound for mitigating genotoxic damage to genetic material.

In this regard, the findings underscore not only the biological efficacy of propolis as a natural product but also the necessity of developing low-toxicity and biologically safer solutions to counteract environmental stressors caused by metal oxides. The aqueous formulation obtained through water-based extraction presents a safe application range in experimental biological systems, rendering it a viable candidate not only in laboratory conditions but also in agricultural production systems and environmentally friendly product formulations. Therefore, this study has the potential to provide interdisciplinary contributions to the fields of environmental toxicology, plant biotechnology, and natural protective agent research.

References

- [1] Sun Z., Xiong T., Li S., Zhang Y., Wang Y., Liu X. Comparative study of the toxicity of ZnO nanoparticles suspension, Zn²⁺, and insoluble particles on *Allium cepa*, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 186 109754, 2019.
- [2] Kumari M., Khan S. S., Pakrashi S., Mukherjee A., Chandrasekaran N. Cytogenetic and genotoxic effects of zinc oxide nanoparticles on root cells of *Allium cepa*, *Journal of Hazardous Materials*, 190 613-621, 2011.
- [3] Shaymurat T., Gu J., Xu C., Yang Z., Zhao Q., Liu Y., Liu Y. Phytotoxic and genotoxic effects of ZnO nanoparticles on garlic (*Allium sativum* L.): A morphological study, *Nanotoxicology*, 6 241-248, 2012.
- [4] Bozkuş T., Karakaş D., Yıldız A. Evaluation of genotoxic and cytotoxic effects of propolis against oxidative stress, *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 87 103695, 2021.
- [5] Castro M. L., Valente I. M., Monteiro C., Louro Martins M. A., Pintado M., Rodrigues J. A. Assessment of bioactive properties of propolis extracts: A comparative approach, *Talanta*, 130 329-336, 2014.
- [6] Medana C., Carbone F., Aigotti R., Appendino G., Baiocchi C. Selective analysis of phenolic compounds in propolis by HPLC-MS/MS, *Phytochemical Analysis*, 19 32-39, 2008.
- [7] Volpi G., Bergonzini G. Analysis of flavonoids from propolis by on-line HPLC detection, *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 42 354-361, 2006.
- [8] Daleprane J. B., Abdalla D. S. P. Emerging roles of propolis: Antioxidant, cardioprotective, and antiangiogenic actions, *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 175135, 2013.
- [9] Bruschi M. L., Lara E. H. G., Martins C. H. G., Vinholis A. H. C., Lucarini R., Panini G. C. Preparation and antimicrobial activity of gelatin microparticles containing propolis against oral pathogens, *Drug Development and Industrial Pharmacy*, 29 375-381, 2003.
- [10] Bozkuş T. N., Değer O., Yaşar A. Chemical characterization of water and ethanolic extracts of Turkish propolis by HPLC-DAD and GC-MS, *Journal of Liquid Chromatography & Related Technologies*, 44 77-86, 2021.
- [11] Kaur P., Mehta S. K., Goyal D. *Allium cepa* assay-based comparative assessment of genotoxicity of nanomaterials. In D. Das (Ed.), *Nanotoxicity: Toxicity Evaluation, Risk Assessment and Management*, 185-205, 2019.
- [12] Özkar A., Akyıl D., Konuk M., Çakır Ö. Potential genotoxic and cytotoxic effects of deltamethrin in *Allium cepa* root apical meristem cells, *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 39(2) 638-644, 2015.
- [13] Bayram N. E., Karadayı M., Güllüce M., Bayram S., Sorkun K., Öz G. C., Aydoğan M. N., Koç T. Y., Alaylar B., Salih B. Genotoxic and antigenotoxic evaluation of propolis by using in vitro bacterial assay systems. *Mellifera*, 15(1) 29-36, 2015.
- [14] Mocanu A., Isopencu G., Busuioc C., Popa O. M., Dietrich P., Socaciu-Siebert L. Bacterial cellulose films with ZnO nanoparticles and propolis extracts: Synergistic antimicrobial effect, *Scientific Reports*, 9 17687, 2019.
- [15] Ajeng D. A. P., Plashintania D. R., Putri R. M., Wibowo I., Ramli Y., Herdianto S., Indarto A. Synthesis of zinc oxide nanoparticles using methanol propolis extract (Pro-ZnO NPs) as antidiabetic and antioxidant, *Plos One*, 18(7) e0289125, 2023.
- [16] Roberto M. M., Jamal C. M. Antigenotoxicity and antimutagenicity of ethanolic extracts of Brazilian green propolis and its main botanical source determined by the *Allium cepa* test system, *Genetics and Molecular Research*, 15(2), 2016.
- [17] Singleton V. L., Orthofer R., Lamuela-Raventos R. M. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent, *Methods in Enzymology*, 299 152-178, 1999.
- [18] Zhishen J., Mengcheng T., Jianming W. The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals, *Food Chemistry*, 64(4) 555-559, 1999.
- [19] Brand-Williams W., Cuvelier M. E., Berset C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity, *LWT – Food Science and Technology*, 28(1) 25-30, 1995.
- [20] Cüce M., Bekircan T., Laghari A. H., Sökmen M., Sökmen A., Uçar E. Ö., Kılıç A. O. Antioxidant phenolic constituents, antimicrobial and cytotoxic properties of *Stachys annua* L. from both natural resources and micropropagated plantlets, *Indian Journal of Traditional Knowledge*, 16(3) 407-416, 2017.
- [21] Cüce M., Bekircan T., Laghari A., Sokmen M., Sokmen A., Ucar E., Kiliç A. Phenolic Profiles, Antimicrobial and Cytotoxic Properties of Both Micropropagated and Naturally Growing Plantlets of *Calamintha sylvatica* subsp. *sylvatica* Bromf. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, 47(4) 1145-1152, 2019.
- [22] Benzie, I. F. F., Strain, J. J. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of "antioxidant power": The FRAP assay, *Analytical Biochemistry*, 239(1), 70-76, 1996.
- [23] Pulido, R., Bravo, L., Saura-Calixto, F. Antioxidant activity of dietary polyphenols as determined by a modified ferric reducing/antioxidant power assay, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(8) 3396-3402, 2000.
- [24] Kalogeropoulos, N., Konteles, S. J., Troullidou, E., Mourtzinou, I., Karathanos, V. T. Chemical composition, antioxidant activity and antimicrobial properties of propolis extracts from Greece and Cyprus, *Food Chemistry*, 116(2) 452-461, 2009.
- [25] Kumazawa, S., Hamasaka, T., Nakayama, T. Antioxidant activity of propolis of various geographic origins, *Food Chemistry*, 84(3) 329-339, 2004.

- [26] Bankova, V., de Castro, S. L., Marcucci, M. C. Propolis: Recent advances in chemistry and plant origin, *Apidologie*, 31(1) 3-15, 2002.
- [27] Firuzi, O., Lacanna, A., Petrucci, R., Marrosu, G., Saso, L. Evaluation of the antioxidant activity of flavonoids by "ferric reducing antioxidant power" assay and cyclic voltammetry, *Biochimica et Biophysica Acta*, 1721(1-3) 174-184, 2005.
- [28] Garrido, L., Delgado, R., Bosch, F., Munoz, A. Antioxidant properties of caffeic acid derivatives: Structure-activity relationship, *Food Chemistry*, 135(4) 2408-2414, 2012.
- [29] Apak, R., Güçlü, K., Demirata, B., Ozyurek, M., Celik, S. E., Bektaşoğlu, B., Berker, K. I., Ozyurt, D. Comparative evaluation of various total antioxidant capacity assays applied to phenolic compounds with the CUPRAC assay, *Molecules*, 12(7) 1496-1547, 2004.
- [30] Apak, R., Özyürek, M., Güçlü, K., Çapanoğlu, E. Antioxidant activity/capacity measurement, 1. Classification, physicochemical principles, mechanisms, and electron transfer (ET)-based assays, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 64(5) 997-1027, 2016.
- [31] Aliyazicioglu, R., Sahin, H., Erturk, O., Ulusoy, E., Kolayli, S. Properties of phenolic content and biological activity of propolis samples from different geographical origins, *International Journal of Food Properties*, 16(2) 277-287, 2013.
- [32] Buratti, S., Benedetti, S., Cosio, M. S. Evaluation of the antioxidant power of honey, propolis and royal jelly by amperometric flow injection analysis, *Talanta*, 71(3) 1387-1392, 2007.
- [33] Nagai, T., Sakai, M., Inoue, R., Inoue, H., Suzuki, N. Antioxidative activities of some commercially honeys, royal jelly, and propolis, *Food Chemistry*, 80(1) 29-33, 2003.
- [34] Russo, A., Troncoso, N., Sanchez, F., Garbarino, J. A., Vanella, A. Propolis protects human spermatozoa from DNA damage caused by benzo[a]pyrene and exogenous reactive oxygen species, *Life Sciences*, 70(8) 989-1000, 2002.
- [35] Rojas, E., Lopez, M. C., Valverde, M. Single cell gel electrophoresis assay: methodology and applications, *Journal of Chromatography B: Biomedical Sciences and Applications*, 722(1-2) 225-254, 1993.
- [36] Sudhakar, R., et al. Cytogenetic evaluation of the genotoxic potential of fenitrothion in mouse bone marrow cells, *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 490(2) 113-119, 2001.
- [37] Leme, D. M., Marin-Morales, M. A. *Allium cepa* test in environmental monitoring: A review on its application, *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 682(1) 71-81, 2009.
- [38] Mercykutty, V. C., Stephen, J. Induction of chromosome aberrations in *Allium cepa* by pollution of Cochin backwater, *Cytologia*, 45(4) 769-777, 1980.
- [39] Celik, T. A., Aslanturk, O. S. Evaluation of cytotoxicity and genotoxicity of *Inula viscosa* leaf extracts with *Allium* test, *Journal of Biomedicine and Biotechnology*, 2010, 189252.
- [40] Oyeyemi, I. T., Bakare, A. A. Genotoxicity of treated pharmaceutical effluent and potential protective effects of vitamins C and E using *Allium cepa* assay, *Journal of Toxicology and Environmental Health Sciences*, 5(3) 43-51, 2013.
- [41] Chukwujekwu, J. C., Van Staden, J., Genotoxic effects of propolis from different geographical origins, *South African Journal of Botany*, 91 33-38, 2014.
- [42] Roberto, D., et al., Cytogenotoxic effects of Brazilian green propolis on human cells, *Toxicology in Vitro*, 34 212-219, 2016.
- [43] Levan, A. The effect of colchicine on root mitoses in *Allium*, *Hereditas*, 24(4), 471-486, 1938.
- [44] Liu, D., et al. Evaluation of genotoxic effects of linuron in root meristem cells of *Allium cepa*, *Mutation Research*, 334(2) 253-258, 1995.
- [45] Patil, B. C., Bhat, G. I. A comparative study of cytological effects induced by ethyl methane sulphonate and maleic hydrazide in *Trigonella foenum-graecum* L., *Cytologia*, 57(3), 327-334, 1992.
- [46] Fiskesjö, G., Levan, A. Evaluation of the genotoxicity of surface water samples with the *Allium* test, *Science of the Total Environment*, 109-110, 343-354, 1993.
- [47] Darlington, C. D., McLeish, J. Action of colchicine and related compounds on the mitotic spindle, *Nature*, 168(4273), 403-406, 1951.
- [48] Yi, H., Meng, Q. DNA bridge formation and chromosome breakage, *Mutation Research*, 554(1-2), 71-78, 2003.
- [49] Bianchi, F., et al. Genotoxicity biomarkers in human populations exposed to environmental and dietary agents, *Mutation Research*, 752(1), 1-9, 2013.
- [50] Çavuşoğlu, K. The effect of propolis extract on *Allium cepa* root meristem cells, *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 78, 103382, 2020.
- [51] Çavuşoğlu, K. Determination of antigenotoxic potential of propolis on mercury-induced genotoxicity in *Allium cepa* test system, *Environmental Science and Pollution Research*, 27 23029-23038, 2020.
- [52] Fenech, M. The in vitro micronucleus technique, *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 455(1-2) 81-95, 2000.
- [53] Gebel, T., Kunz, B. M., Dunkelberg, H. Comparison of mutagenicity of dichloroacetic acid and trichloroacetic acid in mammalian cell systems, *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 395(1) 63-72, 1997.
- [54] Dantas, F. J. S., et al. Protective effects of propolis extract on DNA damage and oxidative stress in *Allium cepa* cells, *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 132 110835, 2020.

***Glaucium flavum* Crantz toprak üstü kısımlarındaki fenolik ve uçucu bileşiklerin tanımlanması ve antioksidan etkinliğinin belirlenmesi**

Abidin GÜMRÜKÇÜOĞLU¹,

Tıbbi-Aromatik Bitkiler Uygulama ve Araştırma Merkezi, Artvin Çoruh Üniversitesi, 0800, Artvin, Türkiye

✉: gumrukcuogluabidin@artvin.edu.tr  [0000-0001-7285-9664](https://orcid.org/0000-0001-7285-9664)

Geliş (Received): 21.04.2025

Düzeltilme (Revision): 10.05.2025.

Kabul (Accepted): 29.05.2025

ÖZ

Glaucium flavum Crantz toprak üstü kısımlarının fitokimyasal profili ve antioksidan kapasitesi değerlendirilmiştir. HPLC-DAD ve SPME-GC-MS teknikleri kullanılarak benzaldehit (%37.47) ve 1-heksanal-2-etil (%33.87) başlıca uçucu bileşenler olarak tespit edilmiştir. Metanolik ekstraktlarda pirogallol (3089.23 mg/kg) ve kafeik asit (384.06 mg/kg) ana fenolik bileşenler, rutin (16000 mg/kg) ve kateşin (649.58 mg/kg) ise major flavonoidler olarak belirlenmiştir. Askorbik asit içeriği 1078.17 mg/kg olarak ölçülmüştür. Toplam fenolik içerik (13.84±0.46 mg GAE/g kuru örnek) ve toplam flavonoid içerik (7.65±0.22 mg QE/g kuru örnek) ile FRAP (10.98±0.22 µmol Fe²⁺/g) ve CUPRAC (0.11±0.01 mmol TEAC/g) testleri güçlü antioksidan aktiviteyi doğrulamıştır. Bulgular, *G. flavum* Crantz'ın zengin biyoaktif bileşenleri ve güçlü antioksidan özellikleri nedeniyle farmakolojik araştırmalar için umut verici bir kaynak olduğunu göstermektedir.

Keywords: *Glaucium flavum* Crantz, fenolik bileşikler, flavonoidler, antioksidan aktivite, fitokimyasal profil.

IDENTIFICATION OF PHENOLIC AND VOLATILE COMPOUNDS IN AERIAL PARTS OF GLAUCIUM FLAVUM CRANTZ. AND DETERMINATION OF THEIR ANTIOXIDANT ACTIVITY

ABSTRACT

The phytochemical profile and antioxidant capacity of *Glaucium flavum* Crantz aerial parts were evaluated. Using HPLC-DAD and SPME-GC-MS techniques, benzaldehyde (37.47%) and 1-hexanal-2-ethyl (33.87%) were identified as predominant volatile constituents. In methanolic extracts, pyrogallol (3089.23 mg/kg) and caffeic acid (384.06 mg/kg) emerged as principal phenolic compounds, while rutin (16000 mg/kg) and catechin (649.58 mg/kg) were the major flavonoids. Ascorbic acid content was quantified at 1078.17 mg/kg. Total phenolic content (13.84±0.46 mg GAE/g dry sample) and total flavonoid content (7.65±0.22 mg QE/g dry sample), along with FRAP (10.98±0.22 µmol Fe²⁺/g) and CUPRAC (0.11±0.01 mmol TEAC/g) assays, substantiated robust antioxidant activity. The findings demonstrate that *G. flavum* Crantz represents a promising resource for pharmacological investigations owing to its abundant bioactive constituents and potent antioxidant properties.

Keywords: *Glaucium flavum* Crantz , phenolic compounds, flavonoids, antioxidant activity, phytochemical profile

GİRİŞ

Fenolik bileşikler, çeşitli bitki türlerinde sentezlenen ve sekonder metabolitler sınıfına dahil olan önemli fitokimyasal bileşenlerdir. Bu bileşikler, sahip oldukları çeşitli biyolojik aktiviteler ve insan sağlığı üzerindeki olumlu etkileri nedeniyle bilim dünyasında büyük ilgi görmektedir. Doğal polifenoller; antioksidan özellikleri, antimutajenik ve/veya antikanserijenik etkileri, anti-enflamatuar özellikleri ve sinir sistemini koruyucu etkileri gibi nedenlerle önemli bileşikler olarak kabul edilmektedir (1-4). Bilimsel çalışmalar, bu bileşiklerin hem oksidatif bozulmaya karşı koruyucu antioksidanlar olarak görev yapabildiklerini hem de hücrel ölümüne neden olan biyomoleküllere zarar veren pro-oksidanlar olarak işlev görebildiklerini ortaya koymaktadır (5-6).

Tıbbi bitkilerin terapötik kullanımı esas olarak fenolik asitler ve flavonoidler gibi ikincil metabolitlerin varlığıyla ilişkilidir (7-8). Antioksidan etkileri ve insan sağlığına olan diğer sayısız faydaları ve endüstriyel uygulamaları nedeniyle son yıllarda bitki polifenollerine artan bir ilgi gözlenmektedir. Tıbbi bitkiler aynı zamanda dünya çapında beslenme amaçlı olarak da kullanılmakta, birçok ülkede mevcut mevzuata göre gıda maddesi olarak tescil edilmekte ve pazarlanmaktadır (8-10). Önemli terapötik etkileri göz önüne alındığında, fenolik bileşiklerin tanımlanması ve karakterizasyonu analitik bilimlerden büyük ilgi görmektedir (11-12). Ayrıca, birçok çalışma bitkilerde polifenollerin varlığını kanıtlamış ve bunların terapötik ve nutrasötik kullanımlarını ve potansiyel antioksidan aktivitelerini anlamaya çalışmıştır (13). Bu bağlamda, bitkilerdeki bu bileşik sınıflarını tanımlamak ve karakterize etmek için

analitik yöntemlerin geliştirilmesi fitoterapi araştırmalarında önemli bir adım haline gelmiştir. Tıbbi bitkilerdeki fenolik bileşiklerin karakterizasyonu için önerilen yöntemler arasında gaz kromatografisi (14), yüksek performanslı sıvı kromatografisi (7,15) ve kapiler elektroforez (15,16) bulunmaktadır. Bununla birlikte, fenolik asitler ve flavonoidler yüksek erime noktalarına sahiptir ve 200°C'nin üzerinde ısıtıldıklarında bozunurlar; bu nedenle, bu bileşikler için ayırma protokolleri tercihen sıvı kromatografik yaklaşımlara dayanmaktadır. Bu sıvı kromatografik teknikler genellikle UV spektrometrik, UV/Vis florimetrik, kütle spektrometrik veya elektrokimyasal tekniklere dayalı tespit şemalarına bağlanır. Özellikle, HPLC tekniklerine bağlanan elektrokimyasal tespit stratejileri, herhangi bir türevlendirme prosedürü kullanılmaksızın elektroaktif moleküllerin doğrudan tespiti için hassas analitik prosedürler olarak önem kazanmıştır.

Yüksek Performanslı Sıvı Kromatografisi (HPLC), bitkilerdeki fitokimyasalları tespit etmek ve miktarını belirlemek için uygulanan en yaygın kullanılan ayırma tekniğidir (17-20). On-line diyot dizi tespiti (DAD) (21-22), ultraviyole dedektörler (23) veya elektrokimyasal dedektörler (24) gibi farklı tespit modları kullanılmaktadır. Elektrosprey iyonizasyonu (ESI), atmosferik basınçlı kimyasal iyonizasyon (APCI), negatif veya pozitif iyon modu gibi daha sofistike tekniklerin MS-MS (üçlü kuadrupol kullanarak) veya teorik MSn (iyon tuzağı kullanarak) ile kombinasyonu piklerin tanımlanması için doğrulama sağlar, ancak aynı zamanda yöntemin maliyeti ve zorluğu da artmaktadır (25-30). Aksine, HPLC-DAD kullanımı yöntemi basitleştirir ve maliyetini düşürerek düşük bütçeli laboratuvarlarda rutin bir analiz için uygun hale getirir. Katı faz mikro ekstraksiyonu (SPME), gaz kromatografisi-kütle spektrometresi (GC-MS) analizinden önce uçucu maddeleri izole etmek ve önceden konsantre etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır [31-34]. SPME'nin diğer numune hazırlama tekniklerine (örn. katı faz ekstraksiyonu veya sıvı-sıvı ekstraksiyonu) göre çözücülerden kaçınması, otomasyon kolaylığı ve küçük numune boyutu gereksinimleri gibi çeşitli avantajları vardır [35]. SPME tekniği, bu özellikleri sayesinde özellikle çok sayıda örnek incelemesi gerektiren çalışmalarda tercih edilmektedir; bitki ıslahçıların genetik özellikleri araştırdığı bitki popülasyonlarının değerlendirilmesi buna örnek gösterilebilir [36,37]. Domates [32], kavun [38,39], elma [40,41] ve üzüm [42-44] dahil olmak üzere birçok bitki türünde, aroma ile ilişkili olanlar da dahil olmak üzere uçucuları kontrol eden genlerin veya kantitatif özellik lokuslarının (QTL'ler) haritalanması rapor edilmiştir. Bitki uçucu fenotipleme, hem az sayıda uçucunun hedefe yönelik analizleri [45,46] hem de çok sayıda hedefli veya hedefsiz uçucunun daha geniş profilinin çıkarılması ("metabolomik") için genellikle GC-MS ile gerçekleştirilir [31,32,38,39,40,47].

Glaucium flavum Crantz (sarı boynuzlu gelincik), ismi Yunanca "glaucos" kelimesinden gelen mavimsi-yeşil yaprakları ve "flavum" kelimesinin işaret ettiği sarı

çiçekleriyle bilinmektedir. Karadeniz'den güney ve batı Avrupa'ya, ayrıca kuzeybatı Avrupa'ya kadar geniş bir yayılıma sahip olan bu bitki; kısa ömürlü, çok yıllık ve lateks içeren özelliklere sahiptir. Son yıllarda çeşitli araştırmacılar [48,49]. Avrupa'nın birçok bölgesinde bu türün popülasyon yoğunluğunda azalma olduğunu rapor etmişlerdir. Bu nedenle bitki, yayılım gösterdiği farklı bölgelerde çeşitli IUCN (Uluslararası Doğa Koruma Birliği) kategorilerine dahil edilmiştir.

Küçük popülasyonların genetik sürüklenme ve akraba evliliği yoluyla genetik çeşitliliği kaybettiği, yavruların uyumluluğunun azaldığı, çevresel ve demografik değişikliklere duyarlılığın arttığı ve tohum üretimi ile canlılığının düştüğü gösterilmiştir [50-52]. *Glaucium flavum Crantz* esas olarak kumullarda, uçurumlarda ve çakıllı sahillerde bulunur ancak gelgit veya kıyı etkisinden uzakta, iç kesimlerde de yayılış gösterebilir.

Ayrıca, önceki araştırmalar *G. flavum*'un antioksidan [53] anti-inflamatuar [54] ve antikanser [55] özelliklerine dikkat çekmiştir. Fitokimyasal açıdan, *G. flavum*'un fenolik bileşimi üzerine sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Örneğin, Bulgaristan kökenli *G. flavum Crantz*'ın örneklerinde ferulik ve p-hidroksisinnamik asitler gibi fenolik bileşikler tespit edilmiştir [56].

Mevcut çalışmada, farmakobotanik açıdan önem taşıyan *Glaucium flavum Crantz*'ın toprak üstü kısmının metanolik ekstraktının fitokimyasal kompozisyonu, katı faz mikro ekstraksiyon (SPME) tekniği ile uçucu bileşiklerin profili ve antioksidan potansiyeli kapsamlı bir şekilde karakterize edilmiştir. Literatürde benzer içerik analizleri bulunmasına karşın, bu bitkinin ekstraktlarında bulunan fenolik asitler, flavonoidler ve vitamin gibi geniş bir spektrumda fitokimyasalların eş zamanlı analizi için HPLC-DAD metodolojisi ve uçucu bileşiklerin spesifik karakterizasyonu için SPME-GC-MS tekniğinin entegre edildiği bir protokol daha önce rapor edilmemiştir. Yakın zamanda gerçekleştirilen bir çalışmada [57] bitkinin kök ekstraktları üzerine konvansiyonel GC-MS analizi uygulanmış olsa da, tespit edilen bileşik spektrumu oldukça sınırlı kalmıştır. Bu araştırmada kullanılan SPME kiti ile optimize edilmiş GC-MS platformu, konvansiyonel ekstraksiyon yöntemlerine kıyasla önemli ölçüde geliştirilmiş hassasiyet, seçicilik ve reproduçibilite özellikleri sunmaktadır. Ayrıca, bu çalışmanın önemli bir inovasyonu olarak, *Glaucium flavum Crantz*'ın toprak üstü kısımlarının daha sofistike analitik metodoloji kullanılarak incelenmesi, daha kapsamlı bir bileşik profilinin aydınlatılmasını mümkün kılmıştır. Literatürdeki mevcut çalışmalar genellikle alkaloid fraksiyonlarının kalitatif karakterizasyonu ve sınırlı fenolik bileşik tanımlamasıyla kısıtlı kalırken [58-61] bu araştırma, geniş spektrumlu fenolik bileşikler ve volatil organik bileşiklerin sistematik ve bütünsel tanımlanmasını sağlamış, böylece bitkinin fitokimyasal repertuarını önemli ölçüde zenginleştirmiştir. Bu genişletilmiş fitokimyasal profil, *Glaucium flavum Crantz*'ın anti-enflamatuar ve antikanser potansiyelinin moleküler mekanizmalarının aydınlatılmasına katkıda bulunarak, hedeflenmiş farmakolojik uygulamalar için

rasyonel bir temel sağlayacak ve gelecekteki terapötik araştırmalara yeni perspektifler kazandıracaktır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Bitki Materyali ve Metanolik Ekstraksiyonu

Çalışılan bitkinin takson adları, bitkinin toplanma yeri Tablo 1'de gösterildiği gibi belirtilmiştir. Ayrıca, *Glaucium flavum Crantz*'un habitatu Şekil 1'de gösterilmektedir. Bitki toplandıktan sonra, bitki materyali hızlıca orta derecede ortam ışığına sahip iyi havalandırılan bir kurutma odasına aktarıldı ve doğrudan güneş ışığından uzak tutuldu. Ayrıca Türün güncel taksonomik durumu ve isimlendirmesi Dr. Alper DURMAZ tarafından yapılan teşhis ile birlikte Plants of the World Online veritabanı, "Bizim Bitkiler" çevrimiçi florası güncel literatür referansları alınarak doğrulanmıştır [62-63].

Table 1. İncelenen *Glaucium flavum Crantz*'ın toplama Verileri

Takson	Mevki
<i>Glaucium flavum Crantz</i>	41°43'07"N 35°55'03"E Bitki örnekleri, Samsun ili Bafra ilçesinde bulunan Kızılırmak Nehri kenarındaki Fener mevkiisi sahil kenarı kumullarından toplandı



Şekil 1. *Glaucium flavum Crantz* habitatu

Glaucium flavum Crantz'ın yaprakları ve çiçekleri, antioksidan kapasite, bazı fenolik ve flavonoid bileşik içerikleri ve uçucu bileşik içeriği için -20°C'de saklandı. Tüm deneyler ve analizler üç tekrarlı olarak gerçekleştirildi.

Örneklerin Hazırlanması

Ekstraksiyon yöntemi [64-65] yöntemleri revize edilerek kullanıldı. Burada, 20 gram kuru toz içeren yaprak ve çiçek örnekleri, hedef bileşiklerin ekstraksiyonunu

artırmak için ayrı ayrı 200 ml metanol ile muamele edildi ve karışımlar 30 dakika boyunca ultrasonikasyona tabi tutuldu. Ultrasonikasyon sonrasında, örnekler bir çalkalayıcıya aktarıldı ve optimum ekstraksiyon verimliliği için 24 saat boyunca karanlıkta oda sıcaklığında tutuldu. İnkübasyon sürecinin ardından, ekstraktlardan büyük partikülleri uzaklaştırmak için normal filtre kağıdı kullanıldı, ardından daha küçük partikülleri gidermek için 0.45 µm şırınga filtresi ile ikinci bir filtreleme işlemi gerçekleştirildi. Ultrasonikasyon, uzun süreli inkübasyon ve çift filtreleme aşamalarını içeren bu kapsamlı ekstraksiyon prosedürü, kuru toz örneklerinden ekstraksiyon çözeltisine maksimum bileşik transferini sağlamak için tasarlandı ve elde edilen berrak filtratlar analiz için hazırlandı.

Glaucium flavum Crantz türünün Antioksidan Kapasitesinin Belirlenmesi

Reaktif ve malzemeler

Polifenol, flavonoid ve antioksidan kapasite analizleri için çeşitli analitik reaktifler şu şekilde temin edildi: Metanol, Trolox (6-hidroksi-2,5,7,8-tetrametilkroman-2-karboksilik asit), 2,4,6-tripiridil-s-triazin (TPTZ) ve Folin-Ciocalteu fenol reaktifi Sigma Chemical Co.'dan (St. Louis, MO, ABD) tedarik edildi. Sodyum karbonat, asetik asit, neokuproin (2,9-dimetil-1,10-fenantrolin), alüminyum nitrat nonahidrat ve amonyum asetat dahil tamamlayıcı reaktifler Merck Chemical Co.'dan (Darmstadt, Almanya) temin edildi. Deneyisel prosedürler boyunca kullanılan tüm kimyasal bileşikler analitik saflık derecesindedir.

Toplam polifenolik içeriğin belirlenmesi

Toplam fenolik bileşiklerin ölçümü, Folin-Ciocalteu metodolojisi kullanılarak gerçekleştirildi [66]. Altı farklı konsantrasyonda (1, 0,5, 0,25, 0,125, 0,0625 ve 0,03125 mg/mL) gallik asit kullanılarak standart bir kalibrasyon eğrisi hazırlandı. Deneyisel protokol, 20 µL standart çözelti veya metanolik bitki ekstraktının (1 mg/mL) 400 µL 0,5 N Folin-Ciocalteu reaktifi ve 680 µL distile su ile birleştirilmesini içeriyordu. İyiye karıştırma ve 3 dakikalık reaksiyon süresinin ardından, karışıma 400 µL %10'luk Na₂CO₃ çözeltisi eklendi. Reaksiyonun 25°C'de 2 saat boyunca gelişmesine izin verildi, ardından 760 nm'de absorbans ölçümleri kaydedildi. Polifenolik içerik daha sonra hesaplandı ve bitki kuru ağırlığı başına gallik asit eşdeğeri (GAE) miligram olarak ifade edildi.

Toplam flavonoid içeriğinin değerlendirilmesi

Toplam flavonoid ölçümü, referans [67]'ten modifiye edilmiş bir protokole göre gerçekleştirildi. Analitik prensip, alüminyum klorürün flavonoid bileşikleriyle koordinasyon kompleksleri oluşturma özelliğinden yararlanmaktadır. Özellikle, alüminyum iyonları flavon ve flavonollerde bulunan C-4 keto grubu ve C-3 veya C-

5 hidroksil grupları ile stabil kompleksler oluştururken, hem A hem de B halkalarındaki orto-dihidroksil konfigürasyonları ile daha az stabil birleşmeler oluşturmaktadır. Standardizasyon amaçları için, 0,03125 ile 1,0 mg/mL arasında değişen quercetin çözeltileri, absorbans ölçümlerini bilinen konsantrasyonlar ile ilişkilendiren bir referans eğrisi oluşturmak için kullanıldı.

***Glaucium flavum* Crantz'ın Demir ve Bakır İndirgeme Metotlarıyla Antioksidan Kapasitesinin Değerlendirilmesi**

FRAP analizi, elektron verici bileşiklerin asidik koşullar altında bulunduğu soluk sarı Fe^{3+} -TPTZ kompleksinin canlı mavi Fe^{2+} -TPTZ kompleksine dönüşümünü izleyerek antioksidan potansiyelini ölçmektedir [68]. Protokol, bir deney tüpünde 3 mL taze hazırlanmış FRAP reaktifinin 100 μ L deneysel ekstre veya kontrol çözücü ile birleştirilmesini içeriyordu. Spektrofotometrik ölçümler, 593 nm'de 25°C ortam sıcaklığında 4 dakikalık bir aralıkta kaydedildi. Elde edilen absorbans değerleri, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ kalibrasyon eğrisine (100-1000 μ mol/L) karşı ölçüldü ve nihai sonuçlar, bitki kuru maddesi başına mikromol demir sülfat heptahidrat eşdeğerleri olarak ifade edildi. CUPRAC metodolojisi, antioksidan bileşiklerin Cu^{2+} iyonları, neokuproin (alkolik çözelti) ve amonyum asetat tamponu (pH 7) içeren bir reaksiyon karışımı ile etkileşimini içerir. 60 dakikalık bir inkübasyon süresinin ardından, optik yoğunluk 450 nm'de belirlendi. Deneysel prosedür, bakır(II) klorür (10 mM), neokuproin (7.5 mM) ve amonyum asetat (1 M) eşit hacimlerinin (her biri 1 mL) örnek ekstraktı (0.2 mL) ve deiyonize su (0.9 mL) ile 4.1 mL'lik bir nihai reaksiyon hacmine ulaşmak için birleştirilmesini içeriyordu. Absorbans okumaları 60 dakikalık reaksiyon süresinin ardından elde edildi ve antioksidan kapasite, Trolox® eşdeğer antioksidan kapasitesi (TEAC) cinsinden hesaplandı [69].

***Glaucium flavum* Crantz Ekstraktının HPLC Analizi ile Fenolik ve Flavonoid Bileşiklerinin Miktar Tayini**

Kimyasal Reaktifler

Asetonitril HPLC gradyanı Sigma-Aldrich Co.'dan (St. Louis, MO, ABD) temin edilirken, metanol HPLC gradyanı Merck KGaA'dan (Darmstadt, Almanya) elde edildi. Analizde kullanılan tüm fenolik referans bileşikler, araştırma dereceli kimyasallar ve analitik standartlar tedarikinde tanınmış bir satıcı olan Sigma-Aldrich'ten temin edildi.

Enstrümantal Parametreler

Protokol A: Askorbik asit, gallik asit, 3,4-hidroksibenzoik asit, kateşin, epikateşin, kafeik asit, vanilik asit, rutin, kumarik, ferulik, rosmarinik asit, mirisetin, kersetin ve apigenin ölçümü için kromatografik metodoloji: Ayırma, bir ACE 5 C18 sabit

fazı (250 × 4.6 mm, 5 μ m partikül boyutu) kullanılarak gerçekleştirildi. İkili hareketli faz (A) asetonitril ve (B) seyreltik asetik asit (%1.5 h/h) içeriyordu. Elüsyon profili %15 A bileşeni ve %85 B bileşeni ile başlayıp, 29. dakikada %40 A bileşeni ve %60 B bileşenine geçiş yaptı. Enstrümantal konfigürasyon, bir 1260 DAD WR spektrofotometrik dedektör (250, 270 ve 320 nm'de izleme yapan), bir 1260 Kuaterner Pompa (0.7 mL/dk hacimsel akışı sürdüren), bir 1260 Vial Örnekleyici (10 μ L enjeksiyon hacmi sağlayan) ve 35°C'de tutulan bir G7116A termostatik kolon bölmesi içeriyordu.

Protokol B: Pirogallol, klorojenik asit, siringik asit, siyanidin klorür, resveratrol, oleuropein, hesperitin, kaempferol, baikalein ve krisin ölçümü için kromatografik metodoloji: Ayırma, bir ACE 5 C18 sabit fazı (250 × 4.6 mm, 5 μ m partikül boyutu) kullanılarak gerçekleştirildi. İkili hareketli faz (A) metanol ve (B) seyreltik asetik asit (%1.5 h/h) içeriyordu. Elüsyon profili %10 A bileşeni ve %90 B bileşeni ile başlayıp, 29. dakikada %40 A bileşeni ve %60 B bileşenine, ardından 40. dakikaya kadar %60 A bileşeni ve %40 B bileşenine geçiş yaptı ve 40. dakikadan 53. dakikaya kadar %90 A bileşeni ve %10 B bileşeni ile sonlandı. Enstrümantal konfigürasyon, bir 1260 DAD WR spektrofotometrik dedektör (280, 290, 320, 370 ve 535 nm'de izleme yapan), bir 1260 Kuaterner Pompa (0.7 mL/dk hacimsel akışı sürdüren), bir 1260 Vial Örnekleyici (10 μ L enjeksiyon hacmi sağlayan) ve 35°C'de tutulan bir G7116A termostatik kolon bölmesi içeriyordu.

Referans Standart Çözeltilerin Hazırlanması

Fenolik bileşenlerin kantitatif tayini, her referans standardın tam olarak belirlenmiş konsantrasyonlarda altı seri dilüsyonu kullanılarak oluşturulan harici kalibrasyon eğrileri aracılığıyla gerçekleştirildi (25, 50, 75, 100, 200 ve 300 μ g/mL). Hazırlanmalarının ardından, bu kalibrasyon çözeltileri deneysel örneklerle aynı enstrümantal koşullar altında HPLC-DAD analizine tabi tutuldu.

Toprak Üstü Kısımlardaki Uçucu Bileşiklerin SPME-GC-MS ile Belirlenmesi

Uçucu bileşiklerin SPME absorpsiyonu

Fiber, kullanımdan önce üreticinin önerdiği şekilde koşullandırıldı. Bitki, laboratuvar tipi bir öğütücüde iyice parçalandı. Toz haline getirilmiş örnekten, 20 mL'lik bir vialin üçte birini dolduracak kadar miktar PTFE/silikon septalı (Supelco) 20 mL'lik bir şişeye yerleştirildi. Her örnek 45°C'de 15 dakika ısıtıldı. Daha sonra, uygun fiber uçlu bir şırınga şişeye daldırıldı ve 40 dakika boyunca absorbe edildi. Fiber ucuna maruz kalan bileşikler, GC ünitesinin enjeksiyon bloğuna enjekte edildi ve absorpsiyon için 20 dakika tutuldu.

Cihaz koşulları

GC-MS analizi, bir Agilent (Agilent Technologies, Santa Clara, CA, ABD) gaz kromatografi ve HP-5MS ultra inert kapiler kolon (30 m × 0.25 mm × 0.25 µm) kullanılarak gerçekleştirilecektir. Yüksek saflıkta helyum (>99.99), 1.0 mL/dk akış hızında hareketli faz olarak kullanılacaktır. Enjektör sıcaklığı 250°C'ye ayarlandı. GC programı, başlangıç sıcaklığını 2 dakika boyunca 50°C'de tuttu. Sıcaklık, 2.5°C/dk hızla 150°C'ye yükseltilecek ve orada 5 dakika sabit tutulacaktır. Son olarak, 6.5°C/dk hızla 250°C'ye yükseltilecek ve orada 1 dakika sabit tutulacaktır. MS çalışma parametreleri, 35-500 m/z taranmış kütle aralığı ile 70 eV'lik bir iyonizasyon enerjisini içermektedir (kaynaklar 70'den revize edilmiştir). Bileşiklerin tanımlanması NIST Standart Referans veritabanı kullanılarak gerçekleştirildi.

İstatistiksel Analiz

Microsoft Excel 365 ile hesaplanan ortalama ± SD değeri olarak sunulmuştur.

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Glaucium flavum Crantz'un GC-MS Analizi ve Fitokimyasal Profili

Glaucium flavum Crantz türünün toprak üstü kısımlarından elde edilen ekstraktın analiz sonucunda, 4-36 dakika arasında değişen alıkonma süreleri ve 800-1500 arasında değişen indeks değerleriyle karakterize edilen çeşitli fitokimyasal bileşikler tespit edilmiştir. Tablo 2'de gösterildiği üzere, bu analizler neticesinde bitkide alifatik ve aromatik aldehytler, terpenoidler, alifatik ve aromatik hidrokarbonlar, alkoller, uçucu fenolik bileşikler ve heterosiklik bileşikler şeklinde oldukça geniş bir kimyasal çeşitlilik saptanmıştır. Yapılan araştırmada, söz konusu bileşiklerin çeşitliliği, dağılımı ve konsantrasyonlarının incelenmesi, *Glaucium flavum* Crantz'ın fitokimyasal profilinin aydınlatılmasına önemli katkılar sağlamaktadır. Bu bulgular, bitkinin kimyasal kompozisyonunun kapsamlı olarak anlaşılmasına ve potansiyel biyoaktif bileşenlerinin karakterizasyonuna temel oluşturmaktadır.

Tablo 2. *Glaucium flavum* Crantz'un fitokimyasal bileşikleri

No	RT (min)	RI	Name of the compound	Content [%]
1	6.3	806	Hekzanal	0.48
3	9.91	912	Siklopropan	0.03
4	11.95	961	Benzaldehit	38.47
5	13.0	986	Sülkaton	4.293
7	14.80	1026	1-Hekzanal-2-etil	34.87
7	15.49	1041	Benzen asetaldehit	4.91
8	17.46	1084	Tetrametilpirazin	0.63
9	18.03	1096	Undekan	1.25
10	18.25	1101	Nonanal	2.98

11	18.66	1110	Feniletıl Alkol	0.28
12	21.83	1179	Azulene	2.75
13	22.88	1202	Dekanal	0.87
14	23.59	1218	β-Siklositral	0.91
15	26.51	1283	Bornil asetat	0.43
16	26.70	1287	Karvakrol	0.52
17	26.86	1290	Dimethoxydurene	2.53
18	27.80	1312	Theaspirane	0.84
19	29.37	1349	Dehidro-ar-iyonen	0.138
20	29.54	1353	İzo-Chavibetol	0.27
21	31.29	1394	Tetradekan	0.49
22	32.21	1418	cis-Karyofilen	0.65
23	35.33	1493	Nonadekan	0.22
24	36.39	1516	Trans-Kalamen	0.49
25	36.64	1521	Dihidroaktinidiolid	0.70

Rt -Retention times on an HP-5MS UI column

RI - Experimentally determined retention indices on an HP-5MS UI column

Fitokimyasal analiz sonuçları, *Glaucium flavum* Crantz'da çeşitli kimyasal sınıflara ait bileşiklerin varlığını ortaya koymuştur. Alifatik ve aromatik aldehytler grubunda en yüksek oranları Benzaldehit (%38.47) ve 1-Hekzanal-2-etil (%34.87) bileşikler göstermiş olup, bunları Benzen asetaldehit (%4.91), Nonanal (%2.98), Dekanal (%0.87) ve Hekzanal (%0.48) takip etmiştir. Terpenoidler içerisinde monoterpen ve türevleri olarak β-Siklositral (%0.91), Bornil asetat (%0.43) ve Karvakrol (%0.52); seskiterpenler olarak Cis-Karyofilen (%0.65) ve Trans-Kalamen (%0.49); non-karotenoidler olarak ise Theaspirane (%0.84), Dihidroaktinidiolid (%0.7) ve Dehidro-ar-iyonen (%0.14) belirlenmiştir. Hidrokarbon bileşikler arasında alifatik yapıda Undekan (%1.25), Tetradekan (%0.49) ve Nonadekan (%0.22); aromatik hidrokarbon olarak Siklopropan (%0.03) ve Azulen (%2.75) tespit edilmiştir. Diğer sınıflardan ise keton grubu bileşikler olarak Sulkaton (%4.29) ve Fenil etil keton (%0.28), fenolik bileşik olarak İzo-Chavibetol (%0.27), heterosiklik bileşik olarak Tetrametilpirazin (%0.63) ve uçucu organik bileşik olarak Dimetoksiduren (%2.53) saptanmıştır. Bu sonuçlar, *Glaucium flavum* Crantz'ın zengin bir fitokimyasal profile sahip olduğunu göstermektedir. *Glaucium flavum* Crantz fitokimyasal analiz sonuçlarına göre, makro bileşikler olarak 1-Hekzanal-2-etil (%34.87) ve benzaldehit (%38.47) öne çıkmaktadır. Bu bileşiklerden benzaldehit, en basit uçucu aromatik aldehyt olup, çeşitli benzenoidlerin biyosentezinde kritik bir öncü rolü oynamaktadır. Benzaldehit, tozlayıcıları çekerek ekolojik işlev gösterirken, aynı zamanda tatlandırıcı ve antifungal ajan olarak da etki etmektedir [benz]. Endüstriyel açıdan benzaldehit, tat, koku ve kozmetik sektörlerinde yaygın kullanıma sahip olup, boyalar ve plastiklerin üretiminde hayati bir öncü görevi görmektedir [71].

Bitkide major bileşiklerden bir diğeri olan sulkaton (%4.29), bazı çalışmalarda tahılların çimlenmesini etkilemeden depolanmış mısırdaki hem böcekler hem de filamentli mantarlara karşı etkili olduğu gösterilmiştir [72]. Bu bulgu, sulkatonun insektisidal ve antifungal potansiyelini öne çıkarmaktadır.

Ayrıca bitkide düşük oranda (%0.52) bulunan önemli bileşiklerden olan karvakrol için çeşitli biyolojik aktiviteler rapor edilmiştir. Birçok çalışma karvakrolün fungisidal [73, 74], insektisidal [75] ve antimikrobiyal aktiviteler [76] sergilediğini belirtmiştir. İn vitro çalışmalarda karvakrolün antikarsinojenik ve antitümör aktiviteleri [77, 78], güçlü antimutajenik etkiler ve antioksidan özellikler [79, 80] gösterdiği de bildirilmiştir. Bu bileşiklerin varlığı, *Glaucium flavum Crantz*'ın potansiyel biyolojik aktivitelerini ve endüstriyel kullanım alanlarını açıklamada önemli bilgiler sunmaktadır.

Bitkide tespit edilen başka bir bileşik olan tetrametilpirazin (%0.63) ise çeşitli terapötik etkilere sahiptir. Bu bileşik süperoksit radikallerini temizleme, böbrek diyalizine yardımcı olma, nefrit sendromunu azaltma, diyabetik nefropatiye karşı koruma sağlama, pulmoner vazodilatör etkiyi artırma ve iskemik inmeyi tedavi etme potansiyeline sahiptir. Ayrıca anti-hipertansif ve antibakteriyel etkiler de göstermektedir [81-84].

Glaucium flavum Crantz'ın toprak üstü kısımlarının fitokimyasal profili, önemli biyoaktif potansiyele sahip çeşitli kimyasal bileşikler içermektedir. Benzaldehit (%38,47) ve 1-heksanal-2-etil (%34,87) bileşiklerinin ana bileşenler olarak baskın olması, bu bitkinin ekolojik ortamında etkili bir antimikrobiyal ve böcek çekici ajan olarak işlev görebileceğini düşündürmektedir. Ayrıca, belgelenmiş biyolojik aktivitelere sahip bileşiklerin varlığı—sulkatonun antifungal ve insektisidal özellikleri, karvakrolün antimikrobiyal, antitümör ve antioksidan etkileri ile tetrametilpirazinin böbrek fonksiyonu, hipertansiyon ve iskemik inme tedavisindeki terapötik potansiyeli *Glaucium flavum Crantz*'ın farmasötik ve tarımsal uygulamalar için değerli bir biyoaktif bileşik kaynağı olabileceğini göstermektedir. Düşük konsantrasyonda (%0,91) tespit edilmiş olan β -siklositral'in varlığı da, bu bileşiğin önceki çalışmalarda çeşitli biyolojik aktivitelerle ilişkilendirilmesi nedeniyle, bitkinin potansiyel değerini artırmaktadır.

Literatürde *Glaucium flavum Crantz* üzerine yapılan çalışmalar sınırlı sayıdadır. Yakın dönemde gerçekleştirilen bir çalışmada *G. flavum Crantz*'ın kök ekstraktının fitokimyasal profili incelenmiş, ancak tanımlanmış bileşik çeşitliliği ve konsantrasyonları sınırlı düzeyde kalmıştır [85]. Bu çalışmada, literatürden farklı olarak bitkinin aerial kısımları kullanılmıştır. Bu metodolojik yaklaşım, daha geniş spektrumda fitokimyasal bileşenlerin tespit edilmesini ve yüksek konsantrasyonlarda metabolit profilinin elde edilmesini mümkün kılmıştır.

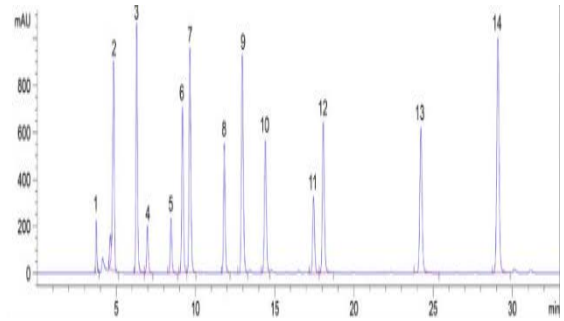
Bu bulgular, özellikle bu tür bitkilerin geleneksel kullanımlarıyla uyumlu olan antimikrobiyal, antioksidan ve farmasötik özelliklere odaklanarak, bu biyoaktif

bileşenlerin izolasyonu, karakterizasyonu ve terapötik uygulamaları konusunda ileride yapılacak araştırmalar için sağlam bir temel oluşturmaktadır.

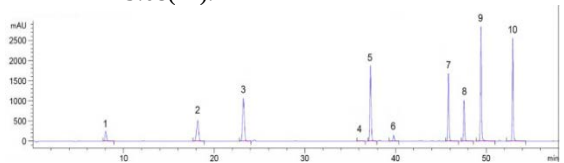
***Glaucium flavum Crantz* Ekstraktının HPLC Analizi ile Fenolik ve Flavonoid Bileşiklerinin Miktar Tayini**

Bu çalışmada, *Glaucium flavum Crantz*'ın fitokimyasal içeriği kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Araştırmada, askorbik asit vitamini ile birlikte çeşitli fenolik bileşikler ve flavonoidler incelenmiştir. Standart olarak kullanılan bileşikler arasında gallik asit, 3,4-hidroksi benzoik asit, vanilik asit, siringik asit, kumarik asit, kafeik asit, rosmarinik asit, pirogallol, klorojenik asit, oleuropein ve resveratrol gibi 12 fenolik bileşik bulunmaktadır. Ayrıca kateşin, epikateşin, rutin, mirsetin, kuersetin, apigenin, siyanidin klorür, hesperitin, kaempferol, baicalin ve krisin olmak üzere 11 flavonoid analiz edilmiştir.

Çalışmada iki farklı analitik yöntem kullanılmıştır. A yönteminde askorbik asit, gallik asit, 3-4 hidroksibenzoik asit, kateşin, epikateşin, kafeik asit, vanilik asit, rutin, kumarik asit, ferulik asit, rosmarinik asit, mirsetin, kuersetin ve apigenin analiz edilirken; B yönteminde pirogallol, klorojenik asit, siringik asit, siyanidin klorür, resveratrol, oleuropein, hesperitin, kaempferol, baicalein ve krisin belirlenmiştir. Şekil 2 ve Şekil 3'de gösterildiği üzere, fenolik bileşikler kromatografik olarak net bir şekilde birbirinden ayrılmıştır.



Şekil 2. Fenolik Standartların HPLC Kromatogramları (Yöntem A). Sembolleri ve alıkonma süreleri: askorbik asit (AsA); 3.74(1), gallik asit; 4.84(2), 3-4 hidroksibenzoik asit; 6.29(3), kateşin; 6.96(4), epikateşin; 8.45(5), kafeik asit; 9.17(6), vanilik asit; 9.65(7), rutin; 11.81(8), kumarik asit; 12.95(9), ferulik asit; 14.41(10), rosmarinik asit; 17.44(11), mirsetin; 18.04(12), kuersetin; 24.2(13), apigenin; 29.08(14).



Şekil 3. Fenolik Standartların HPLC Kromatogramları (Yöntem B). Sembolleri ve alıkonma süreleri: pirogallol; 8.045(1), klorojenik asit; 18.184(2), siringik asit; 23.228(3), siyanidin klorür; 36.248(4),

resveratrol; 37.236(5), oleuropein; 39.810(6), hesperitin; 45.84(7), kaempferol; 47.562(8), baicalin; 49.435(9), krisin; 52.939(10)

Glaucium flavum Crantz'ın toprak üstü kısımları üzerinde yürütülen analizler sonucunda, toplam 24 fenolik bileşiğin tanımlanması ve miktarının belirlenmesi için yöntem A ve yöntem B kullanılarak kapsamlı bir çalışma gerçekleştirilmiştir (Tablo 3).

Tablo 3. *Glaucium Flavum Crantz* Ekstraktı'nın fenolik bileşik içerikleri

No	Bileşikler	<i>Glaucium Flavum Crantz</i> Ekstraktı (mg/L)
Vitamin		
1	Askorbik asit	1078.17
Fenolik		
2	Gallik asit	200.32
3	3,4 hidroksi benzoik asit	36.01
4	Vanilik asit	75.65
5	Siringik asit	T/E
6	Kumarik Asit	T/E
7	Kafeik asit	384.06
8	Ferulik asit	T/E
9	Rozmarinik asit	T/E
10	Progallol	3089.23
11	Klorojenik asit	229.44
12	Resveratrol	T/E
13	Oleuropein	T/E
Flavonoid		
14	Kateşin	649.58
15	Epikateşin	90.39
16	Rutin	16000
17	Mirisetin	T/E
18	Kersetin	114.89
19	Apigenin	T/E
20	Siyanidin klorür	T/E
21	Hesperitin	T/E
22	Kaempferol	T/E
23	Baicalin	43,81
24	Krisin	T/E

Not: T/E - Tespit Edilemedi

Analiz sonuçları incelendiğinde, 24 fenolik bileşikten 12 tanesinin tespit edilebilecek düzeyde olduğu görülmüştür. Vitamin içeriği açısından değerlendirildiğinde, bitkide askorbik asit miktarı 1078,17 mg/kg olarak belirlenmiştir. Fenolik bileşikler arasında, pirogallol 3089,23 mg/kg değeriyle majör bileşik olarak tespit edilmiştir. Diğer önemli fenolik bileşikler arasında gallik asit (200,32 mg/kg), 3,4-hidroksi benzoik asit (36,01 mg/kg), vanilik asit (75,65 mg/kg), kafeik asit (384,06 mg/kg) ve klorojenik asit

(229,44 mg/kg) bulunmaktadır. Flavonoid bileşikler arasında ise rutin (16000 mg/kg) ve kateşin (649,58 mg/kg) majör bileşikler olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca baicalin (43,81 mg/kg), epikateşin (90,39 mg/kg) ve kuersetin (114,89 mg/kg) gibi diğer flavonoidler de tespit edilmiştir.

Araştırmada belirlenen askorbik asit (C vitamini), önemli bir besinsel antioksidan olarak kabul edilmektedir. C vitamini, kardiyovasküler hastalık, inme, kanser, nörodejeneratif hastalıklar ve kataraktogenez gibi kronik hastalıklarla ilişkilendirilen reaktif oksijen ve nitrojen türlerinin sebep olduğu lipidler, DNA ve proteinler gibi makromoleküllerdeki oksidatif hasarı önemli ölçüde azaltma özelliğine sahiptir [86]. Literatür C vitamininin yüksek oranda antioksidan, anti-aterojenik, anti-kanserojen ve immünomodülatör gibi çok sayıda sağlık yararı sağladığını göstermektedir. *Glaucium flavum Crantz*'da tespit edilen yüksek askorbik asit miktarı (1078,17 mg/kg), bitkinin sağlık açısından önemli bir potansiyele sahip olduğuna işaret etmektedir. Bitki fenollerı genellikle fenilpropanoid metabolik yolunun ürünleri olup çok çeşitli bileşiklerden oluşmaktadırlar. Bu bileşikler güçlü antioksidan özelliklere sahiptir ve kanser ile kardiyovasküler hastalıklar gibi kronik rahatsızlıklarda rol oynayan DNA, lipidler ve proteinler gibi biyomoleküllerdeki oksidatif hasarı önleyebilmektedirler [87]. *Glaucium flavum Crantz*'da yapılan analizlerde tespit edilen fenolik bileşikler arasında en yüksek miktarda bulunan pirogallol (3089,23 mg/kg), antifungal ve antipsoriatik özelliklere sahip olduğu bildirilmiştir [88, 89]. Bitkide önemli miktarda bulunan kafeik asit (384,06 mg/kg) ise, çeşitli tarım ürünlerinde önemli bir doğal antioksidan kaynağı olarak tanımlanmaktadır [90,91]. Kafeik asitin kanser tedavisinde önemli bir kullanım potansiyeline sahip olduğu [92, 93] ve güçlü bir doğal antioksidan olarak kabul edildiği bildirilmiştir [94]. Yapılan çalışmalarda, kafeik asitin reaktif oksijen türleri (ROS) seviyelerini artırarak ve mitokondriyal fonksiyonu bozarak kanser hücrelerinde apoptozu indükleyebildiği, ayrıca metastazı baskılayarak tümörlerin agresif davranışını azaltmada fayda sağladığı belirlenmiştir [95].

Bu araştırma sonuçlarında, flavonoidlerin bitkiler tarafından üretilen ve güçlü antioksidan özelliklere sahip polifenolik bileşikler olduğu vurgulanmaktadır. Flavonoidler aynı zamanda anti-enflamatuvar, antiviral ve antikarsinojenik etkileriyle de bilinmektedir. *Glaucium flavum Crantz*'ın ekstraktında yapılan analizlerde incelenen 11 flavonoid arasında rutin, kateşin, baicalin, epikateşin ve kuersetin tespit edilebilir düzeylerde bulunmuştur. Tespit edilen flavonoidler arasında özellikle rutin ve kateşin dikkati çekmektedir. Kateşin, flavanollerin bir alt sınıfına ait olan bir flavonoid türü olup, güçlü antioksidan özelliklere sahiptir. Kimyasal yapısı dört fenolik halka içermekte olup, serbest radikalleri nötralize etme, inflamasyonu azaltma, kardiyovasküler sağlığı destekleme ve potansiyel nöroprotektif etkiler gösterme özellikleriyle bilinmektedir.

Analiz sonuçlarında en yüksek miktarda bulunan bileşik olan rutin (16000 mg/kg), en fazla tespit edilen fenolik bileşik olan pirogallolden (3089,23 mg/kg) yaklaşık beş kat daha fazla, ikinci en yüksek flavonoid olan kateşinden (649,58 mg/kg) ise yaklaşık 25 kat daha fazla olduğu belirlenmiştir.

Rutin'in süperoksit, peroksil ve hidroksil radikalleri gibi farklı oksitleyici türler üzerindeki indirgeyici özellikleri, önemli bir antioksidan etki sağlamaktadır [96]. Bunun yanı sıra, rutin antitansiyon, antimikrobiyal ve antiinflamatuvar etkiler gibi çeşitli farmakolojik özelliklere de sahip olduğu bildirilmiştir [97]. Bu özelliklerinden dolayı, yüksek oranda rutin içeriğine sahip olan *Glaucium flavum Crantz*'in antitansiyon, antimikrobiyal ve antiinflamatuvar etki potansiyeli taşıdığı düşünülmektedir. Bitkinin içerdiği bu biyoaktif bileşiklerin, ileride yapılacak farmakolojik çalışmalar için önemli bir kaynak olabileceği öngörülmektedir.

Bu çalışmada incelenen *Glaucium flavum Crantz* türü üzerine literatürdeki araştırmalar sınırlıdır. Benzer türler üzerinde yapılan çalışmalara bakıldığında, *G. corniculatum* [98] bitkisinin metanol ekstraktında HPLC analizleri ile rutin (45 µg/ml) ve kuersetin (12 µg/ml) majör flavonoidler olarak tespit edilmiş, diğer flavonoidlerin ise ihmal edilebilir düzeyde olduğu belirlenmiştir. *G. alakirensis* [99] türünde ise kateşin (39.08 ppm), klorojenik asit (32.95 ppm) ve gallik asit (5.57 ppm) içerikleri saptanmıştır. *Glaucium flavum Crantz*'in etanol fraksiyonunda Boulaaba ve arkadaşları [100] tarafından kaempferol, kafeik asit, kateşin hidrat, siringik asit, klorojenik asit, izokuersetin ve trans-hidroksisinnamik asit gibi bileşiklerin varlığı tanımlanmıştır. Bu bileşiklerin konsantrasyonları 17 ile 20 mg/kg arasında değişmektedir. Bu çalışmada uygulanan analitik metodoloji, literatürdeki diğer araştırmalara kıyasla daha kapsamlı bir bileşik profilinin aydınlatılmasını sağlamıştır. Özellikle dikkat çekici bulgular arasında, *Glaucium flavum Crantz*'daki rutin konsantrasyonunun (16000 mg/kg) pirogallolden (3089.23 mg/kg) yaklaşık beş kat, kateşinden ise yaklaşık 25 kat daha fazla olması yer almaktadır. Bu değerler, literatürde bildirilenlere göre önemli ölçüde yüksektir ve mevcut çalışmanın daha kapsamlı olduğunu göstermektedir. Mevcut araştırma, diğer çalışmalara göre daha sofistike analitik tekniklerin entegrasyonu, daha yüksek konsantrasyonlarda biyoaktif bileşiklerin tespiti ve daha geniş spektrumda fitokimyasalların eş zamanlı analizi açısından üstünlük göstermektedir. Sonuç olarak, bu çalışmada *Glaucium flavum Crantz*'in fitokimyasal profili detaylı bir şekilde ortaya konulmuştur. Bitkinin içerdiği yüksek miktardaki rutin (16000 mg/kg), pirogallol (3089.23 mg/kg) ve askorbik asit (1078.17 mg/kg) gibi biyoaktif bileşiklerin varlığı, potansiyel farmakolojik değerini vurgulamaktadır. Özellikle rutin antioksidan, antitansiyon, antimikrobiyal ve antiinflamatuvar etkileri göz önüne alındığında, *G. flavum Crantz*'in modern tıpta kullanılabilecek fitoterapötik ajanların geliştirilmesinde önemli bir kaynak olabileceği düşünülmektedir. Gelecekte yapılacak in vitro ve in vivo çalışmalarla, bu bitkiden elde edilecek ekstrakt ve izole

edilmiş bileşiklerin biyolojik aktivitelerinin değerlendirilmesi, tıbbi potansiyelinin tam olarak anlaşılmasına ve yeni tedavi yaklaşımlarının geliştirilmesine katkı sağlayacaktır. Bu araştırma, *G. flavum Crantz*'in zengin fitokimyasal içeriğini ortaya koyarak, doğal kaynaklı biyoaktif bileşiklerin keşfi ve değerlendirilmesi açısından literatüre önemli bir katkı sunmaktadır.

***Glaucium flavum Crantz*'ın Toplam Fenolik ve Flavonoid İçeriği ile CUPRAC ve FRAP Yöntemleriyle Antioksidan Kapasitesinin Değerlendirilmesi**

Bu çalışmada *Glaucium flavum Crantz*'in toprak üstü kısmının metanolik ekstraktlarına toplam fenolik, toplam flavonoid, FRAP ve CUPRAC içerikleri spektrofotometrik olarak belirlenmiştir (Tablo 4). Toplam fenolik içeriğin 13.84 ± 0.46 mg GAE/g, toplam flavonoid içeriğinin ise 7.65 ± 0.22 mg GAE/g olduğu belirlenmiştir. Fenolik içeriğin flavonoid içeriğinden yaklaşık iki kat fazla olması (13.84 mg GAE/g'a karşı 7.65 mg GAE/g), bitkide flavonoidlerin yanı sıra diğer fenolik bileşik sınıflarının da önemli miktarda bulunduğunu göstermektedir. Antioksidan kapasite testlerinde FRAP değeri 10.98 ± 0.22 µmol Fe²⁺/g ve CUPRAC değeri 0.11 ± 0.01 mmol TEAC/g kuru ağırlık olarak tespit edilmiştir, bu da bitkinin çeşitli redoks sistemleri üzerinde etkili bileşikler içerdiğini doğrulamaktadır.

Tablo 4. *Glaucium flavum Crantz* Ekstraktlarının Antioksidan Özellikleri, Toplam Fenolik İçeriği, Toplam Flavonoid İçeriği ve Antioksidan Kapasite (FRAP ve CUPRAC) Sonuçları

Takson	Toplam fenolik içerik (mg GAE/g kuru örnek)	Toplam flavonoid içerik (mg QE/g kuru örnek)	Frap (µmol FeSO ₄ .7H ₂ O /g örnek)	Cuprac (mmol TEAC/g örnek)
Örnek	13.84 ± 0.46	7.65 ± 0.22	10.98 ± 0.22	0.11 ± 0.01

Literatürdeki diğer *Glaucium* türleriyle karşılaştırıldığında, *G. flavum Crantz*'in *G. grandiflorum* var. *grandiflorum*'dan toplam fenolik içerik bakımından yaklaşık dört kat (13.84 mg GAE/g'a karşı 3.54 mg GAE/g), flavonoid içeriği bakımından yaklaşık 2.5 kat (7.65 mg GAE/g'a karşı 3.15 mg CE/g) daha zengin olduğu görülmektedir [101]. Ayrıca, *G. acutidentatum* (toplam fenolik: 0.70 mg GAE/g; toplam flavonoid: 1.84 mg CE/g) ve *G. corniculatum* (toplam fenolik: 0.80 mg GAE/g; toplam flavonoid: 1.63 mg CE/g) türlerinden de belirgin şekilde daha yüksek antioksidan bileşen içeriğine sahiptir [102]. Bu bulgular, *Glaucium flavum Crantz*'in oksidatif stres kaynaklı hastalıklara karşı koruyucu potansiyele sahip olduğunu ve farmasötik uygulamalarda değerli bir kaynak olabileceğini göstermektedir. İleriki çalışmalarda, bu aktiviteden

sorumlu bileşiklerin izolasyonu ve in vivo etkinliklerinin değerlendirilmesi, bitkinin terapötik değerini daha da belirginleştirecektir.

SONUÇ

Bu çalışmada, *Glaucium flavum Crantz*'ın toprak üstü kısımlarının fitokimyasal kompozisyonu ve antioksidan potansiyeli kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. HPLC-DAD ve SPME-GC-MS analizleri sonucunda, bitkide zengin bir biyoaktif bileşik profili tespit edilmiştir. Uçucu bileşikler arasında benzaldehit (%37.47) ve 1-hekzanal-2-etil (%33.87) ana bileşenler olarak öne çıkarken, sülkaton (%4.29), tetrametilpirazin (%0.63) ve karvakrol (%0.52) gibi biyolojik aktivite potansiyeline sahip diğer bileşikler de saptanmıştır. Fenolik bileşikler açısından değerlendirildiğinde, pirogallol (3089.23 mg/kg), kafeik asit (384.06 mg/kg), klorojenik asit (229.44 mg/kg) ve gallik asit (200.32 mg/kg) önemli miktarlarda tespit edilmiştir. Flavonoidler arasında ise rutin (16000 mg/kg) ve kateşin (649.58 mg/kg) dikkat çekici şekilde yüksek konsantrasyonlarda bulunmuştur. Bitkinin C vitamini içeriğinin de oldukça yüksek (1078.17 mg/kg) olduğu belirlenmiştir. Toplam fenolik içerik (13.84±0.46 mg GAE/g), toplam flavonoid içeriğinden (7.65±0.22 mg QE/g) yaklaşık iki kat daha yüksek bulunurken, FRAP (10.98±0.22 µmol Fe²⁺/g) ve CUPRAC (0.11±0.01 mmol TEAC/g) testleri bitkinin güçlü bir antioksidan potansiyele sahip olduğunu doğrulamıştır. Elde edilen sonuçlar, *Glaucium flavum Crantz*'ın bitkisinin içerdiği yüksek miktardaki rutin, pirogallol ve askorbik asit gibi biyoaktif bileşiklerin varlığı nedeniyle önemli bir antioksidan, antimikrobiyal ve antiinflamatuvar etki potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, *Glaucium flavum Crantz*'ın modern farmakolojik araştırmalarda değerli bir kaynak olarak kullanılabileceğini ve terapötik ajanların geliştirilmesinde potansiyel bir bitki olduğunu ortaya koymaktadır. Gelecekte yapılacak in vitro ve in vivo çalışmalarla bu bitkiden elde edilecek ekstraktların ve izole edilmiş bileşiklerin biyolojik aktivitelerinin değerlendirilmesi, tıbbi potansiyelinin tam olarak anlaşılmasına ve yeni tedavi yaklaşımlarının geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] N. Kumar, V. Pruthi Potential applications of ferulic acid from natural sources Biotechnology Reports, 4 (2014), pp. 86-93
- [2] K.H. Kwon, A. Barve, S. Yu, M.T. Huang, A.N. Kong Cancer chemoprevention by phytochemicals: potential molecular targets, biomarkers and animal models Acta Pharmacologica Sinica, 28 (2007), pp. 1409-1421
- [3] Moore, M. Yousef, E. Tsiani Anticancer effects of rosemary (Rosmarinus officinalis L.) extract and rosemary extract polyphenols Nutrients, 8 (2016)
- [4] Trivellini, M. Lucchesini, R. Maggini, H. Mosadegh, T.S.S. Villamarin, P. Vernieri, A. Mensuali Sodi, A. Pardossi Lamiaceae phenols as multifaceted compounds: bioactivity, industrial prospects and role of positive-stress Industrial Crops and Products, 83 (2016), pp. 241-254
- [5] Y. Sakihama, M.F. Cohen, S.C. Grace, H. Yama saki Plant phenolic antioxidant and prooxidant activities: phenolics-induced oxidative damage mediated by metals in plants Toxicology, 177 (2002), pp. 67-80
- [6] W. Watjen, G. Michels, B. Steffan, P. Niering, Y. Chovolou, A. Kampkotter, Q.H. TranThi, P. Proksch, R. Kahl Low concentrations of flavonoids are protective in rat H4IIE cells whereas high concentrations cause DNA damage and apoptosis The Journal of Nutrition, 135 (2005), pp. 525-531
- [7] Ajila, C. M.; Brar, S. K.; Verma, M.; Tyagi, R. D.; Godbout, S.; Valéro, J. R. Extraction and Analysis of Polyphenols: Recent Trends. Crit. Rev. Biotechnol. 2011, 31 (3), 227-249.
- [8] Bravo, L. Polyphenols: Chemistry, Dietary Sources, Metabolism, and Nutritional Significance. Nutrit. Rev. 1998, 56, 317-333.
- [9] Carvalho, L. M.; Martini, M.; Moreira, A. P. L.; de Lima, A. P.; Correia, D.; Falcão, T.; Garcia, S. C.; de Baires, A. V.; do Nascimento, P. C.; Bohrer, D. Presence of Synthetic Pharmaceuticals as Adulterants in Slimming Phytotherapeutic Formulations and Their Analytical Determination. Forensic Sci. Int. 2010, 204, 6-11.
- [10] Carvalho, L. M. de; Moreira, A. P.; Martini, M.; Falcão, T. The Illegal Use of Synthetic Pharmaceuticals in Herbal Formulations: An Overview on the Adulteration Practice and Analytical Investigations. Forensic Sci. Rev. 2011, 23, 73-90.
- [11] Krishnaiah, D.; Sarbatly, R.; Nithyanandam, R. A Review of the Antioxidant Potential of Medicinal Plant Species. Food Bioprod. Process. 2011, 89, 217-233.
- [12] Maciel, M. A. M.; Pinto, A. C.; Veiga Jr., V. F.; Grynberg, N. F.; Echevarria, A. Plantas Mediciniais: A Necessidade de Estudos Multidisciplinares. Quím. Nova 2002, 25 (3), 429-438.
- [13] Balasundra, N.; Sundram, K.; Samman, S. 2006. Phenolic Compounds in Plants and Agro-industrial By-products: Antioxidant Activity, Occurrence, and Potential Uses. Food Chem. 2006, 99, 191-203.
- [14] Stalikas, C. D. Extraction, Separation, and Detection Methods for Phenolic Acids and Flavonoids. J. Sep. Sci. 2007, 30, 3268-3295.
- [15] Casella, I. G.; Colonna, C.; Contursi, M. Electroanalytical Determination of Some Phenolic Acids by High-performance Liquid Chromatography at Gold Electrodes. Electroanalysis 2007, 19 (14), 1503-1508.
- [16] Gotti, R. Capillary Electrophoresis of Phytochemical Substances in Herbal Drugs and

- Medicinal Plants. J. Pharm. Biomed. Anal. 2011, 55, 775–801
- [17] Argyropoulos, D., Müller, J., 2014. Effect of convective-, vacuum- and freeze drying on sorption behaviour and bioactive compounds of lemon balm (*Melissa officinalis* L.). *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants* 1, 59–69.
- [18] Kumar, V., Chauhan, R.S., Sood, H., Tandon, C., 2015. Cost effective quantification of picrosides in *Picrorhiza kurroa* by employing response surface methodology using HPLC-UV. *Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology* 24, 376–384.
- [19] Kumar, V., Sood, H., Chauhan, R.S., 2016. Optimization of a preparative RP-HPLC method for isolation and purification of picrosides in *Picrorhiza kurroa*. *Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology* 25, 208–214.
- [20] Ray, A., Dutta Gupta, S., Ghosh, S., 2013. Isolation and characterization of potent bioactive fraction with antioxidant and UV absorbing activity from *Aloe barbadensis* Miller gel. *Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology* 22, 483–487.
- [21] Irakli, M.N., Samanidou, V.F., Biliaderis, C.G., Papadoyannis, I.N., 2012. Simultaneous determination of phenolic acids and flavonoids in rice using solid-phase extraction and RP-HPLC with photodiode array detection. *Journal of Separation Science* 35, 1603–1611.
- [22] Shan, B., Cai, Y.Z., Sun, M., Corke, H., 2005. Antioxidant capacity of 26 spice extracts and characterization of their phenolic constituents. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 53, 7749–7759.
- [23] Saito, S.T., Welzel, A., Suyenaga, E.S., Bueno, F., 2006. A method for fast determination of epigallocatechin gallate (EGCG) epicatechin (EC), catechin (C) and caffeine (CAF) in green tea using HPLC. *Food Science and Technology (Campinas)* 26, 394–400.
- [24] Cantalapiedra, A., Gismera, M.J., Sevilla, M.T., Procopio, J.R., 2014. Sensitive and selective determination of phenolic compounds from aromatic plants using an electrochemical detection coupled with HPLC method. *Phytochemical Analysis* 25, 247–254.
- [25] Barrajón-Catalán, E., Fernández-Arroyo, S., Roldán, C., Guillén, E., Saura, D., Segura-Carretero, A., Micol, V., 2011. A systematic study of the polyphenolic composition of aqueous extracts deriving from several *Cistus* genus species: evolutionary relationship. *Phytochemical Analysis* 22, 303–312.
- [26] Harris, C.S., Burt, A.J., Saleem, A., Le, P.M., Martineau, L.C., Haddad, P.S., Bennett, S.A., Arnason, J.T., 2007. A single HPLC-PAD-APCI/MS method for the quantitative comparison of phenolic compounds found in leaf stem, root and fruit extracts of *Vaccinium angustifolium*. *Phytochemical Analysis* 18, 161–169.
- [27] Kalili, K.M., de Villiers, A., 2011. Recent developments in the HPLC separation of phenolic compounds. *Journal of Separation Science* 34, 854–876.
- [28] Ribas-Agusti, A., Gratacos-Cubarsi, M., Sarraga, C., Garcia-Regueiro, J.A., Castellari, M., 2011. Analysis of eleven phenolic compounds including novel p-coumaroyl derivatives in lettuce (*Lactuca sativa* L.) by ultra-high-performance liquid chromatography with photodiode array and mass spectrometry detection. *Phytochemical Analysis* 22, 555–563.
- [29] Rodríguez-Solana, R., Salgado, J.M., Domínguez, J.M., Cortes-Díez, S., 2015. Comparison of Soxhlet, accelerated solvent and supercritical fluid extraction techniques for volatile (GC-MS and GC/FID) and phenolic compounds (HPLC-ESI/MS/MS) from Lamiaceae species. *Phytochemical Analysis* 26, 61–71.
- [30] Stalikas, C.D., 2007. Extraction separation, and detection methods for phenolic acids and flavonoids. *Journal of Separation Science* 30, 3268–3295.
- [31] Rambla, J.L., Trapero-Mozos, A., Diretto, G., Rubio-Moraga, A., Granell, A., Gómez-Gómez, L., Ahrazem, O. Gene-Metabolite Networks of Volatile Metabolism in Airen and Tempranillo Grape Cultivars Revealed a Distinct Mechanism of Aroma Bouquet Production. *Front. Plant Sci.* 2016, 7. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- [32] Zhang, J.; Zhao, J.; Xu, Y.; Liang, J.; Chang, P.; Yan, F.; Li, M.; Liang, Y.; Zou, Z. Genome-Wide Association Mapping for Tomato Volatiles Positively Contributing to Tomato Flavor. *Front. Plant Sci.* 2015, 6, 1–13. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- [33] Slegers, A.; Angers, P.; Ouellet, É.; Truchon, T.; Pedneault, K. Volatile compounds from grape skin, juice and wine from five interspecific hybrid grape cultivars grown in Québec (Canada) for wine production. *Molecules* 2015, 20, 10980–11016. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- [34] Ma, X.-W.; Su, M.-Q.; Wu, H.-X.; Zhou, Y.-G.; Wang, S.-B. Analysis of the Volatile Profile of Core Chinese Mango Germplasm by Headspace Solid-Phase Microextraction Coupled with Gas Chromatography-Mass Spectrometry. *Molecules* 2018, 23, 1480. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- [35] Marsili, R. Flavor, Fragrance, and Odor Analysis, 2nd ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2012. [[Google Scholar](#)]
- [36] Van Nocker, S.; Gardiner, S.E. Breeding better cultivars, faster: applications of new technologies for the rapid deployment of superior horticultural tree crops. *Hortic. Res.* 2014, 1, 14022. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)] [[Green Version](#)]
- [37] Yang, S.; Fresnedo-Ramírez, J.; Wang, M.; Cote, L.; Schweitzer, P.; Barba, P.; Takacs, E.M.; Clark,

- M.; Luby, J.; Manns, D.C.; et al. A next-generation marker genotyping platform (AmpSeq) in heterozygous crops: A case study for marker-assisted selection in grapevine. *Hortic. Res.* **2016**, 3, 16002. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- [38] Chaparro-Torres, L.A.; Bueso, M.C.; Fernández-Trujillo, J.P. Aroma volatiles obtained at harvest by HS-SPME/GC-MS and INDEX/MS-E-nose fingerprint discriminate climacteric behaviour in melon fruit. *J. Sci. Food Agric.* **2016**, 96, 2352–2365. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- [39] Obando-Ulloa, J.M.; Ruiz, J.; Monforte, A.J.; Fernández-Trujillo, J.P. Aroma profile of a collection of near-isogenic lines of melon (*Cucumis melo* L.). *Food Chem.* **2010**, 118, 815–822. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
- [40] Dunemann, F.; Ulrich, D.; Boudichevskaia, A.; Grafe, C.; Weber, W.E. QTL mapping of aroma compounds analysed by headspace solid-phase microextraction gas chromatography in the apple progeny “Discovery” × “Prima”. *Mol. Breed.* **2009**, 23, 501–521. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
- [41] Vogt, J.; Schiller, D.; Ulrich, D.; Schwab, W.; Dunemann, F. Identification of lipoxygenase (LOX) genes putatively involved in fruit flavour formation in apple (*Malus × domestica*). *Tree Genet. Genomes* **2013**, 9, 1493–1511. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
- [42] Battilana, J.; Costantini, L.; Emanuelli, F.; Sevin, F.; Segala, C.; Moser, S.; Velasco, R.; Versini, G.; Grando, M.S. The 1-deoxy-d-xylulose 5-phosphate synthase gene co-localizes with a major QTL affecting monoterpene content in grapevine. *Theor. Appl. Genet.* **2009**, 118, 653–669. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- [43] Doligez, A.; Audiot, E.; Baumes, R.; This, P. QTLs for muscat flavor and monoterpenic odorant content in grapevine (*Vitis vinifera* L.). *Mol. Breed.* **2006**, 18, 109–125. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
- [44] Guillaumie, S.; Ilg, A.; Réty, S.; Brette, M.; Trossat-Magnin, C.; Decroocq, S.; Léon, C.; Keime, C.; Ye, T.; Baltenweck-Guyot, R.; et al. Genetic Analysis of the Biosynthesis of 2-Methoxy-3-Isobutylpyrazine, a Major Grape-Derived Aroma Compound Impacting Wine Quality. *Source Plant Physiol.* **2013**, 162, 604–615. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- [45] Bezman, Y.; Mayer, F.; Takeoka, G.R.; Buttery, R.G.; Ben-oliel, G.; Rabinowitch, H.D.; Naim, M. Differential effects of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) matrix on the volatility of important aroma compounds. *J. Agric. Food Chem.* **2003**, 51, 722–726. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- [46] Vandendriessche, T.; Nicolai, B.M.; Hertog, M.L.A.T.M. Optimization of HS SPME Fast GC-MS for High-Throughput Analysis of Strawberry Aroma. *Food Anal. Methods* **2013**, 6, 512–520. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
- [47] García-Vico, L.; Belaj, A.; Sánchez-Ortiz, A.; Martínez-Rivas, J.M.; Pérez, A.G.; Sanz, C. Volatile Compound Profiling by HS-SPME/GC-MS-FID of a Core Olive Cultivar Collection as a Tool for Aroma Improvement of Virgin Olive Oil. *Molecules* **2017**, 22, 141. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
- [48] Rappé G (1984) The distribution of some lesser known thalassochorous plant species along the Belgian coast, compared with their distribution in Western Europe. *Biol. Jaarb.* 52:35–56
- [49] Solås HF, Stabbetor OE, Nordal I (2007) The viability of a plant “on the edge”: *Glaucium flavum* (Papaveraceae) in Norway. *Nord J Bot* 24:433–444
- [50] Ellstrand NC, Elam DR (1993) Population genetic consequences of small population size: implications for plant conservation. *Ann Rev Ecol Syst* 24:217–242
- [51] Oostermeijer JGB (1996) Population size, genetic variation, and related parameters in small, isolated plant populations: a case study. In: Settele J, Margules C, Poschlod P, Henle K (eds) *Species survival in fragmented landscapes*. The GeoJournal Library 35, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp 61–68
- [52] Young A, Boyle T, Brown T (1996) The population genetic consequences of habitat fragmentation in plants. *Trends Ecol Evol* 11(413):418
- [53] Tawaha K, Alali F, Gharabeh M, Mohammad M, El-Elmat T (2007) Antioxidant activity and total phenolic content of selected Jordanian plant species. *Food Chem* 104:1372–1378
- [54] Arafa AM, Mohamed MES, Eldahmy SI (2016) The aerial parts of yellow horn poppy (*Glaucium flavum* cr.) growing in Egypt: isoquinoline alkaloids and biological activities. *J Pharm Sci Res* 8 (5):323–332
- [55] Bournine L, Bensalem S, Wauters J-N, Iguer-Ouada M, MaizaBenabdesselam F, Bedjou F, Castronovo V, Bellahcene A, Tits M, Frédéric M (2013) Identification and quantification of the main active anticancer alkaloids from the root of *Glaucium flavum*. *Int J Mol Sci* 14:23533–23544
- [56] Safa O, Soltanipoor MA, Rastegar S, Kazemi M, Dehkordi KN, Ghannadi A (2013) An ethnobotanical survey on hormozgan province, Iran. *Avicenna J Phytomed* 3:64–81
- [57] Aytar, E. C. (2024). *Glaucium flavum*-Derived Phytochemical Compounds and Their Molecular Interactions with SIRT1. *ChemistrySelect*, 9(45), e202403811. <https://doi.org/10.1002/slct.202403811>
- [58] Meyer, G. M. J., Meyer, M. R., Wissenbach, D. K., & Maurer, H. H. (2013). Studies on the metabolism and toxicological detection of glaucine, an isoquinoline alkaloid from *Glaucium flavum* (Papaveraceae), in rat urine using GC-MS, LC-MSn and LC-high-resolution MSn. *Journal of Mass*

- Spectrometry, 48(1), 24-41.
<https://doi.org/10.1002/jms.3112>
- [59] Bozkurt, B., Ulkar, D., Nurlu, N., Coban, G., Gumus, Z. P., & Unver-Somer, N. (2024). Variability of Isoquinoline Alkaloid Profiles and Anticholinesterase Activities with Binding-Mode Predictions of *Glaucium flavum* Population. *Chemistry & Biodiversity*, 21(4), e202301865. <https://doi.org/10.1002/cbdv.202301865>
- [60] Bournine L, Bensalem S, Wauters J-N, Iguer-Ouada M, MaizaBenabdesselam F, Bedjou F, Castronovo V, Bellahcène A, Tits M, Frédérick M (2013) Identification and quantification of the main active anticancer alkaloids from the root of *Glaucium flavum*. *Int J Mol Sci* 14:23533–23544
- [61] Boulaaba, M., Kalai, F. Z., Dakhlaoui, S., Ezzine, Y., Selmi, S., Bourgou, S., Smaoui, A., Isoda, H., & Ksouri, R. (2019). Antioxidant, antiproliferative and anti-inflammatory effects of *Glaucium flavum* fractions enriched in phenolic compounds. *Medicinal Chemistry Research*, 28(12), 1995-2001. <https://doi.org/10.1007/s00044-019-02429-y>
- [62] <https://bizimbitkiler.org.tr/yeni/demos/technical/>
- [63] <https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:673167-1>
- [64] Uysal, A., Zengin, G., Durak, Y., & Aktumsek, A. (2016). Investigation of the antioxidant, antimutagenic properties and enzyme inhibition potential of *Centaurea pterocaula* extracts. *Marmara Pharmaceutical Journal*, 20(232-242). DOI: 10.12991/mpj.20162094922
- [65] Akbulut, İ., Gürbüz, E., Rayman Ergün, A., & Baysal, T. (2021). Drying of apricots treated with Ginkgo biloba plant extract and determination of the quality properties. *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*, 7(1), 145-159. DOI: doi.org/10.28979/jarnas.840237.
- [66] Slinkard, K., Singleton, V. L., 1977: Total phenol analysis: automation and comparison with manual methods. *American Journal of Enology and Viticulture*, 28(1), 49-55.
- [67] Zhishen, J., Mengcheng, T., & Jianming, W. (1999). The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. *Food chemistry*, 64(4), 555-559.
- [68] Benzie, I. F., & Szeto, Y. T. (1999). Total antioxidant capacity of teas by the ferric reducing/antioxidant power assay. *Journal of agricultural and food chemistry*, 47(2), 633-636.
- [69] Apak, R., Güçlü, K., Ozyürek, M., Karademir, S.E. (2004). Novel total antioxidant capacity index for dietary polyphenols and vitamins C and E, using their cupric ion reducing capability in the presence of neocuproine: CUPRAC method. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 52(26), 7970-7981. [CrossRef]
- [70] Kumar, A., Varshney, V. K., Rawat, M.S.M., Martinez, J. R., & Stashenko, E. E. (2018). HS-SPME/GC/GC-MS Analysis of Volatile Constituents of *Morina longifolia* Wall. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 21(1), 155-163. DOI: 10.1080/0972060X.2018.1437782
- [71] Chen, L.1,2 and Liao, P. (2025). Current insights into plant volatile organic compound biosynthesis. *Current Opinion in Plant Biology*, 63, 102054. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2025.02.003>
- [72] Achimón, F., Peschiutta, M. L., Brito, V. D., Ulla, S. B., & Pizzolitto, R. P. (2022). Sulcatone as a Plant-Derived Volatile Organic Compound for the Control of the Maize Weevil and Its Associated Phytopathogenic Fungi in Stored Maize. *Plants*, 11(3), 378. <https://doi.org/10.3390/plants11030378>
- [73] Ahmad, A.; Khan, A.; Akhtar, F.; Yousuf, S.; Xess, I.; Khan, L.A.; Manzoor, N. Fungicidal activity of thymol and carvacrol by disrupting ergosterol biosynthesis and membrane integrity against *Candida*. *Eur. J. Clin. Microbiol. Infect Dis*. 2011, 30, 41–50.
- [74]. Dambolena, J.S.; Zygadlo, J.A.; Rubinstein, H.R. Antifumonisin activity of natural phenolic compounds. A structure-property-activity relationship study. *Int. J. Food Microbiol*. 2011, 145, 140–146.
- [75]. Tang, X.; Chen, S.; Wang, L. Purification and identification of carvacrol from the root of *Stellera chamaejasme* and research on its insecticidal activity. *Nat. Prod. Res*. 2011, 25, 320–325.
- [76] Nostro, A.; Papalia, T. Antimicrobial activity of carvacrol: current progress and future perspectives. *Recent. Pat. Antiinfect. Drug Discov*. 2012, 7, 28–35.
- [77] Koparal, A.T.; Zeytinoglu, M. Effects of Carvacrol on a Human Non-Small Cell Lung Cancer (NSCLC) Cell Line, A549. *Cytotechnology* 2003, 43, 149–154.
- [78] Karkabounas, S.; Kostoula, O.K.; Daskalou, T.; Veltsistas, P.; Karamouzis, M.; Zelovitis, I.; Metsios, A.; Lekkas, P.; Evangelou, A.M.; Kotsis, N.; et al. Anticarcinogenic and antiplatelet effects of carvacrol. *Exp. Oncol*. 2006, 28, 121–125.
- [79] Mezzoug, N.; Elhadri, A.; Dallouh, A.; Amkiss, S.; Skali, N.S.; Abrini, J.; Zhiri, A.; Baudoux, D.; Diallo, B.; El Jaziri, M.; et al. Investigation of the mutagenic and antimutagenic effects of *Origanum compactum* essential oil and some of its constituents. *Mutat. Res*. 2007, 629, 100–110.
- [80] Sokmen, A.; Sokmen, M.; Daferera, D.; Polissiou, M.; Candan, F.; Unlu, M.; Akpulat, H.A. The in vitro antioxidant and antimicrobial activities of the essential oil and methanol extracts of *Achillea biebersteini* Afan. (Asteraceae). *Phytother. Res*. 2004, 18, 451–456.
- [81] Jung, M. Y., Bock, J. Y., Back, S. O., Lee, T. K., & Kim, J. H. (1997). Pyrazine contents and oxidative stabilities of roasted soybean oils. *Food Chemistry*, 60(1), 95–102.
- [82] Oddoy, A., Bee, D., Emery, C., & Barer, G. (1991). Effects of ligustrazine on the pressure/flow

- relationship in isolated perfused rat lungs. *European Respiratory Journal*, 4, 1223–1227.
- [83] Sun, Y. W., Jiang, J., Zhang, Z. J., Yu, P., Linda Wang, C. L., Xu, W., et al. (2008). Antioxidative and thrombolytic TMP nitron for treatment of ischemic stroke. *Bioorganic and Medicinal Chemistry*, 16, 8868–8874.
- [84] Zheng, F. M., Ren, Y. Z., & Zhao, T. F. (2005). Preliminary clinical observation on effect of sodium ferulate in treating diabetic nephropathy. *Chinese Journal of Integrated Chinese and Western Medicine*, 25(5), 419–421.
- [85] Aytar, E. C. (2024). *Glaucium flavum*-derived phytochemical compounds and their molecular interactions with SIRT1. *ChemistrySelect*, 9(45), e202403811.
- [86] Halliwell B and Gutteridge JMC: Free radicals in Biology and Medicine. Oxford University Press, Oxford 1999.
- [87] Hollman, P. C. H. (2001). Evidence for health benefits of plant phenols: local or systemic effects *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 81(9), 842-852. <https://doi.org/10.1002/jsfa.900>
- [88] Pyrogallol, in: S. Budavari (Ed.), *The Merck Index*, 12th ed., Merck & Co. Inc., Whitehall, NJ, 1996, pp.1375–1376.
- [89] M.A. Bianco, A. Handaji, H. Savolainen, Quantitative analysis of ellagic acid in hardwood samples, *Sci. Tot. Environ.* 222 (1998) 123–126
- [90] Grodzicka, M.; Pena-Gonzalez, C.E.; Ortega, P.; Michlewska, S.; Lozano, R.; Bryszewska, M.; Mata, F.J.D.I.; Ionov, M. Heterofunctionalized polyphenolic dendrimers decorated with caffeic acid: Synthesis, characterization and antioxidant activity. *Sustain. Mater. Technol.* 2022, 33, e00497. [CrossRef]
- [91] Kfoury, M.; Geagea, C.; Ruellan, S.; Greige-Gerges, H.; Fourmentin, S. Effect of cyclodextrin and cosolvent on the solubility and antioxidant activity of caffeic acid. *Food Chem.* 2019, 278, 163–169. [CrossRef]
- [92] Raviadarani, R.; Ng, M.H.; Chandran, D.; Ooi, K.K.; Manickam, S. Stable W/O/W multiple nanoemulsion encapsulating natural tocotrienols and caffeic acid with cisplatin synergistically treated cancer cell lines (A549 and HEP G2), and reduced toxicity on normal cell line (HEK 293). *Mater. Sci. Eng. C* 2021, 121, 111808. [CrossRef] [PubMed]
- [93]. Tabakam, G.T.; Kodama, T.; Donfack, A.R.N.; Nguekeu, Y.M.M.; Nomin-Erdene, B.; Htoo, Z.P.; Do, K.M.; Ngouela, S.A.; Tene, M.; Morita, H.; et al. A new caffeic acid ester and a new ceramide from the roots of *Eriosema glomeratum*. *Phytochem. Lett.* 2021, 45, 82–87. [CrossRef]
- [94] Salsabila, R.; Perdani, M.S.; Kitakawa, N.S.; Hermansyah, H. Production of methyl caffeate as an intermediate product to produce caffeic acid phenethyl ester by esterification using cation-exchange resin. *Energy Rep.* 2020, 6, 528–533. [CrossRef]
- [95] Mirzaei, S.; Gholami, M.H.; Zabolian, A.; Saleki, H.; Farahani, M.V.; Hamzehlou, S.; Bakhtiari Far, F.; Sharifzadeh, S.O.; Samarghandian, S.; Khan, H.; et al. Caffeic acid and its derivatives as potential modulators of oncogenic molecular pathways: New hope in the fight against cancer. *Pharmacol. Res.* 2021, 171, 105759. [CrossRef]
- [96] Mauludin, R., Müller, R. H., & Keck, C. M. (2009). Development of an oral rutin nanocrystal formulation. *International Journal of Pharmaceutics*, 370(1–2), 202–209.
- [97] Panasiak, W., Wleklik, M., Oraczewska, A., & Luczak, M. (1989). Influence of flavonoids on combined experimental infections with EMC virus and *Staphylococcus aureus* in mice. *Acta Microbiologica Polonica*, 38(2), 185–188.
- [98] Koçancı, F.G., Hamamcioglu, B., & Aslim, B. (2017). Neuroprotective Effects of Rutin and Quercetin Flavonoids in *Glaucium corniculatum* Methanol and Water Extracts. *International Journal of Secondary Metabolite*, 4(3), 85-93. <https://doi.org/10.21448/ijsm.363347>
- [99] Özcanlı, A., Mohammed, F.S., Sevindik, M., Aykurt, C., Selamoğlu, Z., & Akgül, H. (2024). Phenolic composition, total antioxidant, antiradical and antimicrobial potential of endemic *Glaucium Alakirensis*. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 42(1), 42-48. <https://doi.org/10.14744/sigma.2024.00006>
- [100] Boulaaba, M., Zar Kalai, F., Dakhlaoui, S., Ezzine, Y., Selmi, S., Bourgou, S., Smaoui, A., Isoda, H., & Ksouri, R. (2019). Antioxidant, antiproliferative and anti-inflammatory effects of *Glaucium flavum* fractions enriched in phenolic compounds. *Medicinal Chemistry Research*, 28, 1995-2001. <https://doi.org/10.1007/s00044-019-02429-y>
- [101] Özsoy, N., Yilmaz-Ozden, T., Aksoy-Sagırlı, P., Şahin, H., & Sari, A. (2018). Antioxidant, Anti-acetylcholinesterase, Anti-inflammatory and DNA Protection Activities of *Glaucium grandiflorum* var. *grandiflorum*. *Iranian Journal of Pharmaceutical Research*, 17(2), 677-684.
- [102] Kocanci, F. G., Hamamcioglu, B., & Aslim, B. (2017). The anti-AChE and anti-proliferative Activities of *Glaucium acutidentatum* and *Glaucium corniculatum* Alkaloid Extracts. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 7(08), 191-200. DOI: 10.7324/JAPS.2017.70826

MR Altyazılama için Çoklu Dikkat Tabanlı Derin Öğrenme Modeli

Burkay MARAŞ¹, Serhat KARATORAK¹, Kevser ÖZDEM KARACA¹, A. Orkun GEDİK², M. Ali AKCAYOL¹

¹ Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye

² KoçSistem A.Ş., İstanbul, Türkiye

✉: kevserozdem@gazi.edu.tr ¹[0009-0004-2967-0486](https://orcid.org/0009-0004-2967-0486) ²[0009-0001-3586-7056](https://orcid.org/0009-0001-3586-7056) ³[0000-0002-6695-200X](https://orcid.org/0000-0002-6695-200X)
⁴[0009-0004-2623-8073](https://orcid.org/0009-0004-2623-8073) ⁵[0000-0002-6615-1237](https://orcid.org/0000-0002-6615-1237)

Geliş (Received): 14.08.2024

Düzeltilme (Revision): 21.09.2024

Kabul (Accepted): 09.10.2024

ÖZ

Son yıllarda sağlık alanında yapay zeka teknolojilerinin kullanımı hızla artmaya başlamıştır. Manyetik rezonans (MR) raporlarının manuel olarak tıp hekimleri tarafından oluşturulması oldukça zor, uzun zaman alan ve hatalı olma olasılığı yüksek bir süreçtir. Bu çalışmada, bu problemleri adreslemek amacıyla beyin MR görüntülerinden otomatik rapor üretecek derin öğrenme tabanlı görüntü altyazılama modeli önerilmiştir. Geliştirilen modelde, görüntü işleme, doğal dil işleme ve derin öğrenme yöntemleri birlikte kullanılarak tıbbi görüntüdeki içerik ve tanımlara yönelik metin üretilmektedir. Öncelikle MR görüntüleri için, rastgele açılarla döndürme, boyut değiştirme, kırpma, parlaklık ve kontrast değiştirme, gölge ekleme ve aynalama gibi ön işlemler yapılmıştır. Ardından Bootstrapping Language Image Pre-Training (BLIP) modeli ve modelin transformer mimarisinden faydalanılarak rapor üreten bir model geliştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalarda, geliştirilen modelin farklı metrikler için başarılı sonuçlar verdiği, üretilen raporların orijinal raporlara yüksek oranda benzer olduğu ve tıp alanında yardımcı öneri sistemi olarak kullanılabileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: MR, BLIP, Derin Öğrenme, Görüntü Altyazılama, Transformer.

Multiple Attention-Based Deep Learning Model for MRI Captioning

ABSTRACT

In recent years, the use of artificial intelligence in medicine has begun to increase considerably. Creating magnetic resonance (MR) reports manually by medical doctors is very difficult, time-consuming, and error-prone process. This study proposes a deep learning-based image captioning model to automatically generate reports. In the developed model, image processing, natural language processing, and deep learning methods are used to produce text for the medical image. First of all, pre-processing, such as rotating at random angles, changing size, cropping, changing brightness and contrast, adding shadows, and mirroring, were performed for MR images. Then, a model was developed by utilizing the Bootstrapping Language Image Pre-Training (BLIP) model and the transformer architecture of the model to generate a report. The experimental studies showed that the proposed model had successful results; the produced reports were highly similar to the original reports and could be used as a tool in medicine.

Keywords: Brain MRI, BLIP, Deep Learning, Medical Image Captioning, Transformer.

GİRİŞ

Tıbbi görüntü altyazılama, medikal görüntülerden derin öğrenme ve doğal dil işleme teknikleri kullanılarak otomatik olarak rapor üretilmesini ifade etmektedir. Bu konuda yapılan çalışmalar ve araştırmalarda, görüntülerden üretilen bu metinlerin anlamlı cümlelerden oluşması ve tıbbi teşhis ve tedavi süreçlerinde faydalı olması amaçlanmaktadır. Beyin MR görüntülerinden üretilen raporlar, nörolojik anormalliklerin otomatik olarak tespit edilmesi ve bu tespitlerin doğal dilde ifade edilmesi sürecine yardımcı olmaktadır. Bu nedenle, MR görüntülerinden rapor üretmeye yönelik çalışmalar son yıllarda artarak devam etmektedir [1].

Paspula ve Saravanan tarafından 2023 yılında yayınlanan çalışmada, tıbbi görüntü altyazılama üzerinde

çalışılmıştır [1]. Çalışmada vücudun farklı bölgelerine ait 21 kategoride 7.442 adet tıbbi görüntü içeren Pathology Education Informational Resource (PEIR) veri kümesi kullanılmıştır. Çalışmada bölgelerin tespiti için önceden eğitilmiş olan You Only Live Once v4 (YOLOv4) modeli kullanılarak ince ayar (fine tuning) yapılmıştır. Model, birinci aşamada nesne tespiti ve lokalizasyon, ikinci aşamada ise Long-Short Term Memory (LSTM) birimleri ve dikkat mekanizması ile dil bilgisine uygun cümle üretimi sağlanmıştır. Yapılan değerlendirmeler sonucu modelin Bilingual Evaluation Understudy (BLEU) skoru %81,78, Metric for Evaluation of Translation with Explicit Ordering (METEOR) skoru ise %78,56 olarak elde ettiği görülmüştür.

Wang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada radyoloji görüntülerinden otomatik rapor üretme amaçlanmıştır

[3]. COVID-19 CT Report ve Indiana University chest X-Ray veri kümelerinden faydalanılmıştır. Resnet101 modelinden ve Recurrent Neural Network (RNN) mimarilerinden yararlanılarak üretilen raporlarda, diğer çalışmalardan farklı olarak raporların benzerliğinin ölçülmesi için Sentence Matched Adjusted Semantic Similarity (SMAS) teknolojisi kullanılmıştır. Raporlar vücudun çeşitli bölgeleri için başarılı çıktılar vermiştir. BLEU, METEOR ve ROUGE-L gibi başarı metriklerinde de literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırıldığında başarılı sonuçlara ulaşılmıştır.

William ve arkadaşları tarafından 2020 yılında yayınlanan çalışmada ise yine göğüs X-ray görüntülerinden rapor üretmek amacıyla derin öğrenme mimarilerinden yararlanılmıştır [4]. Çalışmada eğitim ve test işlemleri için MIMIC Chest X-ray (MIMIC-CXR) veri kümesi kullanılmıştır. CNN-RNN mimarileri kullanılan çalışmada, özelliklerin çıkarımı için DenseNet121 modelinden faydalanılmıştır. Projele Beam Search algoritmasının da aktif kullanıldığı çalışmada BLEU ve Consensus-based Image Description Evaluation (CIDEr) performans metrikleri aracılığıyla diğer çalışmalarla kapsamlı bir kıyaslama yapılmıştır.

Liu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, geleneksel rapor üretimi algoritmalarının üzerine eklenen Contrastive Attention (Karşılaştırmalı Dikkat) isimli bir mekanizmadan bahsedilmiştir [5]. Bu mekanizma kısaca giriş görüntüsünü almakta ve referans görüntüsü üzerinden karşılaştırma yapmaktadır. Referans görüntüsü, normal yani sağlıklı bir kişinin X-ray görüntüsünü temsil etmektedir. 2 görüntünün karşılaştırılmasıyla birlikte giriş görüntüsü üzerinden anomali içeren bölge tespit edilmekte ve mevcut rapor bu şekilde güncellenmektedir. Bu mekanizma temelde 3 aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada normal görüntüler eğitim verisi üzerinden ayıklanarak elde edilmektedir. Daha sonra Aggregate Attention (Toplu Dikkat) mekanizmasıyla giriş görüntüsüne yakın olan normal görüntüler belirlenmektedir. Son aşamada ise Differentiate Attention (Dikkat Farklılaştırma) ile 2 görüntü arasındaki benzerlikler çıkartılmakta ve geriye sadece farklı olan kısım kalmaktadır. Elde edilen bu bölge anomali içeren bölgeyi temsil etmektedir. IU-X-ray ve MIMIC-CXR veri kümeleri üzerinde test edilen bu mekanizmayla birlikte BLEU-4 metriği için %14 ve %17 performans artışı elde edilmiştir.

Lovelace ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, mevcut rapor üretimlerine ek olarak transformer mimarisi kullanılarak üretilen raporların önceki bahsedilen yöntemlere göre daha akıcı ve tutarlı olması sağlanmıştır [6]. Model performansının artırılması amacıyla da görüntüdeki bilgilerin diferansiyel olarak elde edilmesi sağlanmıştır.

Encoder-decoder (kodlayıcı-kod çözücü) mimarisiyle üretilen raporlar düzgün bir rapor çıktısı verse de bu mimaride bazı problemler ortaya çıkmaktadır. İlk olarak görüntüdeki anomali içeren bölgeler görüntünün sadece küçük bir bölümünü kapsamaktadır ve encoder-decoder mimarisi bu kısma yeterince dikkat edememektedir. Bu sebeple bu mimari, anomali içeren bölgelerin tespitinde

başarısız olabilmektedir. Mimarinin diğer bir problemi ise uzman bilgisini modele dahil edememesidir. Bu nedenle de bu mimari üzerinden üretilen araçlar kliniklerde yaygın olarak kullanılamamaktadır.

Bu problemlerin çözülebilmesi için Yang ve arkadaşlarının çalışmasında ele alınan yaklaşım, bilgiyi modele dahil etmek amacıyla genel ve spesifik olmak üzere 2 ayrı kategoriye ayırmaktadır [7]. Genel bilgi tüm görüntünün geneliyle ilgilenirken spesifik bilgi ise görüntüye benzer farklı bir görüntü üzerinden terminolojideki terimleri kapsamaktadır. Bu iki bilginin de aynı anda kullanılması adına bilgiyle geliştirilmiş çok kafalı dikkat (knowledge-enhanced multi-head attention) mekanizması geliştirilmiştir. Bu mekanizma 2 ayrı bilgiyi birleştirmektedir. Mekanizma IU-Xray ve MIMIC-CXR veri kümeleri üzerinde test edilmiştir. Sonuç olarak, örnek bir çıktıda 3 adet rapor bilgisi elde edilirken bu mekanizma sayesinde 5 farklı bilgi de elde edilmiştir.

Önceki çalışmalarda bahsedilen, mevcut görüntü altyazılamaya modellerinin üzerine eklenen bilgiyle geliştirilmiş çok kafalı dikkat mekanizması sayesinde daha anlamlı ve uzun medikal çıktılar üretilmiştir. Fakat bu modellerdeki en büyük problem, başka hastalıkların tespiti söz konusu olduğunda dikkat mekanizmasının el ile güncellenmesini gerektirmesidir. Yang ve arkadaşlarının diğer çalışmasında, bu problem aşılmaaya çalışılarak bu sürecin otomatik olarak öğrenilip hafızada saklanması sağlanmıştır. Çalışmada temel olarak 2 aşama üzerinde durulmuştur. İlk olarak medikal bilgiyi işleyip hafızada saklayan bilgi güncelleme mekanizmasından (knowledge updating mechanism) bahsedilmiştir. Bu mekanizma sayesinde görüntü üzerindeki anomali içeren bölgelerin bilgisi otomatik olarak eğitim aşamasında güncellenmektedir. Diğer bir aşama ise görüntü, rapor ve hastalık bölgelerinin semantik olarak eşleştirilmesini sağlayan çok modellenli hizalama mekanizmasıdır (multi-model alignment mechanism). Bu model, IU-Xray ve MIMIC-CXR veri kümeleri kullanılarak test edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde BLEU, CIDEr gibi metrikler için önceki çalışmalara göre çok daha başarılı değerler elde edilmiştir.

2020 yılında yayınlanan, göğüs X-ray görüntüleri ve raporlarını içeren bir veri kümesi ile yapılan bir çalışmada, diğer çalışmalardan farklı bir yaklaşım kullanılmıştır [13]. Doğrudan rapor üretmek yerine, patolojik tanıyı tespit edip bunu üretilen rapor ile birleştirerek doğruluk oranları artırılmaya çalışılmıştır. Görüntü altyazılamaya kavramı medikal amaçlı rapor yazılmasında önemli bir gelişme kat etse de mevcut yaklaşımlar, görüntü altyazılamaya algoritmalarını kullanarak medikal görüntüleri girdi olarak alıp rapor çıktısı üretebilmekte fakat bu raporlarda patolojik bilgilerin doğruluğunu dikkate almamaktadır. Bu sebeple, her ne kadar rapor üretilbilse de bu raporların güvenilirliği şüphelidir. Çalışmada bu problemi çözmek adına Semantic Fusion Network (SFNet) isimli, lezyonlu bölgeyi tespit eden ve tanı raporu üreten bir model öne sürülmüştür. Lezyonlu alanı tespit eden model görüntüden görsel ve patolojik bilgi çıkarımı yapmakta,

tanı raporu üretilmesini sağlayan model ise bu 2 bilgiyi birleştirerek raporların üretilmesini sağlamaktadır. Bu şekilde tanı raporlarının doğruluk oranları artırılmıştır. Deneysel sonuçlarda, doğruluk skoru için Ultrason veri kümesinde %1,2'lik, Open-i X-ray görüntü veri kümesinde ise %2,4'lük bir artış gözlemlenmiştir. Ayrıca lezyonlu bölgenin tespit edildiği sınıflandırma modellerinde doğruluk oranları %80,2-96,9 arasında değişmektedir. Karşılaştırılan modeller arasında Attention, NIC, m-RNN, Co-Attention, Faster RCNN+LSTM, SFNet, Attention, NIC, m-RNN modelleri bulunmaktadır [13].

Ankit tarafından 2023 yılında yapılmış çalışmada BLIP modelinden faydalanılmıştır [2]. Veri kümesi olarak Indiana University Chest X-Ray veri kümesi kullanılmıştır. Veriler üzerinde sıkı bir önileme süreci yürütülen çalışmada karşılaştırmalı ve kapsamlı bir çalışma ile BLIP modelinin diğer modellere göre avantaj ve dezavantajları vurgulanmıştır [2].

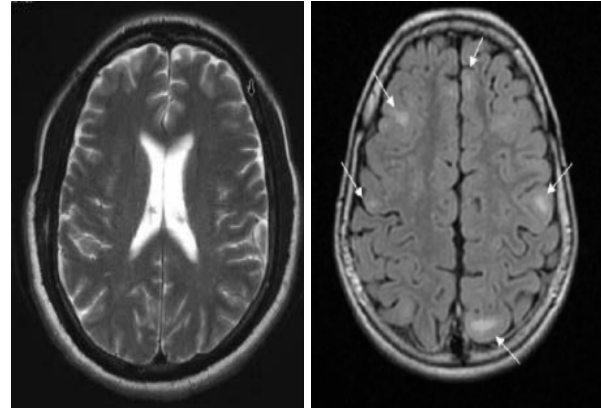
Son yıllarda, görsel-dil ön eğitiminde kaydedilen önemli ilerlemeler, görsel bağlama dayalı dil anlama ve üretme yeteneklerini önemli ölçüde geliştirmiştir. Contrastive Language-Image Pre-training (CLIP) ve A Large-scale Image and Noisy-Text embedding (ALIGN) gibi önde gelen modeller, büyük ölçekli veri kümeleri ve karşıt öğrenme tekniklerinden yararlanarak, görüntü-metni alma ve sıfırdan öğrenme gibi görevlerde dikkate değer performanslar elde etmiştir. Ancak, bu modeller, görüntü ve metin gömmelerini hizalamaya odaklanmakta olup, birleşik anlama ve üretme konularına yeterince değinmemektedir. Junnan Li ve arkadaşlarının geliştirdiği BLIP Transformer modeli hem kendi kendine denetimli öğrenmeyi hem de karşıt öğrenmeyi tek bir çerçevede birleştirerek yeni bir yaklaşımı temsil etmektedir. Bu ikili metodoloji, BLIP Transformer'ın her iki öğrenme paradigmasının güçlü yönlerini etkili bir şekilde kullanmasını sağlayarak, çeşitli görsel-dil görevlerinde üstün performans elde etmesine olanak tanımaktadır. Önceki modellerin sıklıkla ayrı ayrı görüntü ve dil bileşenleri için ön eğitim gerektirdiği durumların aksine, BLIP, anlama ve üretme yeteneklerini aynı anda adım adım geliştirmek için bir bootstrapping tekniği kullanmaktadır. Bu kapsamlı ön eğitim stratejisi, model mimarisini basitleştirmenin yanı sıra, görsel soru yanıtlama ve görüntü altyazı oluşturma gibi çeşitli alt görevler için adaptasyonunu da geliştirerek alanda yeni bir standart belirlemektedir [8].

Bu çalışmada, modelin görsel-dil görevlerinde sağladığı üstün performans ve esneklikten dolayı BLIP Transformer tercih edilmiştir. Beyin MR görüntülerinden rapor üretme gibi karmaşık ve yüksek doğruluk gerektiren bir görevde, BLIP Transformer'ın birleşik anlama ve üretme yetenekleri büyük bir avantaj sağlamaktadır. BLIP'in bootstrap (yeniden örnekleme) tekniği, modelin beyin MR görüntülerini doğru bir şekilde anlamasını ve bu görüntülerden anlamlı açıklamalar üretmesini mümkün kılmaktadır. Böylece, tıbbi görüntüleme alanında daha etkili ve güvenilir çözümler geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Literatürde BLIP modelini tıbbi görüntü altyazılamaya

amacıyla kullanan mevcut çalışmalar bulunmakla birlikte, bu çalışmalar daha çok X-ray görüntüleri üzerinde yoğunlaşmaktadır. Görüntü altyazılamaya problemine yönelik yeterli miktarda MR görüntüsü bulunduran veri kümelerine erişim zorluğundan dolayı çalışmaların bu şekilde şekillendiği düşünülmektedir. Bu çalışmada, literatürde farklı veri kümeleri üzerinde başarılı bir şekilde uygulanmış BLIP modeli beyin MR görüntülerini altyazılamaya için kullanılmıştır.

MR ALTYAZILAMA

Beyin manyetik rezonans görüntüleme teknikleri, nörolojik hastalıkların tanısında ve tedavisinde hayati bir rol oynamaktadır. Beyin MR görüntüleri, beyin dokularının detaylı ve yüksek çözünürlüklü görüntülerini sunarak, çeşitli nörolojik durumların ve anormalliklerin tespit edilmesini sağlar. Sağlıklı ve tümörlü örnek MR görüntüleri Şekil 1'de sunulmuştur. Ancak, bu görüntülerin analiz edilmesi ve anlamlı raporlar üretilmesi, uzman radyologlar tarafından yapılan zaman alıcı ve karmaşık bir süreçtir. Radyologlar, her bir görüntüyü dikkatlice inceleyerek, bulguları detaylı bir şekilde raporlamalıdır. Bu süreç, insan hatalarına açık olup radyologların iş yükünü önemli ölçüde artırmaktadır.



Şekil 1. Örnek MR Görüntüleri

Bu sorunlar göz önünde bulundurulduğunda beyin MR görüntülerinden otomatik rapor üretme sistemlerinin geliştirilmesi büyük bir ihtiyaç haline gelmiştir. Otomatik rapor üretme, görüntülerin hızlı ve doğru bir şekilde analiz edilmesini sağlayarak teşhis sürecini hızlandırabilir ve radyologların iş yükünü azaltabilir. Ancak, görüntülerin karmaşıklığı ve çeşitli nörolojik durumların yüksek bir doğruluk ile tanımlanma gerekliliği bu alanda karşılaşılan zorluklardır.

Bu çalışmanın temel motivasyonu, beyin MR görüntülerinden otomatik rapor üretme sistemlerinin sağlık hizmetlerinde yaratabileceği potansiyel faydalara dayanmaktadır. İlk olarak, otomatik rapor üretme sistemleri, radyologların iş yükünü önemli ölçüde azaltarak zaman ve iş gücü tasarrufu sağlar. Radyologlar, her bir MR görüntüsünü manuel olarak analiz etmek yerine otomatik sistemler sayesinde daha fazla hastaya

hizmet verebilir. Bu durum, sağlık hizmetlerinin daha verimli bir şekilde sunulmasına katkıda bulunur ve hastaların daha hızlı teşhis ve tedavi almasını sağlar. İkinci olarak, bu sistemler insan hatalarını minimize ederek tanı süreçlerinin doğruluğunu artırır. Manuel raporlama süreçleri, radyologların dikkat ve konsantrasyon seviyesine bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Buna bağlı olarak bu süreçte hata yapma olasılığı da yüksektir. Otomatik sistemler, algoritmaların tutarlılığı sayesinde standart ve doğru raporlar üreterek yanlış teşhislerin önüne geçebilir. Bu, hastaların doğru tedaviye yönlendirilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir.

Üçüncü olarak, otomatik rapor üretme sistemleri klinik karar destek araçları olarak büyük bir potansiyele sahiptir. Tıp hekimleri, bu sistemler sayesinde karmaşık ve çok sayıda görüntüyü hızlı bir şekilde analiz edebilir ve daha bilinçli kararlar alabilir. Otomatik olarak üretilen raporlar, tıp hekimlerinin teşhis sürecinde ek bir bilgi kaynağı olarak kullanılabileceği değerli bir katkı sağlar.

Son olarak, bu tür sistemler tıbbi araştırma ve eğitim alanlarında da önemli avantajlar sunar. Araştırmacılar, geniş veri kümelerini hızlı bir şekilde analiz ederek araştırma süreçlerini hızlandırabilir. Aynı zamanda, tıbbi eğitimde otomatik rapor üretme sistemleri, öğrencilere pratik yapma ve gerçek veriler üzerinden öğrenme imkanı sunarak eğitim materyallerini zenginleştirir.

Bu nedenlerle, beyin MR görüntülerinden otomatik rapor üretme çalışmaları, sağlık hizmetlerinin kalitesini ve verimliliğini artırma potansiyeline sahip olup hem klinik hem de akademik alanlarda önemli katkılar sunmaktadır.

VERİ KÜMESİ

Bu çalışmada, tıbbi görüntülerin otomatik olarak açıklamalara dönüştürülmesi amacıyla Radiology Objects in Context (ROCO) veri kümesi kullanılmıştır [9]. ROCO, tıbbi görüntülerin ve ilgili açıklamaların geniş bir koleksiyonunu içeren kapsamlı bir veri kümesidir. Veri kümesinde bulunan açıklamalar İngilizce dilindedir.

Çalışmanın odak noktası olan beyin MR görüntülerini elde etmek amacıyla, ROCO veri kümesi içerisinden spesifik olarak beyin MR görüntüleri filtrelenmiş ve kullanılmıştır. Filtreleme işlemi sonucunda toplamda 642 beyin MR görüntüsü elde edilmiştir. Bu görüntüler, çeşitli nörolojik durumları temsil etmekte olup çalışmada kullanılan modellerin eğitim ve değerlendirme süreçlerinde temel veri kaynağı olarak hizmet etmiştir.

Veri kümesindeki her bir beyin MR görüntüsü, ilgili İngilizce açıklamalarla birlikte gelmekte olup, bu açıklamalar doğal dil işleme modelleri için hedef modeller olarak kullanılmıştır. Bu sayede hem görüntü işleme hem de metin oluşturma modelleri, aynı veri kümesi üzerinden ortak bir çalışma alanı bulmuştur.

MR ALTYAZILAMA İÇİN ÇOKLU DİKKAT TABANLI DERİN ÖĞRENME MODELİ

Bu çalışmada, beyin MR görüntülerinden otomatik rapor üretmek amacıyla BLIP modeli kullanılmıştır. BLIP modeli, görüntülerin içeriğini anlamlı metinlere dönüştürmek için derin öğrenme ve doğal dil işleme tekniklerini bir araya getiren bir yaklaşımdır. Modelin temel bileşenleri, görüntü işleme ve metin oluşturma modüllerini içermektedir.

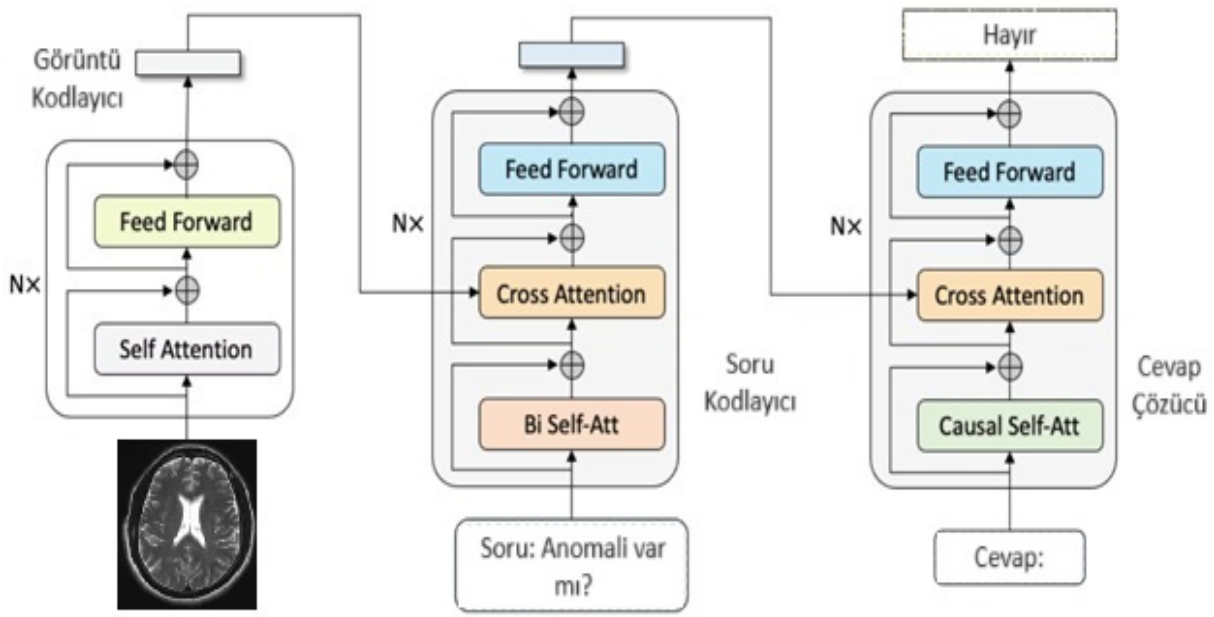
BLIP modeli, iki aşamalı bir ön eğitim sürecinden geçer. İlk aşamada, görüntü-dil temsil öğrenimi, dondurulmuş bir görüntü kodlayıcı (image encoder) kullanılarak gerçekleştirilir. Bu süreçte, görüntülerden çıkarılan özellikler, metinle uyumlu hale getirilir. Bu uyum, görüntülerin içeriği ile ilgili anlamlı metinler üretmeyi amaçlar. İkinci aşamada ise, dil üretme yeteneğine sahip büyük bir dil modeli ile entegrasyon sağlanarak görsel verilerden metin oluşturma işlemi gerçekleştirilir. Dil modeli olarak Bidirectional Encoder Representations from Transformers (BERT) [15] kullanılmaktadır. Bu iki aşama, BLIP modelinin, görüntü ve metin verilerini etkili bir şekilde entegre etmesini sağlamaktadır.

BLIP modelinin mimarisi, özellikle Q-Former adı verilen bir bileşen üzerine kuruludur. Q-Former, görüntü kodlayıcıdan gelen görsel özellikleri işleyerek metin oluşturma sürecine hazır hale getirir. Bu bileşen hem görüntü hem de metin kodlama görevlerini yerine getiren iki ayrı transformer alt modülünden oluşur. Q-Former, görsel özellikleri metinle uyumlu hale getirmek için kendiliğinden dikkat (self-attention) katmanlarını kullanır. Bu katmanlar, metin ve görsel özellikler arasında çapraz dikkat (cross-attention) katmanları aracılığıyla etkileşim kurar.

Modelin eğitimi sırasında, çeşitli kayıp fonksiyonları kullanılarak model optimize edilir. Görüntü-Metin Karşıt Öğrenimi (Image-Text Contrastive Learning) gibi yöntemlerle, görüntü ve metin temsilleri arasındaki uyum en üst düzeye çıkarılır. Ayrıca, Görüntüye Dayalı Metin Üretimi (Image-grounded Text Generation) ve Görüntü-Metin Eşleştirme (Image-Text Matching) gibi görevlerle modelin performansı artırılır.

BLIP modeli, büyük veri kümeleri kullanılarak eğitilmiş ve çeşitli görüntü-dil görevlerinde üstün performans göstermiştir. Modelin başarısı, mevcut yöntemlere kıyasla daha az sayıda parametre ile yüksek performans elde etmesinden kaynaklanmaktadır. Örneğin, BLIP-2 modeli, Flamingo80B modeline kıyasla %8,7 daha yüksek performans göstermiş ve 54 kat daha az eğitilebilir parametre kullanmıştır [10].

BLIP modelinin mimarisi Şekil 2 üzerinde özetlenmiştir. Şema, görüntü kodlayıcı (image encoder), soru kodlayıcı (question encoder), ve cevap çözücü (answer decoder) bileşenlerinden oluşmaktadır. Görüntü kodlayıcı, görüntüden özellikler çıkararak diğer bileşenlere aktarmaktadır. Soru kodlayıcı, çıkarılan özellikleri kullanarak ilgili soruyu kodlamakta ve son olarak cevap çözücü ise bu bilgileri kullanarak anlamlı bir cevap üretmektedir.



Şekil 2. BLIP Modelinin Mimari Şeması.

Şekil 2'de, modelin çeşitli dikkat mekanizmaları ve katmanları arasındaki etkileşimler vurgulanmıştır. Bu yapı, modelin hem görüntü hem de metin verilerini etkili bir şekilde işleyebilmesini sağlamaktadır [11].

Oluşturulan model, tahmin sırasında beam search algoritmasını kullanmaktadır. Beam search, olası tüm cümleleri değerlendirip en iyi sonucu bulmayı hedefleyen kapsamlı bir arama algoritmasıdır. Bu algoritma, her adımda en olası birkaç (beam width) cümle parçasını tutarak arama alanını daraltır ve böylece daha verimli bir şekilde en uygun cümleyi oluşturur. Beam search, modelin daha anlamlı ve doğru cümleler üretmesini sağlar. Bunun sebebi, rastgele seçimler yerine en iyi adayları sistematik bir şekilde değerlendirmesidir. Bu durum, özellikle karmaşık ve çok anlamlı görseller için daha yüksek doğruluk ve kalite sunmaktadır [12].

DENEYSEL SONUÇLAR

Veri Önışleme

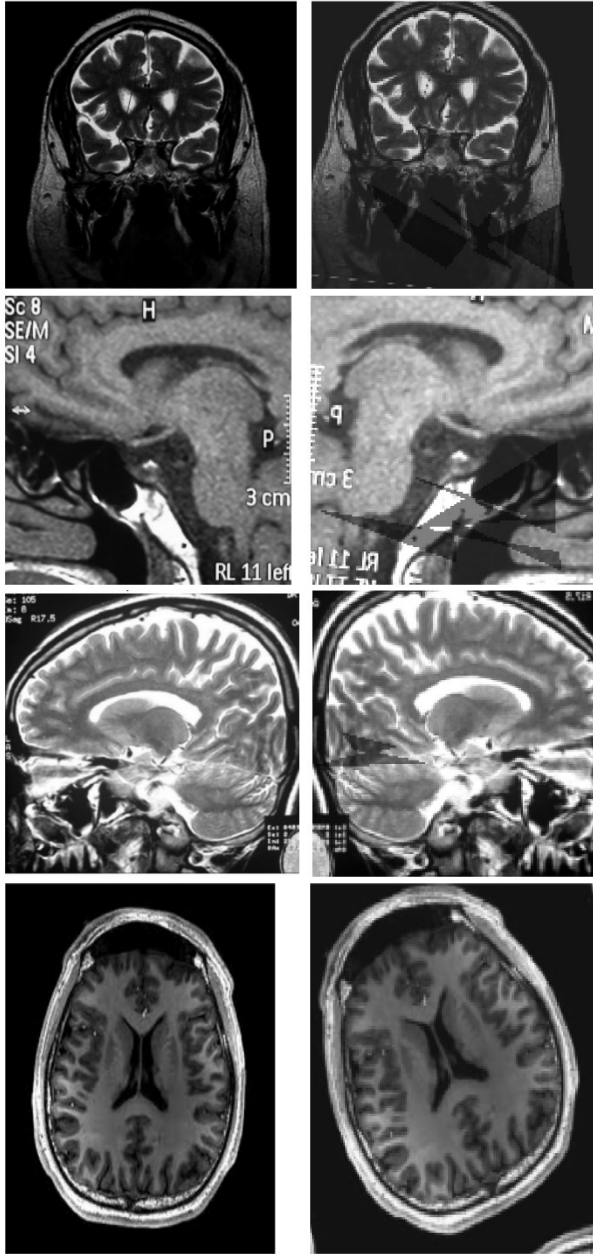
Derin öğrenme modellerinin doğruluk ve verimliliklerini artırmak için büyük miktarda veri kümesine ihtiyaç vardır. Fakat beyin MR görüntüleri ve açıklamalarını içeren büyük miktarda açık kaynaklı eğitim verisi bulunmamaktadır. Bu nedenle veri artırma teknikleri uygulanarak çalışmanın performansı artırılmıştır. Görüntü ve metinlerde ayrı ayrı yöntemler kullanılmıştır. Metin verilerinin artırılmasında *nlpaug* ve *textgenie* kütüphanelerinden; GPT 3.5 ve GPT 4.0 modellerinden faydalanılarak cümle seviyesinde işlem yapılmıştır. Tablo 1'de veri kümesinde bulunan bazı orijinal cümleler ve veri artırma işlemi sırasında bu cümleler kullanılarak oluşturulan yeni cümleler örnek olarak sunulmuştur.

Tablo 1. Metinsel Veri Artırım Örnekleri

Original Metin	Üretilen Metin
MRI of the brain showing no mass or enhancing lesion.	Magnetic Resonance Imaging of the cerebral displaying without lesion or augmenting lesion.
Axial section (T2) showing optic nerve glioma.	Axial slice (T2) displaying optic nerve glioma.
Hemorrhagic infarction of the left temporal lobe	Bleeding stroke of the left temporal lobe
MRI brain showing obliteration of transverse sinus in coronal section	Magnetic Resonance Imaging cerebral displaying obliteration of transverse sinus in coronal slice
Brain MRI (sagittal plane) showing normal size of the pituitary.	Brain Magnetic Resonance Imaging (sagittal plane) displaying normal size of the pituitary.
In the left parasagittal-frontoparietal convexity of brain MRI, a small meningioma (2.1 × 2.0 × 1.4 cm) was newly detected.	A small meningioma (2.1 × 2.0 × 1.4 cm) was newly detected in the left parasagittal-frontoparietal convexity of cerebral MRI.

Görüntü artırma için *opencv* ve *albumations* kütüphanelerinden faydalanılmıştır. Görüntülerin rastgele açılarla döndürülmesi, farklı boyutlarda yeniden ayarlanması ve belirli bölgelerinin kırılması gibi işlemler uygulanmıştır. Bu teknikler, görüntülerin çeşitlendirilmesi ve modelin farklı açılardan gelen verileri öğrenmesi amacıyla kullanılmıştır. Ayrıca, görüntülerin parlaklık ve kontrast seviyelerinin rastgele

değiştirilmesi, bazı görüntülere rastgele gölgeler eklenmesi ve yatay aynalama işlemleri de gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemler, görüntülerin daha çeşitli ve gerçek dünya koşullarına daha yakın hale getirilmesine yardımcı olmuştur. Şekil 3'te veri kümesinde bulunan orijinal görüntülere bahsedilen yöntemler uygulanarak elde edilmiş yeni görüntüler sunulmuştur. Soldaki görüntüler orijinal görüntüler, sağdakiler ise oluşturulan yeni görüntülerdir.



Şekil 3. Görsel Veri Artırma Örnekleri

Bu veri artırma teknikleri, sınırlı miktardaki veri kümesini genişleterek modelin genelleme yeteneğini ve performansını artırmayı hedeflemiştir. Bu sayede, beyin MR görüntülerine dayalı derin öğrenme modellerinin doğruluğu ve verimliliği önemli ölçüde iyileştirilmiştir.

Metrikler

Bu çalışmada, beyin MR görüntülerinden otomatik rapor üretme amacıyla geliştirilen modelin performansı çeşitli metrikler yardımıyla değerlendirilmiştir. Bunun için BLEU, Recall-Oriented Understudy for Gisting Evaluation (ROUGE) ve CIDEr metrikleri kullanılmıştır. BLEU skoru tahmin edilen rapor ile orijinal rapor arasında kelime bazlı kıyaslama yaparak Eşitlik 1'de sunulan formül ile hesaplanan bir değerlendirme kriteridir.

$$BLEU\ Score\ (N) = Brevity\ Penalty \times GAP\ Score \quad (1)$$

Burada $BLEU\ Score\ (N)$, N-gram tabanlı BLEU skorunu; $Brevity\ Penalty$, kısalık cezasını; Geometric Average Precision (GAP) $Score$ ise geometrik ortalama hassasiyeti ifade etmektedir.

Kısalık cezası, üretilen cümlelerin referans cümleden daha kısa olması durumunda uygulanmaktadır. GAP , n-gram doğruluklarının geometrik ortalamasıdır. GAP hesaplaması Eşitlik 2'de verilmiştir.

$$GAP\ (N) = \exp \left(\sum_{n=1}^N w_n \log p_n \right) \quad (2)$$

Bu işlem aynı zamanda Eşitlik 3'teki şekilde de ifade edilebilmektedir.

$$GAP\ (N) = \prod_{n=1}^N p_n^{w_n} \quad (3)$$

Burada N , kullanılan n-gramların sayısını; w_n , n-gramların ağırlıklarını; p_n ise n-gram doğruluklarını ifade etmektedir.

ROUGE, otomatik olarak oluşturulan metinleri değerlendirmek için kullanılan bir ölçüttür. Genellikle bir metin özetlemesi algoritması tarafından oluşturulan özetin kalitesini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Bunun için, makine tarafından oluşturulan bir özet, insan tarafından oluşturulan bir özetle karşılaştırılmaktadır. Bu çalışmada da geliştirilen modelin oluşturduğu rapor ile gerçek raporu karşılaştırmak amacıyla kullanılmıştır. ROUGE ölçümleri, farklı ayrıntı düzeylerine dayalı olarak çeşitli yöntemlerle hesaplanabilir. Literatürde en yaygın kullanılan ve bu çalışmaya dahil edilenler şu şekildedir:

- ROUGE-N, model tarafından oluşturulan metin ile referans metin arasındaki N-gramların (tek gram, çift gram, üç gram vb.) örtüşmesini ifade etmektedir. Literatürde yaygın olarak ROUGE-1 ve ROUGE-2 kullanılmaktadır.
- ROUGE-L, En Uzun Ortak Alt Dizi (Longest Common Subsequence - LCS) algoritması tarafından hesaplanan en uzun ortak kelime dizisini ölçmektedir [14].

CIDEr skoru, genellikle bir referans (doğru veya insan yapımı açıklamalar) kümesi ve modelin ürettiği

açıklamalar arasındaki benzerlikleri hesaplamak için kullanılır. Matematiksel olarak nasıl hesaplandığı Eşitlik 4'te sunulmuştur.

$$CIDEr = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\min(r_l, c_l)}{\max(r_l, c_l)} \times \sum_{n=1}^N \frac{count_c}{count_r} \times TF_c \quad (4)$$

Burada m , değerlendirilen referans cümle sayısını; r_l , referans cümlelerinin uzunluğunu; c_l , üretilen cümlelerin uzunluğunu; $count_c$ üretilen cümledeki n-gram sayısını; $count_r$, referans cümledeki n-gram sayısını; TF_c ise üretilen cümledeki n-gramların Term Frequency (TF) değerini ifade etmektedir.

Örneğin, BLEU skoru (Eşitlik 1) kullanılarak yapılan değerlendirmelerde, modelin referans açıklamalarına olan benzerliği ölçülmüştür. GAP (Eşitlik 2) kullanılarak hesaplanan BLEU skoru, modelin doğruluğunu yansıtan önemli bir metriktir. Dört n-gram kullanılarak yapılan bir hesaplama sonucunda, GAP skorunun (Eşitlik 4) 0,5 olduğu varsayılırsa, bu durumda BLEU skoru, Brevity Penalty ile çarpılarak nihai skoru verir.

CIDEr skoru ise (Eşitlik 5), referans açıklamalar ve model çıktıları arasındaki benzerlikleri detaylı bir şekilde değerlendirir. Bu metrik, referans uzunlukları ve n-gram sayımları gibi faktörleri dikkate alarak daha hassas bir

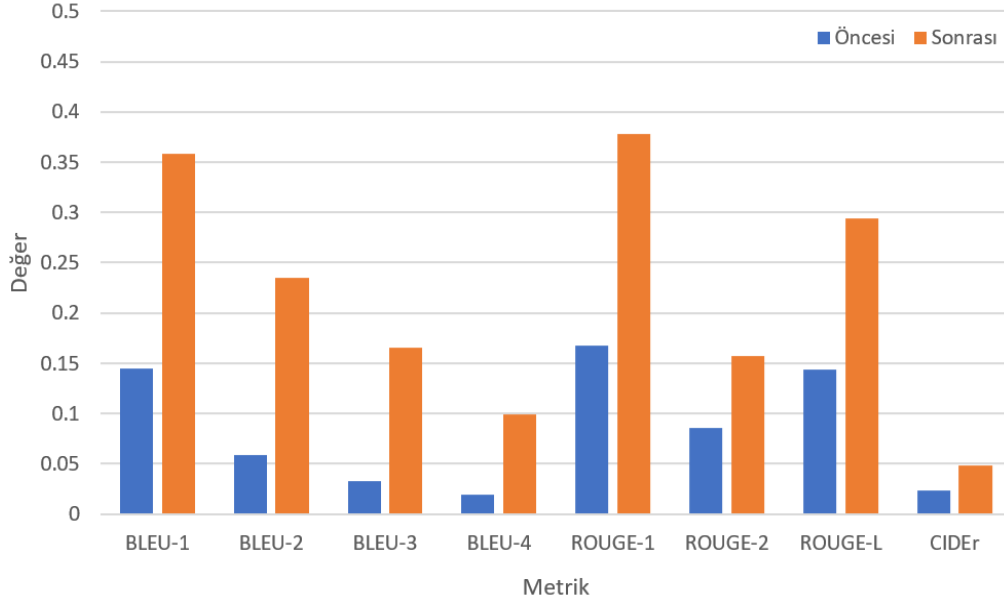
değerlendirme sağlar. Örneğin, CIDEr skorunun 0,8 olduğu bir senaryoda, modelin referans açıklamalarla yüksek bir uyum içinde olduğu söylenebilir.

Bu metriklerin kullanımı, model performansının kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanımakta ve sonuçların daha güvenilir bir şekilde yorumlanmasını sağlamaktadır.

Veri artırımı uygulanmadan önce ve uygulandıktan sonra elde edilen BLEU, ROUGE ve CIDEr skorları Tablo 2'de karşılaştırılmış ve görsel olarak Şekil 4'te sunulmuştur.

Tablo 2. Veri Artırımı İşlemi Öncesi ve Sonrası Sonuçlar

Metrik	Öncesi	Sonrası
BLEU-1	0,1444	0,3584
BLEU-2	0,0582	0,2347
BLEU-3	0,0324	0,1659
BLEU-4	0,0198	0,0990
ROUGE-1	0,1678	0,3779
ROUGE-2	0,0853	0,1576
ROUGE-L	0,1432	0,2943
CIDEr	0,0235	0,0487



Şekil 4. Veri Artırımı İşlemi Öncesi ve Sonrası Sonuçlar

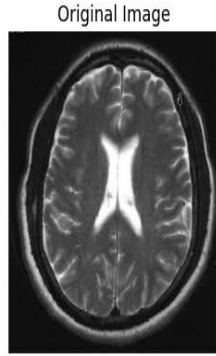
Bu iyileşmeler, modelin beyin MR görüntülerinden anlamlı ve doğru açıklamalar üretme yeteneğini büyük ölçüde artırmıştır.

Şekil 5'te T2 ağırlıklı bir beyin MR görüntüsü üzerinden elde edilen örnek bir çıktı ve model tarafından üretilen açıklama verilmiştir. Bu örnek, modelin beyin MR görüntülerini analiz ederek tam olarak doğru olmasa da anlamlı açıklamalar üretebildiğini göstermektedir.

Şekil 6'da ise Fluid Attenuated Inversion Recovery (FLAIR) ağırlıklı bir beyin MR görüntüsünden elde edilen çıktı gösterilmektedir. Orijinal açıklamada görüntünün FLAIR olduğu belirtilmese de modelin ürettiği çıktıda bunun tespit edildiği görülmektedir.

Şekil 7'de sella turcica olarak adlandırılan bölgenin MR görüntüsü ve çıktıları gösterilmektedir. Orijinal çıktıyla

karşılaştırıldığında oldukça başarılı sonuç elde edilen çıktılardan biri olduğu görülmektedir.



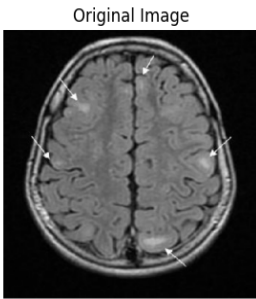
Original Caption:

Brain MRI: T2-weighted axial Magnetic Resonance Imaging of the cerebral displaying without obvious abnormality

Generated Caption:

brain mri : magnetic resonance imaging of the cerebral displaying without lesion or augmenting lesion.

Şekil 5. T2 ağırlıklı lezyonsuz bir beyin MR görüntüsü için bulgular: T2 ağırlıklı aksiyel manyetik rezonans görüntülemeye beyinde belirgin bir anormallik görülmemektedir.



Original Caption:

subcortical MRI: Magnetic Resonance Imaging Brain Brain displaying multiple tubers

Generated Caption:

brain mri : magnetic resonance imaging cerebral t2 axial flair sequence showed hyperintensities in the left thalamus

Şekil 6. FLAIR ağırlıklı bir beyin MR görüntüsü için bulgular: Serebral T2 aksiyel FLAIR dizisi sol talamusta hiperintensiteler göstermektedir. Beynin subkortikal bölümünde çok sayıda tüberkül görülmektedir.



Original Caption:

Brain MRI: Magnetic resonance imaging (MRI) cerebral (sagittal section) displaying empty sella turcica

Generated Caption:

brain mri : magnetic resonance imaging cerebral (coronal section) displaying empty sella

Şekil 7. Sella Turcica boşluğunu gösteren beyin MR görüntüsü için bulgular: Beyin manyetik rezonans görüntüsü serebral (koronal kesit) boş sella turcica'yı göstermektedir.

Veri artırımı ve önileme tekniklerinin uygulanması, modelin performansını belirgin bir şekilde artırmıştır. BLEU ve ROUGE skorlarındaki iyileşmeler, modelin daha doğru ve anlamlı metinler üretebildiğini göstermektedir. CIDEr skorundaki artış ise, modelin metin üretiminde daha tutarlı olduğunu ve insan açıklamalarına daha yakın çıktılar ürettiğini göstermektedir.

Bu sonuçlar, beyin MR görüntülerinden otomatik rapor üretme konusundaki çalışmaların potansiyelini ortaya

koymakta ve gelecekteki çalışmalar için önemli bir referans oluşturmaktadır.

TARTIŞMA

Performans Değerlendirmesi ve Sınırlamalar

Çalışmada elde edilen sonuçlar, ROCO veri kümesi kullanan literatürdeki diğer görüntü altyazılama çalışmaları ile farklı metrikler açısından kıyaslanmıştır. Tablo 3'te ImageCLEF görüntü altyazılama yarışmasına ait takımların farklı metrikler için elde ettikleri sonuçlar

ile aynı metrikler için bu çalışmada elde edilen sonuçlar verilmiştir [16]. Tablo 4'te ise literatürde bulunan farklı altyazılama çalışmalarına ait sonuçlar paylaşılmıştır.

Tablo 4. Literatürde farklı veri kümelerindeki altyazılamalara ait sonuçlar

Veri Kümesi	Model	ROUGE	BLEU-1	BLUE-2	BLEU-3	BLEU-4
MIMIC-CXR	Noise-RNN	0.272	0.269	0.172	0.113	0.074
	1-NN	0.244	0.305	0.171	0.098	0.057
	S&T	0.286	0.318	0.205	0.137	0.093
	SA&T	0.288	0.318	0.205	0.137	0.093
	TieNet	0.307	0.352	0.223	0.153	0.104
Open-I	Noise-RNN	0.291	0.233	0.130	0.087	0.061
	1-NN	0.201	0.232	0.132	0.082	0.018
	S&T	0.306	0.328	0.212	0.157	0.108
	SA&T	0.313	0.328	0.212	0.157	0.108
	TieNet	0.330	0.359	0.246	0.171	0.113
ImageCLEF	BLIP	0.294	0.358	0.234	0.165	0.099

Tablo 3. ImageCLEFmedical Task 2024 sonuçları

Takım	ROUGE	BLEU-1	CIDeR
pclmed	0.2726	0.2689	0.2681
CS_Morgaan	0.2508	0.2092	0.2450
DarkCow	0.2452	0.1950	0.2242
auebnpgroup	0.2048	0.1110	0.1769
2Q2T	0.2477	0.2212	0.2200
MICLab	0.2135	0.1852	0.1582
Geliştirilen model	0.2943	0.3584	0.0487

Modelin performansı BLEU ve CIDeR gibi metriklerle değerlendirildiğinde anlamlı ama iyileştirilmeye açık sonuçlar elde edilmiştir. Örneğin, BLEU-4 skorunun düşük kalması modelin karmaşık cümle yapılarında zorlandığını göstermektedir. Bu durum özellikle karmaşık nörolojik anomalilerin tanımlanmasında sınırlamalar oluşturabilmektedir. Ayrıca kullanılan veri kümesinin büyüklüğü ve dengesi de modelin genelleme kabiliyetini etkileyen önemli faktörler arasındadır. Daha dengeli ve kapsamlı veri kümeleri kullanılması durumunda modelin doğruluk oranlarının artması beklenmektedir.

Diğer modellerle kıyaslandığında, S&T ve SA&T modellerinin daha dengeli bir performans sergilediği görülmüştür. Bu modeller BLEU ile ROUGE metriklerinde kısmen daha istikrarlı sonuçlar elde etmiştir. Bununla birlikte, BLEU-4 skorlarının TieNet'e kıyasla daha düşük olması, bu modellerin daha kısa ve basit cümlelerde başarılı olduğunu ancak karmaşık yapıları oluşturmakta zorlandığını göstermektedir. Öte

yandan, BLIP modeli özellikle BLEU-1 ve ROUGE metriklerinde yüksek skorlar elde etmiş olup, bu durum modelin daha geniş veri kümelerinde başarılı olabileceğini düşündürmektedir. Genel olarak, daha ileri seviye doğal dil işleme teknikleri içeren modeller, daha başarılı metin oluşturma kapasitesine sahipken, bazı klasik yöntemler belirli veri kümelerinde daha tutarlı sonuçlar verebilmektedir [17].

Görsel ve Metinsel Bilginin Entegrasyonu

BLIP modeli, görüntü ve dil entegrasyonunda güçlü bir yapı sergilemiştir. Ancak bu sürecin daha ileri seviyede optimize edilmesi mümkündür. Görüntülerdeki bağlamsal bilgilerin daha derinlemesine modellenmesi, üretilen açıklamaların zenginliğini artırabilir. Örneğin, görüntüler arasındaki ilişkileri daha iyi anlamak için çok katmanlı semantik bağlam analizleri uygulanarak modelin başarısı olumlu yönde geliştirilebilir.

Gelecekteki Geliştirme Olanakları

Bu çalışma, BLIP modeli tabanlı otomatik raporlama sistemlerinin gelecekteki uygulamaları için iyi bir temel oluşturmaktadır. Görsel-dil işleme yeteneklerinin çok modellenmiş öğrenme teknikleriyle geliştirilmesi, daha büyük ve dengeli veri kümelerinin kullanılması ve klinik ortamlardan alınan geri bildirimlerin modelin rafine edilmesine yönelik olarak entegrasyonu, çalışmanın etki alanını genişletebilir. Bu iyileştirmeler, üretilen raporların nörolojik anomali tespitinde daha hassas ve klinik olarak daha uygulanabilir hale gelmesini sağlayacaktır.

Klinik Uygulamalara Etkisi

Modelin sağlık hizmetlerinde klinik karar destek sistemi olarak potansiyeli büyüktür. Bu tür sistemler, özellikle zaman tasarrufu ve teşhis süreçlerinin standartlaştırılması açısından önemli avantajlar sunabilir. Ancak, gerçek klinik ortamda uygulanabilirlik için model çıktılarının insan doğrulaması ile desteklenmesi gerekmektedir.

SONUÇ

Bu çalışmada, beyin MR görüntülerinden otomatik rapor üretme sürecini geliştirmek amacıyla BLIP modelinden yararlanılmıştır. Modelin eğitimi için beyin MR görüntüleri ile filtrelenmiş ROCO veri kümesi kullanılmıştır. BLEU, ROUGE ve CIDEr metrikleri kullanılarak model performansı değerlendirilmiş, önışleme ve veri artırımı yöntemleri sayesinde bu skorlarda belirgin iyileşmeler gözlemlenmiştir. BLEU, ROUGE ve CIDEr skorları, model tarafından üretilen açıklamaların veri kümesinde bulunan referans açıklamalara olan benzerliğini ölçmek için kullanılmıştır. Deneysel sonuçlarda, veri artırımı ve önışleme tekniklerinin uygulanmasıyla iyileşmeler sağlanmıştır. Veri kümesinin hem görüntü kısmında hem de metin kısmında veri artırımı uygulandıktan sonra elde edilen sonuçlar BLEU-1 için 0,3584, BLEU-2 için 0,2347, BLEU-3 için 0,1659, BLEU-4 için 0,0990 şeklinde olmuştur. Diğer skorlardaki başarı ise ROUGE-1, ROUGE-2, ROUGE-L ve CIDEr için sırasıyla 0,3779, 0,1576, 0,2943 ve 0,0487 olarak elde edilmiştir. Çalışma sürecinde karşılaşılan en büyük zorluklardan biri sağlıklı sonuçlar alınabilecek düzenli bir veri kümesi elde etme aşamasında yaşanmıştır. Görüntü altyazılamaya yönelik yeterli sayıda MR görüntüsü içeren ve her bir görüntü için yeterli boyutta ve anlamlı açıklamalar bulunduran veri kümelerine ihtiyaç vardır. Bu ihtiyaçtan kaynaklanan kısıt, veri artırma teknikleri ile azaltılmaya çalışılmıştır. Çalışmada kullanılan veri kümesi ile oluşturulan model ve elde edilen sonuçlar, literatürde ağırlıklı olarak X-ray görüntülerine odaklanan çalışmalara çeşitlilik katmıştır. Beyin MR görüntülerinden otomatik rapor üretme çalışmaları, sağlık hizmetlerinin kalitesini ve verimliliğini artırma potansiyeline sahiptir. Elde edilen bu sonuçların daha büyük ve düzenli bir veri kümesi ile daha da iyileştirilebileceği düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

TÜBİTAK ve KoçSistem Bilgi ve İletişim Hizmetleri A.Ş.'ne 2209B Üniversite Öğrencileri Sanayiye Yönelik Araştırma Projeleri Desteği Programı kapsamında 1139B412304472 proje kodu ile yer alan bu çalışmaya sağladıkları destekten dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

[1] Ravinder, P., & Srinivasan, S. (2024). Automated Medical Image Captioning with Soft Attention-Based LSTM Model Utilizing YOLOv4 Algorithm.

[2] Aggarwal, A. K. Revealing AI-Driven Chest X-Ray Image Captioning Using Blip Transformer.

[3] Wang, Y., Lin, Z., Xu, Z., Dong, H., Luo, J., Tian, J., ... & He, Z. (2024). Trust it or not: Confidence-guided automatic radiology report generation. *Neurocomputing*, 127374.

[4] Boag, W., Hsu, T. M. H., McDermott, M., Berner, G., Alesentzer, E., & Szolovits, P. (2020, April). Baselines for chest x-ray report generation. In *Machine learning for health workshop* (pp. 126-140). PMLR.

[5] Liu, F., Yin, C., Wu, X., Ge, S., Zou, Y., Zhang, P., Zou, Y., & Sun, X. (2023). Contrastive attention for automatic chest X-ray report generation. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2106.06965>.

[6] Lovelace, J., & Mortazavi, B. (2020, November). Learning to generate clinically coherent chest X-ray reports. In *Findings of the Association for Computational Linguistics: EMNLP 2020* (pp. 1235-1243).

[7] Yang, S., Wu, X., Ge, S., Zhou, S. K., & Xiao, L. (2022). Knowledge matters: Chest radiology report generation with general and specific knowledge. *Medical image analysis*, 80, 102510.

[8] Yang, S., Wu, X., Ge, S., Zheng, Z., Zhou, S. K., & Xiao, L. (2023). Radiology report generation with a learned knowledge base and multi-modal alignment. *Medical Image Analysis*, 86, 102798.

[9] Pelka, O., Koitka, S., Rückert, J., Nensa, F., & Friedrich, C. M. (2018). Radiology objects in context (roco): a multimodal image dataset. In *Intravascular Imaging and Computer Assisted Stenting and Large-Scale Annotation of Biomedical Data and Expert Label Synthesis: 7th Joint International Workshop, CVII-STENT 2018 and Third International Workshop, LABELS 2018, Held in Conjunction with MICCAI 2018, Granada, Spain, September 16, 2018, Proceedings 3* (pp. 180-189). Springer International Publishing.

[10] Junnan Li, Dongxu Li, Silvio Savarese, Steven Hoi. "BLIP-2: Bootstrapping Language-Image Pre-training with Frozen Image Encoders and Large Language Models." *Proceedings of the 40th International Conference on Machine Learning*, PMLR 202:19730-19742, 2023.

[11] Junnan Li, Dongxu Li, Caiming Xiong, Steven Hoi. "BLIP-2: Bootstrapping Language-Image Pre-training for Unified Vision-Language Understanding and Generation." *Proceedings of the 39th International Conference on Machine Learning*, PMLR 162:12888-12900, 2022.

[12] Lemons, S., Linares López, C., Holte, R., & Ruml, W. (2022). Beam search: Faster and monotonic. *Proceedings of the International Conference on Automated Planning and Scheduling*, 32(1), 222-230. <https://doi.org/10.1609/icaps.v32i1.19805>.

[13] Zeng, X., Wen, L., Xu, Y., & Ji, C. (2020). Generating diagnostic report for medical image by high-middle-level visual information incorporation on double deep learning models. *Computer methods and programs in biomedicine*, 197, 105700.

[14] Barbella, M., & Tortora, G. (2022). Rouge metric evaluation for text summarization techniques. Available at SSRN 4120317.

[15] Devlin, J. (2018). Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. *arXiv preprint arXiv:1810.04805*.

[16] <https://www.imageclef.org/2024/medical/caption>

[17] Liu, G., Hsu, T. M. H., McDermott, M., Boag, W., Weng, W. H., Szolovits, P., & Ghassemi, M. (2019, October). Clinically accurate chest x-ray report generation. In *Machine Learning for Healthcare Conference* (pp. 249-269). PMLR.

Biyogaz Üretim Süreçlerinde Enerji Verimliliği ve Çevresel Sürdürülebilirliğin Artırılması: Bir Vaka Çalışması

Şeyhmus TUMÜR✉

¹ İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır, Türkiye

✉: stumur@dicle.edu.tr  [0000-0001-7589-8941](https://orcid.org/0000-0001-7589-8941)

Geliş (Received): 19.11.2024

Düzeltilme (Revision): 17.01.2025

Kabul (Accepted): 09.02.2025

ÖZ

Bu çalışmada, sürdürülebilirlik yönetimi, atık yönetimi ve enerji üretimi üzerine odaklanarak, düzenli depolama sahalarından elde edilen biyogazın enerji potansiyeli değerlendirilmiştir. Batman ili katı atık ve biyogaz üretim tesisinde Şubat, Mart ve Nisan aylarında üretilen biyogazın numunelerinin metan içeriği ve enerji üretimi arasındaki ilişki incelenmiştir. Bulgular, biyogazdaki metan içeriğinin %48 ile %52 arasında değiştiğini ve bu oranların sırasıyla %50,65, %51,33 ve %52,26 olarak ölçüldüğünü göstermektedir. Metan oranındaki değişimin dış ortam özellikleriyle (sıcaklık, nem, rüzgar vb.) ilişkili olduğu değerlendirilmiştir. Biyogazdaki metan oranını artırmak için tesis süreçlerine yönelik farklı iyileştirme önerileri geliştirilmiştir. Çalışma sonuçları, düzensiz depolama sahalarından elde edilen biyogazın enerji potansiyelinin, metan içeriği ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermiştir. Tesis süreçlerine yönelik önerilen iyileştirmelerle biyogazdaki metan oranı artırılarak enerji verimliliği önemli ölçüde yükseltilebilir. Bu çalışma, biyogaz üretim tesislerinin verimliliğini artırmak ve sürdürülebilir enerji üretimine katkı sağlamak için önemli bir adım teşkil etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Atık Yönetimi, Biyogaz, Enerji Üretimi, Metan, Sürdürülebilirlik

Improving Energy Efficiency and Environmental Sustainability in Biogas Production Processes: A Case Study

ABSTRACT

This study evaluates the energy potential of biogas derived from municipal solid waste landfills, focusing on sustainability, waste management, and energy production. The relationship between methane content and energy output of biogas samples was investigated at the Batman municipal solid waste and biogas production facility over three months (February, March, and April). Findings indicate that methane content in biogas ranged between 48% and 52%, with specific measurements of 50.65%, 51.33%, and 52.26% for the respective months. Variations in methane content were correlated with external environmental factors, including temperature, humidity, and wind. To enhance biogas methane content, several process improvement strategies were proposed. The results demonstrate a direct relationship between methane content and the energy potential of biogas from landfills. Implementing the proposed improvements could significantly enhance methane content, thereby improving energy efficiency. This study represents a significant step toward optimizing biogas production facilities and contributing to sustainable energy production.

Keywords: Biogas, Methane, Energy Production, Environmental Sustainability, Waste Management.

GİRİŞ

Batman ili katı atık ve biyogaz üretim tesisinde üç aylık süre zarfında elde edilen biyogaz numunelerinin metan içeriği ve enerji üretimi arasındaki ilişki incelenmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, biyogazdaki metan oranını artırmak için tesis süreçlerine yönelik farklı iyileştirme önerileri geliştirilmiştir.

Batman ili katı atık tesisinde tüm proseslerin (düzenli depolama sahası, mekanik ayrıştırma ünitesi, biyometanizasyon ve katı atık konfigürasyonunun değiştirilmesi gibi) faaliyete geçirilmesinin metan oranına etkisi araştırılmıştır.

Bu çalışma, katı atık tesisinin tüm proseslerinin entegre bir şekilde işletilmesiyle biyogaz üretiminde önemli bir verimlilik artışı ve metan içeriğinde kayda değer bir yükselişin sağlanabileceğini öngörmektedir.

Enerji, tüm canlıların temel gereksinimlerinden biridir. Geleneksel enerji kaynaklarının sürdürülemezliği ve bunlarla ilişkili çevre kirlilikleri, yenilenebilir enerjiyi günümüzün başlıca ihtiyacı haline getirmiştir. Sürdürülebilir sosyo-ekonomik kalkınmada ve yaşam kalitesinin iyileştirilmesinde belirleyici bir rol oynar. Dünyada geleneksel enerji kaynaklarının aşırı kullanımı nedeniyle sera gazlarının üretimi, küresel ısınmanın ve iklim değişikliğinin başlıca nedenidir [1].

Artmakta olan nüfus, endüstrileşme ve tüketim alışkanlıkları, katı atık üretimini önemli ölçüde artırmıştır. Bu durum, doğal çevre üzerindeki baskıyı artırarak ciddi kirlilik sorunlarına yol açmaktadır. Katı atıkların yanlış yönetimi, toprak, su ve hava kirliliğine neden olmakta, biyolojik çeşitliliği tehdit etmekte ve insan sağlığını olumsuz etkilemektedir [2]. Bu nedenle, katı atıkların toplanması, taşınması, geri dönüşümü ve bertarafı gibi süreçleri kapsayan etkin bir atık yönetimi sistemi oluşturmak büyük önem taşımaktadır. Ancak, birçok ülkede ve özellikle gelişmekte olan ülkelerde, katı atık yönetimi konusunda ciddi eksiklikler bulunmaktadır. Bu durum hem çevresel sorunları derinleştirmekte hem de ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Bu bağlamda, katı atık yönetimi için yerel yönetimler ve özel sektör arasında iş birliği yapılması, sürdürülebilir çözümler geliştirilmesi için gereklidir [3].

İnsan faaliyetlerinin neden olduğu katı atık sorunu, çevre ve halk sağlığı üzerinde önemli etkilere sahip olup, bu sorunun çözümü için vahşi depolama, düzenli depolama, kompostlama, tekrar kullanım, geri dönüşüm, geri kazanım ve yakma gibi çeşitli atık yönetim stratejileri uygulanmaktadır [4].

Vahşi depolama, katı atıkların herhangi bir ön işlemden geçirilmeden veya düzenli bir şekilde depolanmadan doğrudan çevreye terk edilmesi işlemidir. Bu uygulama, başta yer altı ve yerüstü sularının kirlenmesi, toprak yapısının bozulması, metan gazı oluşumu nedeniyle yangın ve patlama riskinin artması olmak üzere, görüntü kirliliği, toz ve kötü koku yayılması gibi pek çok çevresel probleme neden olmaktadır [5].

Gelişmekte olan ülkelerdeki katı atık yönetimi eksiklikleri; toprak ve su kirliliği, hava kirliliği, deniz kirliliği, biyoçeşitlilik kaybı ve sera gazı emisyonları gibi çevresel sorunlara neden olmaktadır. Ayrıca katı atık yönetimi eksiklikleri; sağlık harcamaları, enerji kaybı, hammadde kaybı, arıtma maliyeti ve iş kaybı gibi ekonomik sorunlara neden olmaktadır.

Yenilenebilir enerji sektöründe yaşanan büyüme, anaerobik çürütme ve biyogaz üretimi gibi teknolojilerin gelişimiyle desteklenmektedir. Bu sayede, atıklardan enerji elde edilerek hem enerji güvenliği hem de çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılmaktadır [6].

Biyogaz teknolojisi, mikroorganizmalar tarafından oksijen yokluğunda organik maddenin ayrıştırılması veya bozunmasının gerçekleştiği biyoenerji dönüşümünün biyokimyasal dönüşüm teknolojisi. Kompakt biyogaz tesisi yeni bir biyogaz teknolojisidir. Tesisin sindiricisi, 1 m³'lük basit su depolama plastik tankı ve 0,75 m³'lük gaz tutucusudur. Gaz tutucu, daha büyük olanında baş aşağı yerleştirilir. Biyolojik olarak parçalanabilir atıklar besleme malzemesi olarak kullanılır. Bu tesis genellikle yer üstünde tutulur.

Evsel atıkların artan sorunu ve bunların uygunsuz yönetimi, kentsel çevreyi her geçen gün daha da bozmaktadır. Kentsel ve yarı kentsel alanlarda alan kısıtlamaları, inek gübresi veya diğer hayvan gübrelerinin bulunmaması ve atık malzemeler olarak kaynakların kaybı, insanları alternatif yenilenebilir enerji kaynakları aramaya zorlamaktadır. Çalışmanın temel

amacı, biyolojik olarak parçalanabilir evsel atıkların anaerobik sindiriminden alternatif bir enerji olarak biyogaz üretimidir [7].

Bu çalışmada elde edilen bulgular doğrultusunda, biyogazdaki metan oranını artırmak için tesis süreçlerine yönelik farklı iyileştirme önerileri geliştirilmiştir.

Katı atık tesisine ait fizibilite raporunda yer alan analizler, düzenli depolama sahası, mekanik ayrıştırma ünitesi, biyometanizasyon tesisi gibi çeşitli proseslerin ve katı atık konfigürasyonunun yeniden düzenlenmesiyle biyogazdaki metan oranının %85 seviyesine yükseltilebileceğini göstermektedir.

Bu çalışma, biyogaz üretim tesislerinin verimliliğini artırmak ve sürdürülebilir enerji üretimine katkı sağlamak için önemli bir adım teşkil etmektedir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarla, farklı atık türleri ve coğrafi koşullar için daha kapsamlı analizler gerçekleştirilebilir.

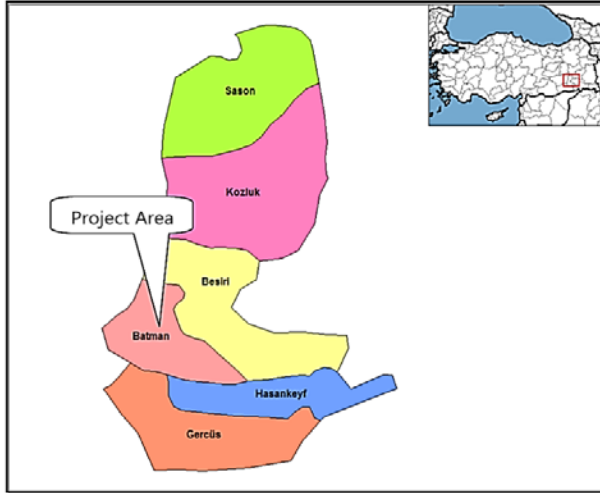
MATERYAL ve YÖNTEM

Materyal

Proje alanının yer aldığı Batman ili, Türkiye'nin Güneydoğu Anadolu Bölgesi içinde, 41°10' ve 41°40' doğu boylamları ile 38°40' ve 37°50' kuzey enlemlerinde yer almaktadır. İlin denizden yüksekliği 550 m'dir. Doğusunda Bitlis ve Siirt, kuzeyinde Muş, batısında Diyarbakır ve güneyinde Mardin ile komşudur. Batman (Merkez) ilçesi Muş'tan 218 km, Mardin'den 149 km, Bitlis'ten 135 km, Diyarbakır'dan 100 km ve Siirt'ten 87 km uzaklıktadır. Batman ilinin toplam alanı 4.654 km² dir. Batman ilinin Türkiye'deki konumu Şekil 1' de, Batman ili ve ilçelerinin haritası Şekil 2' de verilmiştir [8].



Şekil 1 Türkiye’de Batman İlini Gösteren Harita [8]



Şekil 2 Batman İlının ve İlçelerinin Haritası

Katı atık tesisi, enerji üretiminde 4 adet 1560 kW gücünde gaz motoru ve bu motorlara bağlı 4 adet 2000 kVA gücünde trafo kullanmaktadır. Tesisin kendi operasyonel ihtiyaçları için 8 kVA'lık bir trafo ile enerji sağlanırken, biyogaz depolama ve sirkülasyon sistemlerinin güç ihtiyacı 100 kW'lık bir jeneratör tarafından karşılanmaktadır. Tesis, sürekli besleme prensibiyle çalışarak 1250 MW elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirmekte ve saatlik 1000 m³ biyogaz üretimi kapasitesine sahiptir.

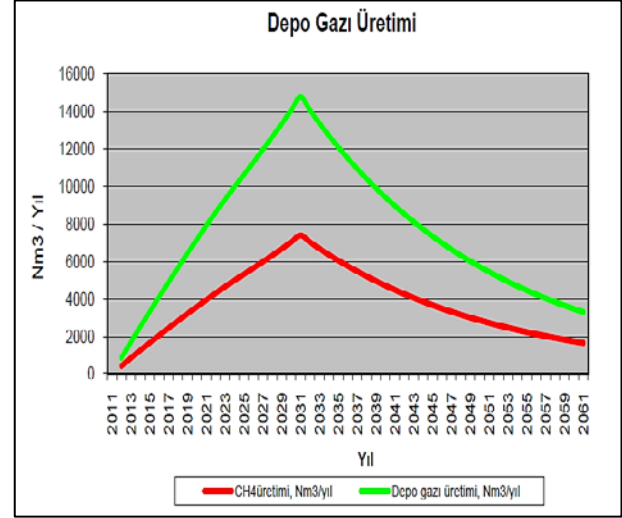
Bu çalışmada katı atık tesisinde gerçekleştirilen biyogaz içeriği ölçümlerinin sonuçları, günlük ortalama değerler üzerinden grafiksel olarak sunulmuştur.

Katı atık tesisinde idari birimler, tartım alanları, atık işleme tesisleri, araç bakım ve onarım merkezleri, tekerlek temizleme istasyonları, yollar ve çevre düzenlemesi, pilot ve tam kapasite kompostlama tesisleri, sızıntı suyu yönetim sistemleri gibi çeşitli üniteler bulunmaktadır. Bu ünitelerin teknik özellikleri Tablo 4'te detaylı olarak sunulmuştur.

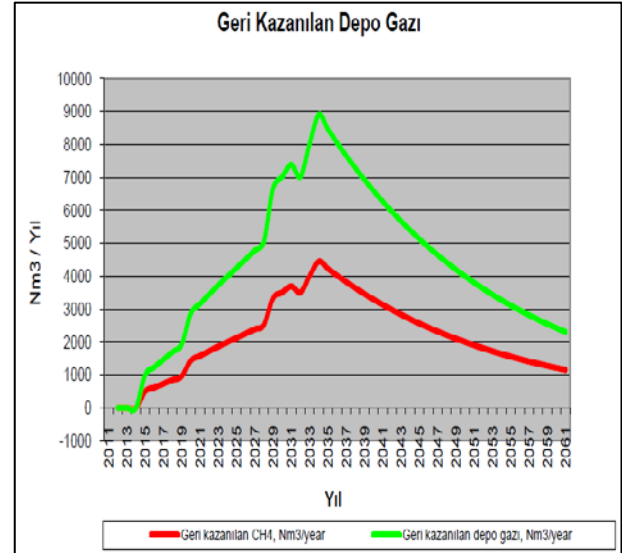
Proje kapsamında seçilen arazi, Batman İli' nin Raman yolu üzerindeki Binatlı Köyü yakınlarında, şehir merkezinin yaklaşık 17 km güneydoğusunda yer almakta olup 28,7 hektarlık bir alanı kapsamaktadır. Bu bölge, 750 ila 830 metre rakımları arasında, tepelerle çevrili bir vadide konumlanmakta ve %15 ile %40 arasında değişen eğimlerle dalgalı bir topografyaya sahiptir (Şekil 3).



Şekil 3 Vahşi depolama alanının kuş bakışı görünümü



Şekil 4 2011-2061 yılları tahmini depo gazı üretimi [9]



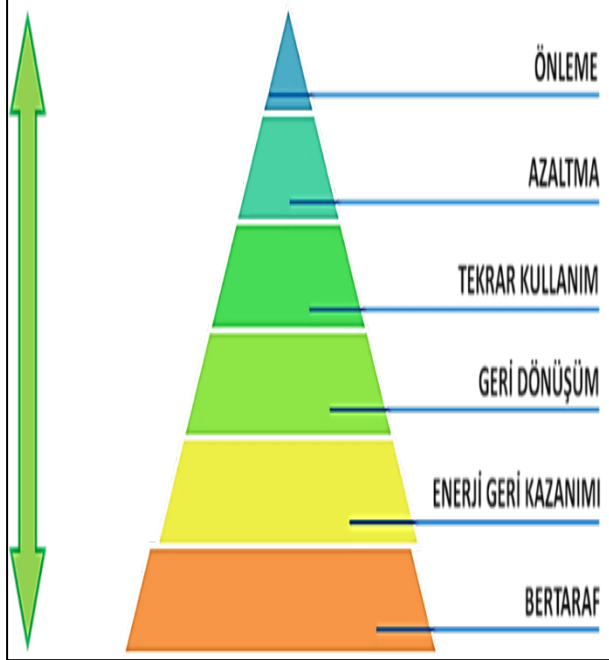
Şekil 5 2011-2061 yılları depo gazı ve metanın tahmini geri kazanım miktarları [9]

Batman'da evsel ve endüstriyel katı atıkların bertarafı ve geri dönüşümü

Katı atıkların yönetimi, atıkların oluşumundan bertarafına kadar geçen tüm süreçleri içerir. Bertaraf yöntemleri arasında kompostlaştırma (organik atıkların gübreye dönüştürülmesi), enerji geri kazanımı (yakma yoluyla enerji üretimi) ve düzenli depolama (kontrol altında depolanma) sayılabilir. Geri kazanım ise atıkların ham madde veya enerjiye dönüştürülerek ekonomik değerin artırılması ve doğal kaynakların korunması amacıyla uygulanan bir yöntemdir [9]. Geri kazanım, hem atık miktarını azaltır hem de çevresel etkileri en aza indirir [10].

Atık yönetimi süreçleri, atıkların önlenmesi, azaltımı, geri kazanımı, bertarafı ve enerji dönüşümü olmak üzere başlıca beş ana başlıkta incelenir (Şekil 4). Geri kazanım, atıkların fiziksel, kimyasal veya biyolojik yöntemlerle

yeniden kullanılabilir hale getirilmesi sürecidir. Bertaraf tesisleri ise, atıkların hacmini azaltmak, zararlı etkilerini ortadan kaldırmak veya enerji elde etmek amacıyla kullanılan tesislerdir. Çevresel mevzuat, atıkların bertarafı ve kontrolü için gerekli standartları belirler [11].



Şekil 6 Atık yönetim süreçleri şeması

Katı atık yönetimi süreçlerinin etkin bir şekilde planlanması ve uygulanması, hem çevresel sürdürülebilirliği destekler hem de ekonomik kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlar. Atık karakterizasyonu, yani atıkların fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinin belirlenmesi, uygun bertaraf yöntemlerinin seçilmesi için temel bir adımdır. Batman örneğinde olduğu gibi, atık bileşimindeki organik madde oranı oldukça yüksektir ve bu durum, kompostlama gibi biyolojik işlemlerin önemini vurgulamaktadır. Tablo 2' de görüldüğü gibi insanların yaşam kalitesine göre değişiklik arz etse de Batman ilindeki 2020 yılı atık kompozisyonunun yaklaşık %38,7' sinin gıda atıkları, %6,6' sının diğer yanamayan atıklar, %12,3' ünü plastik atıklar, %0,8' inin diğer yanabilen hacimli atıklar ve %3,4' ünün diğer atıklardan oluştuğu tespit edilmiştir.

Katı atıklar, doğru yöntemlerle yönetildiğinde değerli bir enerji kaynağı haline gelebilmektedir. Evsel atıkların önemli bir kısmını oluşturan organik maddeler, anaerobik koşullarda (havasız ortamda) parçalanarak biyogaz adı verilen bir gaz karışımı üretir. Biyogazın ana bileşenleri metan (CH_4) ve karbondioksit (CO_2) olup, yakılmasıyla elektrik enerjisi elde edilebilir. Bu süreç, biyometanizasyon olarak adlandırılır ve hem çevresel hem de ekonomik açıdan önemli faydalar sağlar [12].

Biyogaz üretimi, atıkların düzenli depolama alanlarında metan gazı oluşumunu önleyerek sera gazı emisyonlarını azaltır. Ayrıca, biyogaz üretimi sırasında elde edilen sıvı gübre, tarımda kullanılarak toprak verimliliğini artırır.

Bu sayede, atıklar hem enerji kaynağı hem de tarımsal üretim için değerli bir girdi haline gelir.

Diğer bir yöntem olan gazlaştırma, katı atıkların yüksek sıcaklıklarda ve sınırlı oksijen varlığında gazlaştırılması ile gerçekleşir. Bu süreçte, katı atıklardan sentez gazı adı verilen yanıcı bir gaz elde edilir. Sentez gazı, daha sonra elektrik veya ısı enerjisi üretmek için kullanılabilir. Gazlaştırma, biyogaz üretimine göre daha yüksek enerji verimliliği sunar ve daha geniş bir atık türü için uygulanabilir. Ancak, yüksek yatırım maliyeti ve karmaşık bir teknoloji olması nedeniyle daha az yaygın olarak kullanılmaktadır [13].

Katı atıkların yakılması ise, geçmişte sıkça kullanılan ancak günümüzde çevresel etkileri nedeniyle daha az tercih edilen bir yöntemdir. Düşük enerji yoğunluğuna sahip olan katı atıkların doğrudan yakılması, hava kirliliği ve küresel ısınmaya neden olabilmektedir. Ayrıca, yakma işlemi sırasında atıkların hacmi önemli ölçüde azalsa da zararlı yanma ürünleri ve kül oluşumu gibi sorunlar ortaya çıkabilir.

Sonuç olarak, katı atıkların enerjiye dönüştürülmesi, sürdürülebilir bir gelecek için önemli bir adımdır. Biyogaz üretimi ve gazlaştırma gibi teknolojiler, atıkların çevresel etkilerini azaltırken aynı zamanda enerji ihtiyacını karşılamaya da katkı sağlar. Türkiye'de de bu konuda önemli çalışmalar yapılmakta ve atıkların enerjiye dönüştürülmesiyle ilgili yatırımlar artmaktadır [6].

Yöntem

Düzensiz depolama sahasında üretilen biyogazın metan konsantrasyonu, üç aylık bir dönem boyunca saatlik olarak ölçülmüştür. Elde edilen geniş veri seti, günlük ortalama değerlere indirgenerek tablo formatında sunulmuştur. Katı atık tesisinde geliştirilen ileri projeksiyon verileri ışığında, biyogazın metan içeriği ve buna bağlı olarak üretilen elektrik enerjisi miktarı, mevcut durum ile karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu sayede, tesisin enerji üretim kapasitesindeki potansiyel artışlar ve iyileştirme alanları belirlenmiştir. Ayrıca, bu çalışma, biyogaz üretimi için uygun atık türleri, tesislerin kapasitesi ve enerji verimliliği gibi konularda da önemli bilgiler sunmaktadır.

Atık Projeksiyonu

Batman İli, Merkez İlçesi, Binatlı Köyü Mevkiinde tesis edilmesi planlanan katı atık düzenli depolama tesisinin yaklaşık 28,7 ha'lık bir arazi üzerine kurulması planlanmıştır. Proje kapsamında, Batman Katı Atık Tesisleri Yapma ve İşletme Birliği (BKABB)'ne üye Batman Merkez, Balpınar, Beşiri, İkiköprü, Hasankeyf, Gercüş, Sason, Kozluk ve Bekirhan Belediyeleri ile yakınındaki 6 köyün (Aydınkonak, Akça, Demiryol, Erköklü, İkiztepe ve Binatlı) atıkları toplanacak ve bertaraf edilecektir.

Batman Katı Atık Yönetimi Projesi kapsamında, proje boyunca oluşması beklenen atık miktarları hazırlanan fizibilite raporu sonucunda belirlenmiştir [14] ve bu değerler Tablo 1'de verilmiştir

Tablo 1 Belediyelerin Atık Projeksiyonları (ton/yıl)

	Batman Kentsel	Beşiri Kentsel	Hasankeyf Kentsel	Gercüş Kentsel	Sason Kentsel	Kozluk Kentsel	Toplam Kırsal	Kensel/Kırsal Toplam
2009	82527	2564	944	1745	3307	5906	3641	100634
2010	85730	2654	973	1797	3472	6087	3754	104467
2011	89067	2747	1002	1852	3632	6277	3864	108441
2012	92534	2844	1033	1909	3800	6473	3978	112571
2013	96136	2944	1065	1967	3976	6675	4095	116858
2014	99878	3047	1098	2027	4159	6884	4216	121309
2015	103766	3155	1132	2089	4351	7099	4341	125933
2016	107815	3268	1168	2156	4547	7328	4463	130745
2017	112022	3385	1205	2224	4751	7565	4590	135742
2018	116393	3506	1243	2295	4965	7810	4720	140932
2019	120935	3632	1283	2367	5188	8062	4854	146321
2020	125655	3763	1324	2443	5421	8323	4992	151921
2021	130621	3902	1368	2524	5660	8604	5129	157808
2022	135783	4046	1414	2608	5910	8896	5270	163927
2023	141150	4195	1461	2695	6170	9197	5415	170283
2024	146728	4350	1510	2785	6442	9508	5565	176888
2025	152527	4511	1561	2877	6726	9830	5718	183750
2026	158755	4684	1616	2978	7019	10180	5872	191104
2027	165237	4863	1673	3083	7324	10543	6030	198753
2028	171984	5050	1732	3192	7642	10919	6193	206712
2029	179006	5243	1793	3304	7974	11308	6360	214988
2030	186315	5444	1857	3420	8321	11712	6532	223601

Atık Karakterizasyonu

Batman Belediyesi tarafından 2015 yılı Ocak ve Eylül aylarında 4 farklı bölgede atık karakterizasyon çalışması yapılmış olup bu kapsamda Batman ili için kentsel atık karakterizasyonu belirlenmiştir.

Projelendirme çalışmalarında Batman genel ortalama atık karakterizasyonu sonuçları kullanılmıştır (Tablo 2).

Tablo 2 Atık Karakterizasyonu

Malzeme	Ortalama, %
Gıda Atıkları	38,7
Kâğıt	3,3
Karton	2,2
Hacimli Karton	4,7
Plastik	12,3
Cam	2,1
Metal	2,1
Hacimli Metal	0,0
Atık Elektrik ve Elektronik Ekipman	0,1
Tehlikeli Atık	0,8
Park ve Bahçe Atıkları	11,9
Diğer Yanıcı Olmayan Maddeler	6,6
Diğer Yanıcı Maddeler	0,0
Diğer Yanabilen Hacimli Atıklar	0,8
Diğer Yanamayan Hacimli	11,8
Diğer	3,4
Toplam	100

TARTIŞMA

Tesis Hakkında Genel Bilgiler

Batman katı atık tesisi; Batman İli, Batman Merkez İlçesi, Binatlı Köyü 371 numaralı parsel üzerinde toplam yaklaşık 400.864,53 m2 alanda kuruludur (Şekil 6). Proje alanına en yakın yerleşim birimleri, kuş uçuşu 2 km güneydoğusunda bulunan Yolveren Köyü ile kuş uçuşu 2km kuzeybatısında bulunan Kolbaşı Köyü'dür. Proje alanı, en yakın akaryakıt istasyonuna 6 km uzaklıkta, en yakın endüstriyel alana ve havaalanına 17 km uzaklıktadır.

Proje kapsamında, 1 Kasım 2008 tarihli Bakanlar Kurulu kararıyla (2008/14230) kurulan Batman Katı Atık Tesisleri Uygulama ve İşletme Birliği (BKABB) üyesi olan Batman Merkez Belediyesi ve Beşiri Belediyesi ile Birlik üyesi olması beklenen Balpınar, İkiköprü, Hasankeyf, Gercüş, Kozluk, Sason, Bekirhan belediyeleri ve Batman İlçelerine bağlı 6 köyün katı atıkları alınacaktır. Belediyelerin ve köylerin proje alanına olan mesafeleri Tablo 3' te verilmiştir.

Tesiste; idari bina, kantar, atölye binası, araç parkı, tekerlek temizleme ünitesi yollar ve saha kaplamaları, pilot kompost tesisi, sızıntı suyu dengeleme havuzu, sızıntı suyu pompalama istasyonu, sızıntı suyu arıtma tesisi, tam kapasite kompost tesisi ve yedek kompost alanı bulunmaktadır (Şekil 5). İdari ve teknik ünitelere ait bilgiler Tablo 4'de sunulmaktadır.

Tablo 1 Belediyelerin ve köylerin Proje Alanına Olan Mesafeleri

Belediye Adı	Proje Alanına Uzaklığı(km)	Köy Adı	Proje Alanına Kuşuçuğu uzaklığı (km)
Batman	17	Aydıkonak	13
Beşiri	29	Akça	8
Hasankeyf	31	Demiryol	15
Gercüş	54	Erköklü	11
Kozluk	79	İkiztepe	17,5
Sason	85	Binatlı	5,2
Balpınar	26		
İkiköprü	34		
Bekirhan	55		

Not: Uzaklıklar, çöp döküm sahasına giden yol üzerinde ilçenin çıkışında yer alan Beşiri kavşağından (Siirt Yolu) itibaren alınmıştır.



Şekil 7 Biyogaz tesisinin kuş bakışı görünümü



Şekil 8 Tesiste bulunan ünitelerin genel görünümü

Tablo 4 Batman KAY Projesi Ünitelerine Ait Yüzölçümü Bilgileri

Üniteler ve Tesisler	Yüzey Alanı (m ²)
Pilot Kompost Tesisi	-
Sızıntı Suyu Dengeleme Havuzu	1503
Sızıntı Suyu Pompalama İstasyonu	28
Sızıntı Suyu Arıtma Tesisi	3034
Kompost Alanı	3500
Tekerlek Temizleme Ünitesi	180
Garaj ve Atölye	398
Kontrol Binası ve Kantar	93
İdari ve Personel Binası	245

Proje Kapsamındaki Tüm Ünitelerin Özellikleri, Kapasiteleri, Proses Akım Şeması

Batman Katı Atık Yönetimi Projesi, Batman İlinde kurulan Belediyeler Birliği (BKABB)' ne üye Batman (Merkez) Belediyesi ve Beşiri Belediyesi ile birliğe üye olması beklenen Hasankeyf Belediyesi, Gercüş Belediyesi, Balpınar Belediyesi, İkiköprü Belediyesi, Bekirhan Belediyesi, Sason Belediyesi, Kozluk Belediyesi ve merkez ilçe civarındaki altı köyden alınacak katı atıkların, ilgili ulusal ve AB mevzuatına uygun olarak taşınması, depolanması, bertarafı ve geri kazanımını kapsamaktadır. Bu atık yönetim sistemi dahilinde, aşağıda sıralanmış olan üniteler bulunmaktadır.

Atık yönetim sistemi dahilinde bulunan üniteler hakkında detaylı bilgiler aşağıda verilmiştir.

Katı Atık Düzenli Depolama Tesisi

Depolama sahasının tasarımı yapılırken, sahanın jeoteknik ve topografik özellikleri de göz önüne alınarak, hafriyat ve toprak dolgusu miktarlarının en az seviyede tutulması amaçlanmıştır. 12 ha'lık alanı kapsayacak şekilde tasarlanan depolama sahasına, civar yollar ve setler de dahil edildiğinde 15,9 hektarlık bir alanı kapsamaktadır.

Atıkların depolanmasında dikkate alınması gereken temel işletme prensipleri şunlardır:

Tabana ince malzemeler yerleştirilerek taban kaplamasının hasar görmesi önlenecektir.

Depolama, zeminin düşük kotlarından yüksek kotlarına doğru yapılacaktır.

Atıklar belirli bir yüksekliğe ulaştığında, sıkıştırılmış derinlikleri 2 m olacak şekilde çelik tekerlekli sıkıştırıcılarla sıkıştırılacaktır.

Sıkıştırılmış atık katmanları arasına 15-20 cm'lik toprak serilecektir.
Rüzgâr hızının 35 m/s aştığı zamanlarda çalışmalar durdurulacaktır.

Pilot Kompost Tesisi

Pilot kompostlama tesisi, aşağıda belirtilen günlük girdiler dikkate alınarak yılda 2.500 ton organik atığı işleyecek kapasitede tasarlanacaktır. Kompostlama için daha fazla saf organik materyalin temin edilmesi durumunda, pilot tesisin genişletilmesi için ek bir alan planlanmaktadır. Pilot kompostlama tesisinin girdileri Tablo 5' te, ilgili varsayımlar ise Tablo 6' da yer almaktadır.

Tablo 2 Kompostlama Tesisinin Girdileri

Miktar	Ton	Hacim
Atık	7 t/gün	23,3 m ³ /gün
İri Maddeler	0,5 t/gün	3,3 m ³ /gün
Toplam Miktar	7,5 t/gün	26,6 m ³ /gün

Tablo 6 Kompostlama Tesis Kabulleri

Atık Yoğunluğu	300 kg/m ³
İri Madde Yoğunluğu	150 kg/m ³
Kompost Yoğunluğu	600 kg/m ³
Kompostlama Süresi	3 ay
Olgunlaşma Süresi	2 ay
Hacimde Azalma	50%
Kabul Edilmeyen	10%
Yığın Boyutları	Taban 6 m, tavan 1 m ve yükseklik 2,5 m

Kompostlama tesisi, farklı faaliyetler için farklı alanları kapsamaktadır. Bu alanlar hakkında detaylı bilgi aşağıda sunulmuştur.

- Atık Kabul Alanı
- Atık Parçalama Ünitesi
- Yığın Alanı
- Olgunlaştırma Alanı
- Eleme Alanı
- Depolama Alanı

Maddesel Geri Kazanım Tesisi (Ayırma Tesisi)

İkili toplama sistemi aracılığıyla, kaynağında cinslerine

göre ayrı olarak toplanan geri dönüştürülebilir atıkların, ayrıştırıldığı ve işlenerek satılmaya hazır hale getirildiği merkezlerdir. İkili toplama sisteminde evsel atıklar, kompostlama tesisine giden organik/karışık atıklar ve maddesel geri kazanım tesisine giden karışık kuru atıklar olmak üzere ayrılacaktır. İkili toplama sisteminin 2020 yılında uygulamaya alınması planlanmaktadır. 2025 yılında maddesel geri kazanım tesisi kurulduğunda ve 2031 yılında planlama döneminin sonunda, ikili sistemle toplanacak madde miktarları hesaplanmış ve Tablo 7' de gösterilmiştir.

Tablo 7 MGT İçin Atık Miktarları

Kuru kısım ikili toplama (2025'ten sonra MGT'ye)	2025	2030	2031
Brüt girdi	24.473	47.231	49.447
Net girdi	17.131	33.062	34.613
Biyolojik olarak parçalanabilen net atık girdisi (kâğıt/karton)	5.798	11.190	11.715
Düzenli depolama sahasına gidecek kabul edilmeyen atık miktarı	24.473	14.169	14.834

Maddesel geri kazanım tesisinin tasarımı 2031 yılında toplanacak atık miktarlarına dayalı olacaktır. Daha sonraki yıllarda kapasite artırımı yapılacaktır. Ayırma ünitelerini yeterli kapasitede tasarlayabilmek için hedeflenen geri dönüştürülebilir atıkların net girdideki dökümleri, atık hesaplamalarında gösterilmiş olan atık kompozisyonuna bağlı olarak yapılmıştır. Miktarlar, Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8 Maddesel Geri Kazanım Tesisi Brüt Girdi Dökümü (ton)

	Ton			Eşdeğer Nüfus	Ton /saat
	Yıllık	Günlük	Vardiya Başına		
Kağıt	5.445	18	9	0	1
Karton	6171	21	10	5	1
Plastik	14884	50	25	8	4
Cam	3267	11	5	2	1
Metal	4845	16	8	3	1
Kabul Edilmeyen	14834	49	25	0	4
Net Girdi	34613	115	58		8
Brüt Girdi	49447	165	82	18	12
* Varsayım: Manyetik ayırıcı tarafından tutulan 3 ton/vardiya.					
Bir kişi günde 1,5-2,0 ton atık ayırabilmektedir. (vardiya)					

Atık Kumbara İstasyonları

Atık kumbaralarının etkin kullanımı için vatandaşların geri dönüşüm konusunda bilinçlendirilmesi, kumbaraların sayısının ve yerlerinin uygun şekilde belirlenmesi önemlidir. Şehrin nüfus yoğunluğu ve gelir seviyesi yüksek bölgelerinde yer alacak kumbaralar, daha fazla geri dönüşüm sağlayacaktır. Her kumbaranın farklı bir atık türü için renk kodlu olması, vatandaşların atıklarını doğru yere atmalarını kolaylaştıracaktır.

Geri Dönüşüm Merkezleri (Toplama Merkezleri)

Geri dönüşüm merkezi, kağıt, karton, plastik, cam, alüminyum, demir, beyaz eşya, elektronik atıklar gibi çeşitli atık türleri için ayrı konteynerlerin bulunduğu, atıkların toplanması ve geri kazanılması amacıyla kurulan tesislerdir. Batman'da kurulacak olan merkez, hizmet vereceği bölgede merkezi bir konumda olacak ve yaklaşık 4.000-6.000 m²'lik bir alanı kapsayacaktır.

Proje kapsamında Batman'da kurulacak geri dönüşüm merkezi, evsel atıklardan tehlikeli atıklara kadar geniş bir yelpazedeki atığı kabul edecek ve bu atıkların geri dönüşümünü sağlayarak çevreye ve ekonomiye katkı sağlayacaktır.

Geri dönüşüm merkezine, aşağıdaki maddeler için ayrılmış konteynerler tahsis edilecektir:

- Kâğıt ve karton,
- Plastikler,
- Cam (küçük konteyner),
- Alüminyum kutular (küçük konteyner),
- Demir ve diğer metaller,
- Buzdolapları ve dondurucular,
- Elektrik ve elektronik eşyalar,
- İnşaat ve yıkıntı atıkları,
- Kompostlama için bahçe atıkları (hacimli maddeler),
- Hacimli atıklar-kullanılmış ev eşyaları,
- Düzenli depolama sahalarında bertaraf edilecek atıklar,
- Özel konutlardan gelen tehlikeli atıklar

Gaz Toplama ve Değerlendirme Sistemi

Düzenli toplama sahasındaki atıkların anaerobik çürümesi metan, karbon dioksit, azot ve gaza belirgin bir koku veren bazı maddelerden oluşan depo gazını üretir. Düzenli depolama sahası aktif işletme süresi boyunca ve kapanmasından uzun bir süre sonra da depo gazı üretmeye devam edecektir. Dolayısıyla, gazın kullanılması dikkate alınması gereken bir konudur. Depo gazının toplanmasını gerekli kılan sebepler aşağıdaki gibi özetlenebilir:

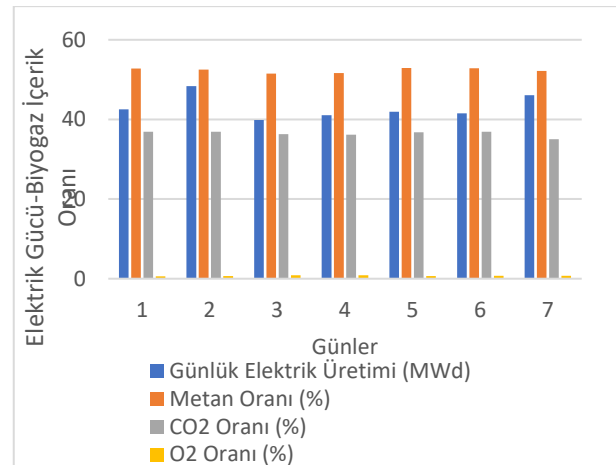
- Depo gazı içeriğinin sera etkisi ve küresel ısınmaya olan katkısı,
- Oksijenle karışan depo gazının patlamaya yol açma riski,
- Depo gazı kaynaklı koku emisyonu ve duman,
- Depo gazından enerji üretip sahada kullanabilme avantajı

Batman Katı Atık Düzenli Depolama Tesisinde üretilen depo gazı için mekanik olarak havalandırma

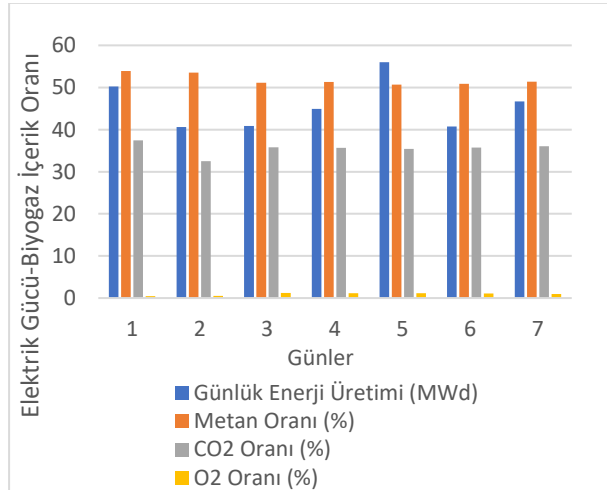
ve yakma teknolojisi tercih edilmiştir. Üretilen depo gazının mekanik havalandırması amacıyla düzenli depolama sahası, gaz toplama bacalarıyla donatılacaktır. Düzenli depolama sahalarında kullanılan yatay gaz toplama sistemleri, faaliyet sırasında oluşabilecek hasarlara karşı, dikey gaz toplama sistemlerine göre daha hassastırlar. Dikey sistemlerin daha emniyetli ve verimli oldukları kanıtlanmış bir gerçektir. Bu nedenle, bu proje içinde dikey gaz toplama sistemi kullanılacaktır. Dikey gaz toplama bacaları, her biri yaklaşık 25-30 metre etkili yarıçaplı alanlardan gaz toplayacak şekilde tasarlanacaktır. Gaz boruları için 100-200 mm çaplı, delik veya yarık yüzeylerinin oranı %15 olan HDPE borular kullanılacaktır.

Biyogaz Tesisinde Yapılan Ölçümler

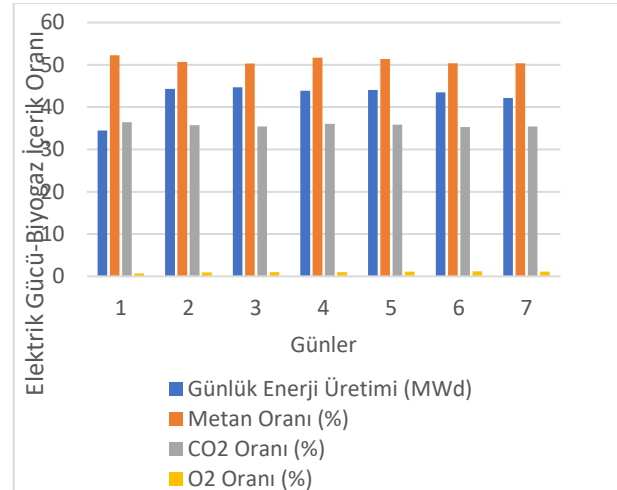
Batman Katı Atık Tesisindeki düzensiz depolama sahasından saatlik periyotlarla emilen biyogazın metan gazı içeriği oranı ve bu gazdan elde edilen elektrik enerjisi miktarı ölçülerek veri seti oluşturulmuştur. Elde edilen ham veriler, günlük ortalamalara dönüştürülerek daha kapsamlı bir analiz imkânı sağlanmıştır. Metan gazı oranı ve elektrik enerjisi üretimi arasındaki ilişki, grafiksel yöntemlerle görselleştirilerek detaylı bir değerlendirmeye tabi tutulmuştur. Yapılan analizler, düzensiz depolama sahasından elde edilen biyogazın metan içeriğinin %48 ile %52 arasında değiştiğini göstermiştir. Bu sonuç, sahadaki organik maddelerin ayrışma hızları ve biyogaz oluşum koşulları hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Katı atık tesisinde gerçekleştirilen detaylı analizler, metan içeriği üzerinde sıcaklık değişimlerinin ihmal edilebilir bir etkisi olduğunu ve asıl belirleyici faktörün, tesise giren katı atıkların kompozisyonu olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Batman katı atık tesisi için yapılan ileri projeksiyonlarda gösterilen farklı biyokütle türleri ve işlem koşulları altındaki pilot çalışmaların ölçeklendirme öncesi verilerinde belirtilen, metan gazı oranının %85'e çıkarılması, kompleks bir sistemin optimize edilmesini gerektirmektedir [14].



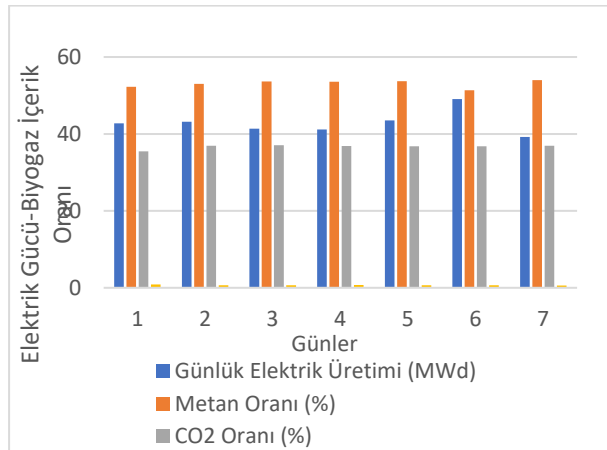
Şekil 9 Şubat 1. Hafta-Üretilen Biyogaz İçerik Oranı ile Enerji Üretimi Arasındaki İlişki



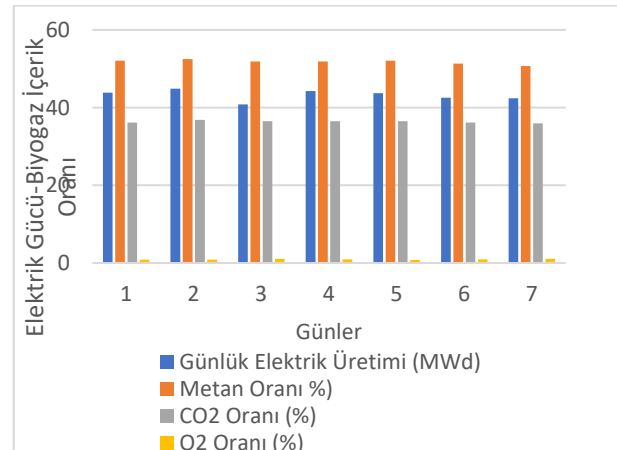
Şekil 10 Şubat 2. Hafta-Üretilen Biyogaz İçerik Oranı ile Enerji Üretimi Arasındaki İlişki



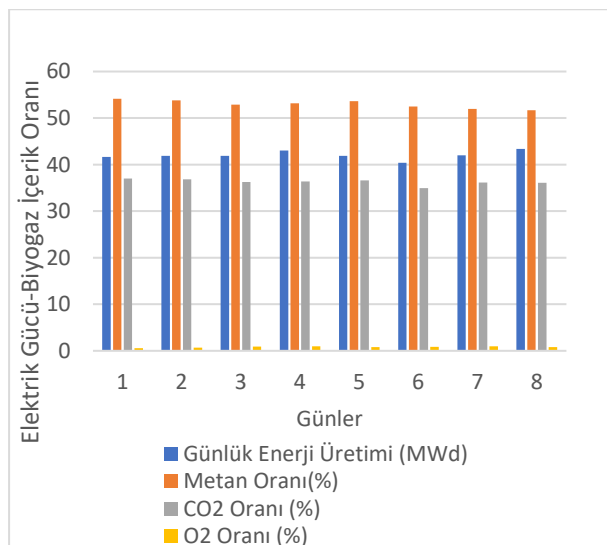
Şekil 13 Mart 1. Hafta-Üretilen Biyogaz İçerik Oranı ile Enerji Üretimi Arasındaki İlişki



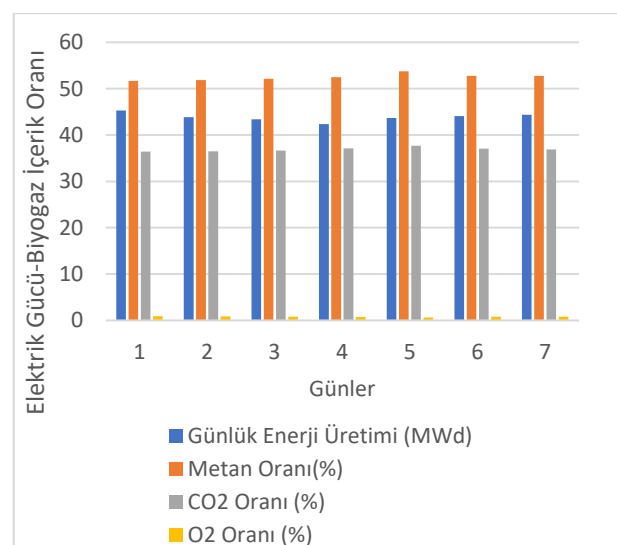
Şekil 11 Şubat 3. Hafta-Üretilen Biyogaz İçerik Oranı ile Enerji Üretimi Arasındaki İlişki



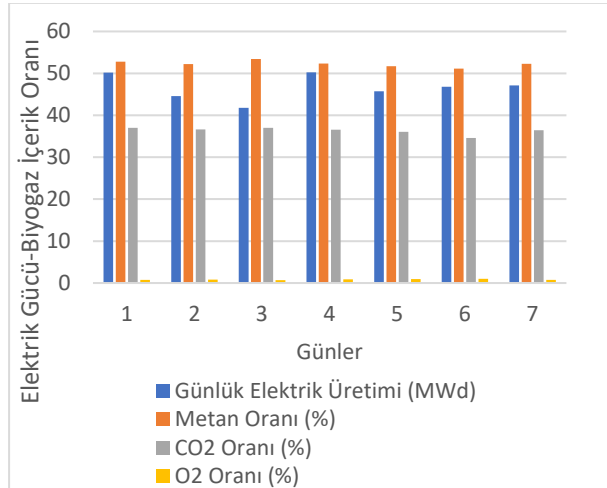
Şekil 14 Mart 2. Hafta-Üretilen Biyogaz İçerik Oranı ile Enerji Üretimi Arasındaki İlişki



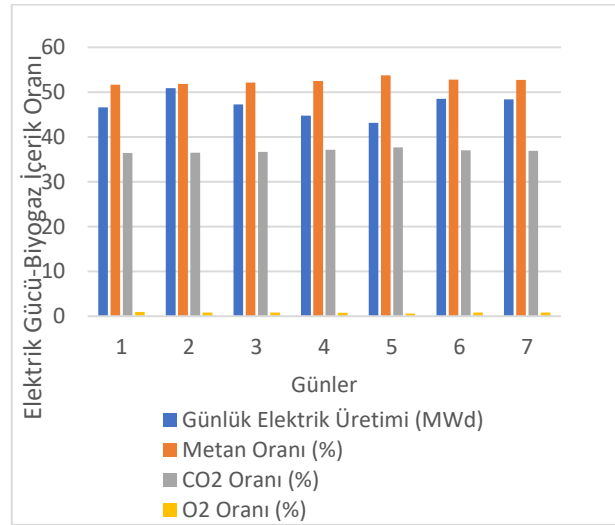
Şekil 12 Şubat 4. Hafta-Üretilen Biyogaz İçerik Oranı ile Enerji Üretimi Arasındaki İlişki



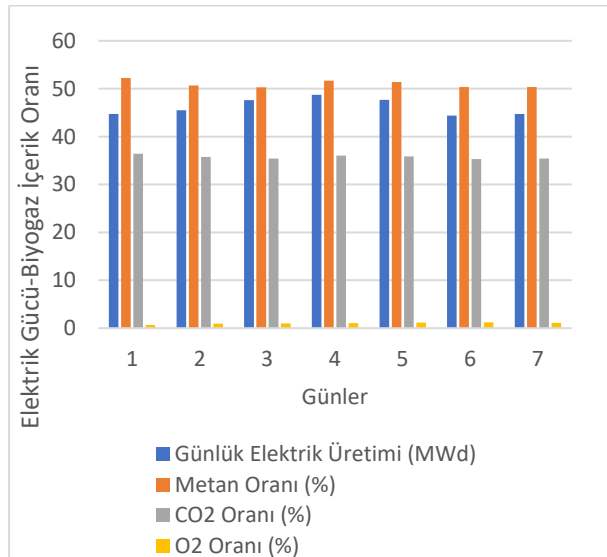
Şekil 15 Mart 3. Hafta-Üretilen Biyogaz İçerik Oranı ile Enerji Üretimi Arasındaki İlişki



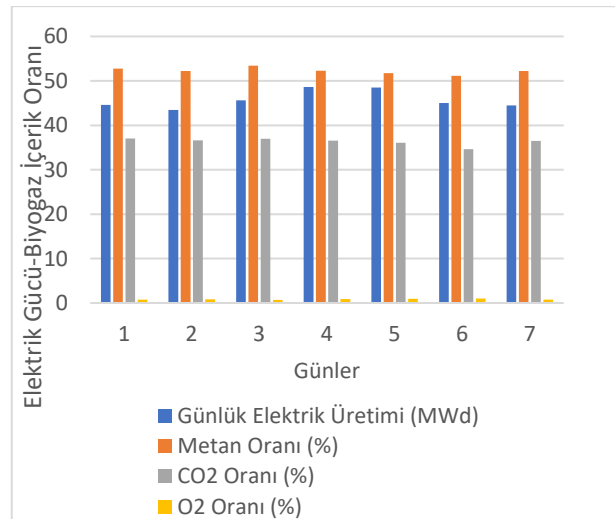
Şekil 16 Mart 4. Hafta-Üretilen Biyogaz İçerik Oranı ile Enerji Üretimi Arasındaki İlişki



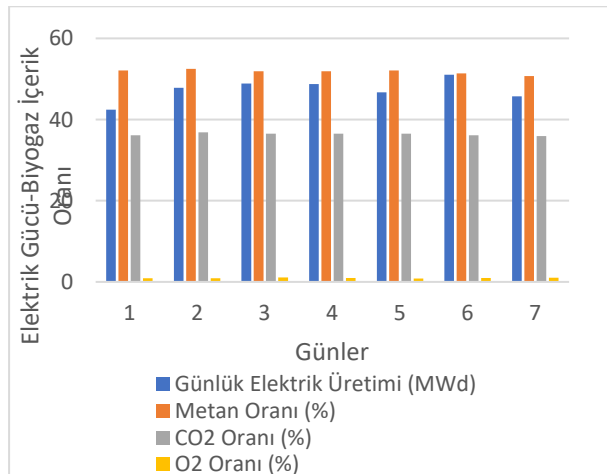
Şekil 19 Nisan 3. Hafta-Üretilen Biyogaz İçerik Oranı ile Enerji Üretimi Arasındaki İlişki



Şekil 17 Nisan 1. Hafta-Üretilen Biyogaz İçerik Oranı ile Enerji Üretimi Arasındaki İlişki



Şekil 20 Nisan 4. Hafta-Üretilen Biyogaz İçerik Oranı ile Enerji Üretimi Arasındaki İlişki



Şekil 18 Nisan 2. Hafta-Üretilen Biyogaz İçerik Oranı ile Enerji Üretimi Arasındaki İlişki

Tablo 9 Şubat ayı haftalık metan gazı ortalama değerleri

Hafta	Metan Gazı Oranı Ortalama Değerleri
1	48,95
2	50,99
3	51,25
4	51,44

Tablo 10 Mart ayı haftalık metan gazı ortalama değerleri

Hafta	Metan Gazı Oranı Ortalama Değerleri
1	51,02
2	51,26
3	51,45
4	51,62

Tablo 11 Nisan ayı haftalık metan gazı ortalama değerleri

Hafta	Metan Gazı Oranı Ortalama Değerleri
1	51,68
2	51,85
3	52,45
4	53,08

Biyogaz üretimi, organik maddelerin anaerobik (oksijensiz) ortamda mikroorganizmalar tarafından parçalanması sonucu meydana gelen metan (CH₄) ve karbondioksit (CO₂) içeren bir gaz karışımıdır. Bu süreçte sıcaklık, biyogaz üretim hızını ve verimliliğini önemli ölçüde etkileyen kritik bir faktördür.

Biyogaz üretimi için en uygun sıcaklık aralığı genellikle 30-40°C (mezofilik koşullar) olarak kabul edilir. Bu aralıkta mikroorganizmaların aktivitesi ve metabolik süreçleri en üst düzeydedir. Daha düşük sıcaklıklarda (psikrofilik koşullar) mikrobiyal aktivite yavaşlar ve biyogaz üretimi azalır. Yüksek sıcaklıklarda (termofilik koşullar) ise bazı mikroorganizmaların aktivitesi inhibe olabilir ve biyogaz üretimi yine düşebilir.

Sonuç olarak tablo 9-11'de sunulan verilerin analizi sonucunda, dış ortam sıcaklığının aylık periyotta yükselmesiyle birlikte biyogazdaki metan içeriği oranının da arttığı tespit edilmiştir.

SONUÇ

Bu çalışmada Batman katı atık tesisinde biyogazdan enerji üretimi sürecinin verimliliğinin artırılması amacıyla düzensiz depolama alanlarından elde edilen metan gazı oranının elektrik enerjisi üretimine etkileri incelenmiştir. Elde edilen bulgular, tesisin biyogaz üretiminin metan içeriğinin %48 ile %52 arasında değiştiğini, katı atık tesisinde gerçekleştirilen detaylı analizler, metan içeriği üzerinde sıcaklık değişimlerinin ihmal edilebilir bir etkisi olduğunu ve asıl belirleyici faktörün, tesise giren katı atıkların kompozisyonu olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Katı atık tesisine ait fizibilite raporunda yer alan analizler, düzenli depolama sahası, mekanik ayrıştırma ünitesi, biyometanizasyon tesisi gibi çeşitli proseslerin ve katı atık konfigürasyonunun yeniden düzenlenmesiyle biyogazdaki metan oranının %85 seviyesine yükseltilebileceğini göstermektedir.

Elde edilen bu sonuçlar ışığında düzensiz depolama sahasından elde edilen biyogazın enerji üretimi için kullanılabilme potansiyeli hakkında daha detaylı çalışmalar yapılması gerekmektedir. Bu amaçla, biyogazın metan içeriğini artırmak için tesisin tüm proselerinin faaliyete geçirilmesi ile (düzenli depolama, biyometanizasyon ünitesi ve mekanik ayrıştırma ünitesi vb.) enerji verimliliği optimize edilebilir.

Bu çalışmada Şubat, Mart ve Nisan aylarındaki biyogazdaki metan oranı içeriği sırasıyla %50,65, %51,33 ve %52,26 olarak tespit edilmiştir. Metan oranındaki bu değişimin dış ortam sıcaklığıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir

Çevresel sürdürülebilirlik perspektifinden değerlendirildiğinde, bu çalışma metanın güçlü bir sera gazı olması ve düzensiz depolama sahalarından kaynaklanan metan emisyonlarının küresel ısınmayı şiddetlendirdiği gerçeğini vurgulamaktadır. Biyogazın enerji üretimi için kullanılması, metan potansiyelini atmosfere salınmadan önce değerlendirerek sera gazı emisyonlarının azaltılmasına önemli bir katkı sağlar. Bu yaklaşım, sürdürülebilir enerji üretimi ve iklim değişikliğiyle mücadele arasındaki sinerjiyi ortaya koymaktadır.

Düzensiz depolama sahalarının düzenlenmesi ve katı atık tesislerinin tüm proseslerinin faaliyete geçirilmesi ve biyogaz üretimi için kullanılması, atık yönetimi uygulamalarının iyileştirilmesine katkı sağlar. Bu sayede çevre kirliliği azalır ve doğal kaynakların daha verimli kullanımı sağlanır.

Biyogazdan elde edilen enerji, fosil yakıtların kullanımını azaltarak enerji çeşitliliğini artırır ve enerji güvenliğini güçlendirir. Batman katı atık tesisinde gerçekleştirilen bu çalışma, biyogazdan enerji üretimi sürecinde metan içeriğinin optimize edilmesiyle enerji verimliliğinin artırılabilirliğini göstermesi açısından önemli bir katkı sunmaktadır.

Çalışmanın bulguları hem enerji sektörü hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından dikkate değer sonuçlar ortaya koymuştur.

Çalışma, biyogazın metan içeriğinin artırılmasıyla enerji üretim kapasitesinin önemli ölçüde artırılabilirliğini deneysel olarak göstermiştir. Biyogazın enerji üretimi için kullanılmasının sera gazı emisyonlarını azaltmada önemli bir potansiyele sahip olduğu vurgulanmıştır. Biyogaz üretiminin tüm aşamalarında iyileştirme yapılabileceği ve böylece enerji verimliliğinin artırılabilirliği belirtilmiştir.

Biyogazdan enerji üretimi sürecinin ekonomik sürdürülebilirliğini değerlendirmek için kapsamlı bir maliyet-fayda analizi yapılması gerekmektedir. Bu analizde, yatırım maliyetleri, işletme giderleri, enerji satış gelirleri ve çevresel faydaların parasal değeri gibi faktörler dikkate alınmalıdır.

Elde edilen bulguların daha geniş ölçekte doğrulanması için farklı bölgelerde ve farklı atık tiplerine sahip tesislerde pilot çalışmalar yapılması önerilir. Bu çalışmalar, farklı koşullarda biyogaz üretiminin verimliliğini ve ekonomikliğini değerlendirmeye olanak sağlayacaktır. Biyogaz üretim sürecindeki farklı parametrelerin (sıcaklık, pH, besleme hızı vb.) etkilerini analiz etmek ve optimum çalışma koşullarını belirlemek için yapay zeka ve makine öğrenmesi tekniklerinden yararlanılabilir. Bu sayede, biyogaz üretimi daha verimli ve otomatik hale getirilebilir. Biyogazın sadece enerji üretimi için değil, aynı zamanda biyometan, biyo-plastik veya diğer yüksek katma değerli ürünlerin üretimi için de kullanılması potansiyeli araştırılmalıdır. Bu sayede, biyogazın ekonomik değeri artırılabilir ve sürdürülebilir bir biyoekonomiye katkı sağlanabilir.

Biyogazdan enerji üretimi yatırımlarını teşvik etmek için uygun politikalar ve destek mekanizmaları geliştirilmesi gerekmektedir. Vergi teşvikleri, kredi garantisi, yeşil

sertifikalar gibi araçlar, yatırımcıları bu alana çekmek için önemli bir rol oynayabilir.

Biyogazın önemi ve çevresel faydaları hakkında toplumun bilinçlendirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, eğitim programları, seminerler ve basın yayın organları aracılığıyla bilgilendirme çalışmaları yapılması önemlidir.

Bu çalışma, biyogazın enerji üretimi potansiyelini ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemini vurgulayarak alanda önemli bir katkı sağlamıştır. Ancak, biyogaz teknolojileri ve uygulamalarıyla ilgili daha derinlemesine incelenmesi gereken birçok konu bulunmaktadır. Yukarıda belirtilen öneriler doğrultusunda gerçekleştirilecek araştırmalar, biyogazın sürdürülebilir enerji üretimi için daha etkin bir şekilde kullanılmasına katkı sağlayacaktır.

Çalışma sonuçları, düzensiz depolama sahalarından elde edilen biyogazın enerji potansiyelinin, metan içeriği ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermiştir. Tesis süreçlerine yönelik önerilen iyileştirmelerle biyogazdaki metan oranı artırılarak enerji verimliliği önemli ölçüde yükseltilebilir.

KAYNAKÇA

- [1] C. İlkılıç ve H. Deviren, «Biyogazın Oluşumu ve Biyogazı Saflaştırma Yöntemleri,» %1 içinde *In 6 th International Advanced Technologies Symposium*, Elazığ, 2011.
- [2] Ö. Aydoğan, G. Varank ve M. S. Bilgili, «Gaziantep İl Merkezi Kentsel Katı Atık Yönetimi,» *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, cilt 3, no. 1, pp. 268-275, 2011.
- [3] A. Yılmaz ve Y. Bozkurt, «Türkiye'de Kentsel Katı Atık Yönetimi Uygulamaları ve Kütahya Katı Atık Birliği (KÜKAB) Örneği,» *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, cilt 15, no. 1, pp. 11-28, 01 Mart 2010.
- [4] A. Yılmaz ve Y. Bozkurt, «Türkiye'de Kentsel Katı Atık Yönetimi Uygulamaları Ve Kütahya Katı Atık Birliği (Kükab) Örneği,» *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, cilt 15, no. 1, pp. 11 - 28, 01 Mart 2010.
- [5] G. Gökçe ve . P. Hasanoğlu, «Katı Atık Düzenli Depolama Sahalarının ve Vahşi Depolama Alanlarının Islahı ve Bitkilendirilmesi,» *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, cilt 3, no. 1, pp. 258 - 271, 15 Ocak 2015.
- [6] H. Gülşen, . A. Akkuş, . A. Yolun ve M. Aslan, «Adıyaman İlinin Katı Atıkların Elektrik Potansiyelinin Belirlenmesi,» *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, cilt 3, no. 25, pp. 173-182, 03 Eylül 2022.
- [7] G. Salihoğlu, Z. Poroy ve N. K. Salihoğlu, «Kentsel atık yönetiminde yaşam döngüsü değerlendirmesi: Bursa analizi,» *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, cilt 25, no. 6, pp. 692-699, 10 10 2018.
- [8] Harita Genel Müdürlüğü, «HGM-Atlas,» Ankara, 2024.
- [9] Ş. Yıldız, F. Saltabaş, V. Balahorli, K. Sezer ve K. Yağmur, «Organik Atıklardan Biyogaz Üretimi (Biyometanizasyon) Projesi – İstanbul Örneği,» %1 içinde *Türkiye'de Katı Atık Sempozyumu*, İstanbul, 2009.
- [10] M. Şen ve K. Kestioğlu, «Kırsal Belediyelerde Evsel Katı Atıkların Geri Kazanımı ve Ekonomik Analizi: Mustafakemalpaşa İlçesi/Bursa Örneği,» *Ekoloji Dergisi*, cilt 16, no. 65, 2007.
- [11] Aile ve Tüketici Hizmetleri, «Katı Atıklar,» Milli Eğitim Bakanlığı, Ankara, 2011.
- [12] H. Evin ve B. Demiral, «Malatya'da katı atık yönetimi: kentleşmenin yerel çevre politikaları üzerine etkisi,» *Sosyal Bilimler Araştırma Dergisi*, cilt 7, no. 2, pp. 277-295, Haziran 2018.
- [13] S. Öztürk, «Sentez Gazı Yanması ve Çevre Kirleticiler,» *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, cilt 34, no. 1, pp. 129-138, 31 03 2019.
- [14] ÇED ve İzin Şube Müdürlüğü, «Batman İli 2019 yılı Çevre Durum Raporu,» Batman Valiliği Çevre Ve Şehircilik İl Müdürlüğü, Batman, 2020.

Düzlemsel Çelik Çerçevelerin Performansa Dayalı Optimum Sismik Tasarımının Çok Sınıflı MC-TLBO Algoritmasıyla Karşılaştırmalı Analizi

Hikmet TUTAR

Ulaştırma ve Trafik hizmetleri Bölümü, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Muş Alparslan Üniversitesi, MUŞ, Türkiye

✉: h.tutar@alparslan.edu.tr  [0000-0002-1440-7659](https://orcid.org/0000-0002-1440-7659)

Geliş (Received): 28.11.2024

Düzeltilme (Revision): 11.04.2025

Kabul (Accepted): 08.05.2025

ÖZ

Bu çalışmada, moment aktaran çelik çerçevelerin performansa dayalı optimum sismik tasarımı (PBOSD), Jaya (JA), Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (TLBO) ve TLBO'nun çok sınıflı varyantı olan MC-TLBO algoritmaları ile entegre edilerek gerçekleştirilmiştir. TLBO, JA ve MC-TLBO algoritmalarıyla elde edilen sonuçlar, MATLAB ve OpenSees yazılımlarının etkileşimli bir şekilde kullanılmasıyla elde edilmiştir. Bu algoritmaların performansını değerlendirmek amacıyla literatürde yer alan iki düzlemsel çelik çerçeve örneği kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, Geleneksel Tasarım (CD) yaklaşımı ile Karınca Kolonisi Optimizasyonu (ACO), Genetik Algoritma (GA) ve Yüklü Sistem Arama (CSS) gibi diğer optimizasyon algoritmalarıyla karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalı analizler, özellikle minimum yapısal ağırlık ve analiz sayısı gibi temel performans kriterlerine odaklanmıştır. Elde edilen bulgular, MC-TLBO algoritmasının CD, ACO, GA ve CSS yöntemlerine kıyasla daha üstün tasarım sonuçları ürettiğini ve etkin bir optimizasyon yaklaşımı olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Statik itme analizi; Performansa dayalı tasarım, Çelik çerçeveler, Optimum sismik tasarım; TLBO algoritması, JA algoritması, MC-TLBO algoritması.

Comparative Analysis of Performance-Based Optimal Seismic Design of Planar Steel Frames Using the Multi-Class MC-TLBO Algorithm

ABSTRACT

In this study, the performance-based optimum seismic design (PBOSD) of moment resisting steel frames was implemented by integrating with Jaya (JA), Teaching-Learning Based Optimization (TLBO) and TLBO's multi-class variant MC-TLBO algorithms. The results obtained with TLBO, JA and MC-TLBO algorithms were obtained by using MATLAB and OpenSees software interactively. In order to evaluate the performance of these algorithms, two planar steel frame examples from the literature were used. The results obtained were compared with the Conventional Design (CD) approach and other optimization algorithms such as Ant Colony Optimization (ACO), Genetic Algorithm (GA) and Charged System Search (CSS). The comparative analyses conducted focused on basic performance criteria such as minimum structural weight and number of analyses. The findings revealed that the MC-TLBO algorithm produces superior design results compared to CD, ACO, GA and CSS methods and is an effective optimization approach.

Keywords: Static pushover analysis; Performance-based design; Steel frames; Optimum seismic design; TLBO algorithm, JA algorithm, MC-TLBO algorithm

Giriş

Performansa dayalı optimum sismik tasarım, bir yapının hedeflenen performans seviyesini karşılayacak şekilde en hafif çerçeve elemanlarından tasarlanmasını amaçlamaktadır. Performansa dayalı sismik tasarım felsefesi, özellikle Amerika Birleşik Devletleri'nde Northridge (1994) ve Japonya-Kobe (1995) depremleri sonrasında önem kazanmıştır. Bu depremler sonrasında mevcut yönetmeliklere göre tasarlanmış yapıların, beklenenden çok daha fazla hasar gördüğü anlaşılmış ve

bu durum yeni tasarım yaklaşımlarının geliştirilmesine neden olmuştur. Bu gelişmeler, Performansa Dayalı Sismik Tasarım (PBSD) felsefesinin ortaya çıkmasını sağlamıştır.

Yapıların performansa göre tasarımında deprem düzeyleri ve depremden sonra yapıdan beklenen performans düzeyleri belirlenmiştir. Bir yapının performans seviyesi, belirli deprem düzeyleriyle ilişkilendirilmiştir. 50 yıllık bir süre zarfında gerçekleşme olasılığı %50 olan depremler hafif şiddetli (SE), %10 olasılıkla gerçekleşenler orta şiddetli (tasarım

depremi) (DE) ve %2 olasılıkla meydana gelenler ise çok şiddetli (ME) olarak sınıflandırılmaktadır. Genel olarak; hafif depremlerden sonra yapının “hemen kullanım” (IO), orta şiddetli bir depremlerden sonra “can güvenliği” (LS) ve çok şiddetli bir depremlerden sonra “göçmenin önlenmesi (CP) performans seviyesini sağlaması beklenmektedir [1].

PBSD alandaki öncü çalışmalar SEAOC VISION 2000 [2] ile başlamış ve ATC40 [3], FEMA 273 [4], FEMA 356 [5] ve FEMA 440 [6] gibi kılavuzlarla geliştirilmiştir. Bu çalışmalar, günümüzde ASCE [7] gibi yönetmeliklerde yer bulmuştur.

Çelik çerçevelerin performans dayalı deprem tasarımı (PBSD) konusunda yapılan çalışmalarda, Hasan ve ark. [8] Geleneksel Tasarım (CD) adı altında Statik İtme Analiz yöntemini önermiştir. Bu yöntemde, yapıya uygulanan yanal yükler ters üçgen biçimde artırılarak, göçme öncesi performans seviyesine karşılık gelen hedef yanal yer değiştirme değerine ulaşmaya kadar analiz devam ettirilmiştir [9]. Araştırmacılar, bu çalışmada kuvvete ve yer değiştirmeye dayalı doğrusal olmayan analiz yöntemlerini, dinamik analiz yöntemleri ile karşılaştırmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda yer değiştirme ve kuvvete dayalı analiz yöntemlerinin dinamik analize göre daha yakın sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur [10-13].

Son dönemde sezgisel ve meta-sezgisel optimizasyon yöntemleri de bu alanda yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında Genetik algoritma (GA) [14], Karınca Koloni Algoritması (ACO) [15], Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) [16], Çarpışan Cisimler Optimizasyonu (CBO) [17] Yükleilmiş Sistem Arama (CSS) [18] ve Ateş Böceği Algoritması (FA) [19] yer almaktadır.

Kaveh ve ark. [20], ACO algoritmasını kullanarak çelik çerçevelerin performans dayalı optimum sismik tasarımı için bir yöntem sunmuşlardır. Bu yöntemin etkinliğini göstermek adına, 3 katlı 4 açıklıklı ve 9 katlı 5 açıklıklı moment çerçeveleri üzerinde GA ile karşılaştırmalı çalışmalar yapılmıştır. Gholizadeh ve ark. [21] ise GA, ACO ve Harmoni Arama (HS) yöntemleri ile PSO yöntemini karşılaştırmış ve PSO ile daha hafif çerçeve tasarımları elde edildiğini göstermiştir. Talatahari ve ark. [22], hibrid CSS yöntemini bu alana uyarlamış; Veladi [23] ise CBO ile elde edilen sonuçları, CSS, ACO, GA ve PSO ile karşılaştırmıştır. Kaveh ve Nasrollahi [24] CSS yöntemini üç farklı çelik çerçeve örneğinde test etmiş, Mohammadi ve Ghasemof [25] ise hızlı yakınsama eğrisine sahip bir CSS yöntemi önermiştir.

Gholizadeh ve Moghadas [21] ayrıca Quantum PSO (QPSO) ve geliştirilmiş IQPSO yöntemlerini çelik çerçeve tasarımında denemiştir. Mohammadi ve Sharghi [26] dış merkezli çaprazlı çelik çerçeveler için pratik bir yöntem sunarken, Gholizadeh [27] modifiye FA (MFA) algoritmasını ileri ardışık dalgali ve geri yayımlı ardışık sinir ağı modeli (WCFBP) ile kullanarak analiz süresini azaltmayı hedeflemiş ve MFA'nın FA'ya göre daha etkin sonuçlar verdiğini göstermiştir. Mansouri ve ark. [28]

merkezi çaprazlı çerçeveler için optimum sismik tasarımı gerçekleştirmiştir.

Son olarak, çok yeni bir meta-sezgisel yöntem olan Okul Tabanlı Optimizasyon (SBO), ilk kez çelik çerçevelerin performansa dayalı optimum sismik tasarımı için kullanılmış ve tüm test problemlerinde, TLBO ve diğer yöntemlere göre daha az hesaplama çabasıyla daha hafif tasarımlar sunduğu gözlemlenmiştir [29–31]. Bu çalışmada ise çelik çerçevelerin optimum sismik tasarımı MC-TLBO algoritması kullanılarak yatay yer değiştirme ve plastik sınırlayıcıları sağlayan bir algoritma önerilmiştir. Analizler sonucunda hem analiz sayısı hem de ağırlık bakımından en uygun tasarımlar elde edilmesi amaçlanmıştır.

MATERYAL ve YÖNTEM

Performansa Dayalı Sismik Tasarım

Çelik çerçevelerin algoritmalara dayalı optimum sismik tasarımı için MATLAB programlama dili ile OpenSees yapı analiz programı etkileşimli şekilde kullanılmıştır. Bu kapsamda, performansa dayalı sismik analiz için statik itme analizine (pushover analizi) dayalı deplasman katsayıları yöntemi tercih edilmiştir. Analiz süreci OpenSees programı aracılığıyla gerçekleştirilmiş, elde edilen analiz verileri MATLAB ortamına aktarılmıştır.

Yapı davranışının en gerçekçi şekilde belirlenmesini sağlayan yöntem zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz olsa da bu çalışmada daha pratik ve mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan Statik İtme Analizi tercih edilmiştir. FEMA-440 [6] kılavuzunda tanımlanan doğrusal olmayan Statik İtme Analizi yöntemi, yapı kapasite eğrisinin elde edilmesinde kullanılmıştır.

Malzemenin doğrusal-elastik olmayan davranış özelliklerinin modellenmesi için doğrusal olmayan malzeme tanımı esas alınmıştır. Plastikleşme bölgelerinin modellenmesinde, yoğunlaştırılmış plastisite ve sonlu uzunluktaki mafsallı bölge modelleri yerine, fiber kesit modeli tercih edilmiştir. Bu model, plastik mafsallı davranışını daha gerçekçi biçimde yansıttığının yanı sıra, bu çalışmada kullanılan karşılaştırmalı örneklerde de yaygın olarak kullanıldığından dolayı tercih edilmiştir.

Yapının performans değerlendirmesi, her kat hizasında hesaplanan göreceli kat ötelenme oranları ve plastikleşme bölgeleri esas alınarak, belirli tehlike seviyeleri altında gerçekleştirilmiştir.

Performansa Dayalı Sismik Tasarım (PBSD) kapsamında spektral ivme grafiğinin elde edilmesi için öncelikle düşey yük kombinasyonları altında yapının statik analizi yapılmış ve birinci doğal titreşim periyodu belirlenmiştir. Bu analizde kullanılan düşey yükleme durumu, (Q_G^{SC}) şeklinde tanımlanmış ve analiz sürecinin temel girdilerinden biri olmuştur:

$$Q_G^{SC} = \begin{cases} Q_D \\ Q_D + Q_L \\ 1.4Q_D \\ 1.2Q_D + 1.6Q_L \end{cases} \quad (1)$$

Burada, Q_D ve Q_L sırasıyla ölü ve hareketli yükü göstermektedir.

Statik analiz sonucunda elde edilen birinci doğal titreşim periyoduna (T) bağlı olarak her bir performans seviyesinde tasarım spektrumu için spektral ivme (S_a) şu aşağıdaki gibi hesaplanır [7].

$$S_a^i = \begin{cases} S_{XS}/B_S (0.4 + 3 T/T_0^i) & \text{if } 0 < T \leq 0.2T_0^i \\ S_{XS}/B_S & \text{if } 0.2T_0^i < T \leq T_0^i \\ S_{X1}/(B_1 T) & \text{if } T > T_0^i \end{cases} \quad (2)$$

$$S_{XS} = F_a S_S^i \text{ ve } S_{X1} = F_v S_i^i \quad i=IO, LS, CP \quad (3a)$$

$$T_0^i = (S_{X1} B_S)/(S_{XS} B_1) \quad i=IO, LS, CP \quad (3b)$$

Burada, S_S^i ve S_i^i sırasıyla i 'ci performans seviyesi için kısa ve 1.0 sn'lik spektral ivme (S_a) katsayılarıdır. F_a , F_v sırasıyla S_S^i ve S_i^i katsayılarına bağlı olarak kısa ve 1.0 sn periyot (yerel zeminlere göre belirlenen) katsayılarıdır. Deprem Tehlike seviyesi, zemin sınıfı, lokal koordinatlara bağlı olarak ABD Jeoloji Araştırmaları Kurumu internet sitesinden alınır. T_0^i , tasarım spektrumunun sabit hızlanma ve sabit hız bölgelerinin aşağıdaki gibi kesiştiği periyottur: bu çalışmada S_S^i ve S_i^i değerleri [1] den alınmıştır.

Bu çalışmada kullanılan analiz yöntemi statik itme analizi; elastik sınır ötesindeki yapı kapasitesini tahmin etmek için kullanılan doğrusal olmayan analiz yöntemidir. Bu yöntemde; sabit düşey yükler ile beraber yatay yüklerin yapıya adım adım artırılarak uygulanması prensibine dayanmaktadır. Her adımda değişen rijitlik değerleri hesaba katılarak kuvvet ve deplasman ilişkisi belirlenmektedir. Statik itme analizinde kullanılan hesaplama yöntemlerine esas alınacak eleman davranışları şu şekildedir [2]; Kuvvet kontrollü davranış ve deformasyon kontrollü davranıştır. Kuvvet kontrollü davranışta eleman dayanımları izin verilen dayanım değerlerinden küçük olmalıdır. Deformasyon kontrollü davranışta ise eleman deformasyonları izin verilen deformasyon değerlerini aşmamalıdır. Bu çalışmada çelik sünek bir malzeme olduğundan dolayı hesaplamalar deformasyon kontrollü davranış esas alınarak yapılmıştır. Statik itme analizinde; hedef yer değiştirme değerinin 1.5 katına ulaşıncaya kadar sabit düşey yükler altında yanal yükler monoton olarak artırılır. Her performans seviyesi için hedef deplasman; tasarım depreminde olması muhtemel en büyük deplasman olup deplasman katsayıları yöntemiyle aşağıdaki denklemle hesaplanır: Yer değiştirmeye dayalı yöntemde kapasite eğrisinin elde edilmesi ve yapı performansının değerlendirilmesi için hesaplanan hedef deplasman değeri (δ_t) şu şekildedir [3].

$$\delta_t^i = C_0 C_1 C_2 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g \quad i = IO, LS, CP \quad (4)$$

Burada, C_0 , yapının tepe yer değiştirmesini spektral yer değiştirme ile ilişkilendiren katsayıyı, C_1 : Doğrusal davranış ile doğrusal olmayan davranış arasında bağlantıyı sağlayan katsayıyı, C_2 : Histeristik şeklin yapı üzerindeki davranışını gösteren katsayıyı, S_a^i : i -ninci performans seviyesi için yapının efektif birinci doğal periyoduna (T_e) karşılık gelen spektral ivme (S_a) değeridir.

Hedef deplasman hesabı için gerekli olan efektif birinci temel periyodu şu şekilde hesaplanır:

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} \quad (5)$$

Burada, T_i : Yapının elastik temel periyodu, K_i : Yapının elastik rijitliği, K_e : Yapının elastik efektif rijitliğini gösterir.

Hedef deplasman değerinin hesabında kullanılan katsayılarla ilişkin detaylı bilgiler FEMA-440 [3]'dan alınmaktadır.

Statik itme eğrisinin elde edilmesi için kullanılan sabit düşey yükleme (Q_G^{PBD}) aşağıdaki şekildedir:

$$Q_G^{PBD} = 1.1(Q_D + Q_L) \quad (6)$$

Bu denklemde azaltılmamış hareketli yükün %25'i göz önüne alınmaktadır [2].

Doğrusal olmayan statik itme analizinde sismik kuvvetlerin yatay dağılımı şu denklemle ifade edilir [2].

$$C_{vx} = \left(\frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^{ns} w_i h_i^k} \right) \quad (7)$$

Bu denklemde: ns binadaki kat sayısını göstermektedir. H_s toplam yapı yüksekliğini, H_m m 'nci katın temelden yüksekliğini, G_s yapının toplam sismik ağırlığını, G_m m 'nci her kat için sismik ağırlığını, k yapının periyoduna bağlı bir katsayı (bu çalışmada $k=2$ olarak alınmıştır) ve C_{vx} yatay yüklemelerin dağıtım katsayısını göstermektedir.

Yapılara etki eden yanal yük modelleri 1. moda bağımlı olarak; Dikdörtgen, Ters üçgen ve Parabolik şeklindedir. Yük modelleri, bir tasarım depremindeki atalet kuvvetlerinin dağılımını temsil etmek için kullanılır. Atalet kuvvetlerinin dağılımının depremin şiddeti (elastik olmayan şekil değiştirmelerin büyüklüğü) ve depremin süresiyle değişeceği açıktır. Sabit yük modeli yapı davranışı, yapı yüksek mod etkilerinin tesirinde kalmıyorsa ve lokal bir akma mekanizması meydana geliyorsa kullanılabilir. Aksi taktirde uzun periyotlu yapılarda ($T > 2.5$ sn) sabit yük modeli statik itme analizinde yanlış sonuçlara sebep olmaktadır [4].

Statik itme analizinde deplasman kontrollü ve kuvvet kontrollü analiz olmak üzere iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Deplasman kontrollü yöntemde, yapının en üst kat ağırlık merkezinin yanal deplasman değeri, δ_t hedef deplasman değerinin 1.5 katına ulaşıncaya kadar iteratif artan yanal yük (C_{vx}) uygulanmaktadır. Kuvvet kontrollü yöntemde ise yapı belli bir yanal yük değerine ulaşıncaya kadar yanal yük iteratif şekilde artırılır. İteratif şekilde artırılan yanal yüklemenin her bir adımının sonunda yapının tepe noktası deplasmanı ile taban kesme kuvveti değerleri kullanılarak statik itme eğrisi (kapasite eğrisi) çizilir. Statik itme analizi sonucunda, kapasite eğrisi, yanal yer değiştirme, görelî ötelenme (katlar arası) oranı ve elemanlarda meydana gelen plastikleşme oranları elde edilir.

Her performans seviyesi için hesaplanan hedef yer değiştirme değerlerinin kapasite eğrisiyle kesiştiği noktalara performans noktaları adı verilir. Bu noktaların yer değiştirme değerleri yönetmelikte verilen her bir performans seviyesine ait yer değiştirme sınır değerleri ile karşılaştırılarak yapının deprem tehlike seviyelerine

karşılık gelen performans seviyeleri belirlenmektedir. Bu şekilde öngörülen deprem etkisi altındaki performans hedefinin gerçekleşip gerçekleşmediği kontrol edilir. Her performans seviyesi için elde edilen hedef deplasman değerlerinin kapasite eğrisinde tepe deplasmanını kestiği noktalara performans noktaları denir. Eğer bu noktalar izin verilen performans değerlerini aşmıyorsa yapı performansı güvenle sağlanmaktadır.

Performans seviyeleri için izin verilen katlar arası ötelenme oranı yüzde olarak performans seviyelerine bağlı olarak; IO performans seviyesi: $d_{all}^{IO} < 0.7$, LS performans seviyesi: $0.07 < d_{all}^{LS} < 2.5$, CP performans seviyesi: $2.5 < d_{all}^{CP} < 5$ verilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan moment aktaran çelik çerçevelerin performansa dayalı optimum sismik tasarım algoritması aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır:

Adım 1. Yapı geometrisi, malzeme modelinin ve zemin sınıfının tanımlanması.

Adım 2. Eleman en kesitlerinin atanması.

Adım 3. (1) denklemi ile verilen yükleme durumları (Q_G^{SC}) için doğrusal statik analizin OpenSees [5] yapı analiz programınca icra edilmesiyle, 1. temel periyodun (T) elde edilmesi.

Adım 4. Deprem tehlike seviyesine karşı gelen performans seviyesinin atanması.

Adım 5. Zemin sınıfına ve lokal koordinatlara bağlı olarak deprem tehlike haritalarından her performans seviyesi için S_5^i ve S_1^i değerlerinin tespit edilmesi ($i=IO, LS, CP$)

Adım 6. S_5^i ve S_1^i değerlerine bağlı olarak F_a ve F_v değerlerinin belirlenmesi.

Adım 7. (2) denklemi ile köşe periyodun (T_0^i) ve spektral ivmenin (S_a^i) hesaplanması.

Adım 8. Hedef deplasman değerinin hesaplanması için C_0, C_1, C_2 ve C_3 katsayı değerlerinin FEMA 356'dan [6] alınması.

Adım 9. (4) ve (3) denklemleri ile sırasıyla efektif temel periyodun (T_e) ve hedef deplasman değerlerinin (δ_t^i) hesaplanması.

Adım 10. Statik itme analizi için (5) denklemiyle sabit düşey yüklemenin verilmesi ve parabolik değişen yatay yükleme modelinin (C_{vx}) (6) denklemiyle hesaplanması.

Adım 11. Şekil 2'de verilen malzeme bakımından Doğrusal olmama etkilerini içeren bi-doğrusal malzeme modelinin tanımlanması, geometri bakımından Doğrusal olmama etkilerini içeren II. mertebe etkilerinin tanımlanması.

Adım 12. Tepe kontrol noktasının ulaşabileceği en büyük yanal deplasman değeri olarak göçme öncesi performans seviyesi için hesaplanan hedef deplasmanın (δ_t^{CP}) 1,5 katı olarak tanımlanması.

Adım 13. Tepe kontrol noktasının alabileceği en büyük deplasman değerine ulaşıncaya kadar monoton değişen deplasman artım adım sayısının (st) tanımlanarak (bu çalışmada $st=1000$ alınmıştır) OpenSees'de statik itme analizinin icra edilmesi.

Adım 14. 12. adımda açıklanan her deplasman artımında yapılan statik itme analizi sonunda hesaplanan taban kesme kuvvetleri ile statik itme eğrisi elde edilir.

Adım 15. Kapasite eğrisi idealleştirilerek her performans seviyesine karşı gelen hedef deplasman değeri yapı kapasite eğrisi üzerinde tespit edilerek performans noktaları belirlenir.

Adım 16. Performans noktalarının (7) denklemiyle verilen sınır değerlerini sağlıyorsa yapı performansı hedeflenen performans seviyelerini sağlıyorsa Adım 17'ye git, hedeflenen performans seviyelerini sağlamıyorsa Adım 2'ye git.

Adım 17. (8) ve (9) denklemleriyle yapılan plastik dönme kontrollerinin sağlanıyorsa performans dayalı sismik tasarımı bitir, aksi halde Adım 2'ye git.

Optimum Tasarım Modelleme Süreci

Amaç fonksiyonu şu şekilde ifade edilir:

$$\min W(I) = \sum_{k=1}^{ng} \rho_k A_k \sum_{j=1}^{nm} L_j \quad (8)$$

$$I = \{I_1, I_2, \dots, I_{ng}\}, \quad I_p = \{i_1, i_2, \dots, i_{pro}\}.$$

Burada $W(I)$ tüm çerçeve ağırlığı, ng çerçevenin eleman grup sayısını, ρ_k k -nıncı eleman grubunun özgül ağırlığını ve A_k k -nıncı en kesit alanı, nm k -nıncı gruptaki eleman sayısı, L_j j -inci eleman uzunluğu, $I = \{I_1, I_2, \dots, I_{ng}\}$ optimum tasarımda elde edilen bir tasarım ve I_k k -nıncı eleman grubuna ait en kesit alanını gösterir. Her bir eleman grubu hazır çelik profil listelerinden alınan AISC-W tipi bir profili temsil etmektedir.

Ceza amaç fonksiyonu, $\varphi(I)$ ile ifade edilmektedir.

$$\varphi(I) = W(I)(1 + g^i(I)^w) \quad i=IO, LS, CP \quad (9)$$

Burada w ceza katsayı olup bu çalışmada 2 alınmıştır [20]. $g^i(I)$ ise i 'ninci performans seviyesine ait sınırlayıcı ihlal ifadesi olup aşağıdaki olduğu gibi ifade edilmektedir.

$$g^i(I) = \sum_{j=1}^{nm} g(I)_{\sigma,j} + g(I)_{d,l}^i \quad i=IO, LS, CP \quad (10)$$

$$j=1,2,\dots,nm \quad l=1,2,\dots,ns$$

Burada, ns çerçevedeki kat sayısını gösterir [29]. $g(I)_{\sigma,j}$ ve $g(I)_{d,l}^i$ dayanım ve göreceli ötelenme (katlar arası) oranı sınırlayıcıları için ihlal değerleri olup aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$g(I)_{\sigma,j} = \begin{cases} 0 & \text{eğer } g(I)_{\sigma,j} \leq 0 \\ g(I)_{\sigma,j} & \text{eğer } g(I)_{\sigma,j} > 0 \end{cases} \quad (11a)$$

$$g(I)_{d,l}^i = \begin{cases} 0 & \text{eğer } g(I)_{d,l}^i \leq 0 \\ g(I)_{d,l}^i & \text{eğer } g(I)_{d,l}^i > 0 \end{cases} \quad (11b)$$

Dayanım sınırlayıcıları denklemleri şu şekildedir.

$$\frac{P_u}{\varphi_c P_n} < 0.2 \text{ ise } g_{\sigma,j}(I) = \left[\frac{P_u}{2\varphi_c P_n} + \left(\frac{M_{u1}}{\varphi_b M_{n1}} + \frac{M_{uy}}{\varphi_b M_{ny}} \right) \right] - 1 \leq 0 \quad j=1,2,\dots,nm \quad (12a)$$

$$\frac{P_u}{\varphi_c P_n} \geq 0.2 \text{ ise } g_{\sigma,j}(I) = \left[\frac{P_u}{2\varphi_c P_n} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{u1}}{\varphi_b M_{n1}} + \frac{M_{uy}}{\varphi_b M_{ny}} \right) \right] - 1 \leq 0 \quad j=1,2,\dots,nm \quad (12b)$$

Burada, M_{ux} ve M_{uy} sırasıyla x ve y eksenindeki eğilme momentini, M_{nx} ve M_{ny} x ve y ekseninde hesap edilen eğilme dayanımını, P_u eksenel basınç yükünü, P_n hesaplanan basınç dayanımını gösterir. φ_c eksenel

basınca maruz elemanlar için dayanım katsayısı olup 0.85 alınır ve ϕ_b eğilmeye maruz elemanlar için dayanım katsayısı olup 0.90 alınır.

Katlar arası görelî ötelenme (katlar arası) oranı sınırlayıcı fonksiyonu;

$$g(I)_{d,l}^i = \frac{d_l^i}{d_{all}^i} - 1 \leq 0 \quad i=IO,LS,CP ; l=1,2,...,ns \quad (13)$$

Burada, d_l^i i-inci performans seviyesinde l-ninci kattaki IO, LS ve CP seviyesinde, d_{all}^i i-inci performans seviyesi için izin verilen maksimum katlar arası ötelenme oranı olup tüm performans seviyeleri için sırasıyla %0.7 %2.5, ve %5.0 olarak verilmiştir [7].

JA Kullanılarak Çelik Çerçevelerin Performansa-Dayalı Optimum Sismik Tasarımı

Jaya algoritması (JA) Rao tarafından icat edildi. JA algoritmasının uygulanışı çok pratik ve basittir. Bu Algoritma bir çok sınırlayıcı sız ve sınırlayıcı optimizasyon problemlerinde kullanıldı [8]. İlk icat edildikten sonra hemen uygulamanın basit olması nedeni ile birçok çalışmada kullanıldı [9, 10].

JA kelime olarak Zafer anlamına gelmektedir. Bu Algoritma arama işlemi süresince en kötü çözümden uzaklaşarak en iyi çözüme yaklaşma prensibine dayanmaktadır. JA algoritmasının diğer bir özelliği ise algoritmaya özel parametreler kullanmaz. Her algoritmada olduğu gibi popülasyon sayısı (ps) ve maksimum iterasyon sayısı (it_{max}) kullanılmaktadır.

$$I_{ng}^{ps} = I_{min} + rand(ng) * (I_{max} - I_{min}) \quad (14)$$

JA algoritmasının diğer önemli bir özelliği de tasarım değişkenlerini modifiye edecek tek bir denklemi vardır. Bu özelliği sayesinde uygulanması basittir. k-nıncı çerçeve değişkeni için I_k^i i-inci çerçeve aşağıdaki şekilde değiştirilir.

$$I_k^{i,yeni} = I_k^i + r_{1,k}(I_k^{en iyi} - [I_k^i]) - r_{2,k}(I_k^{en kötü} - [I_k^i]) \quad (15)$$

Burada, $I_k^{i,yeni}$ yeni çerçeve değişkeni, $r_{1,k}$ ve $r_{2,k}$ [6] k-nıncı çerçeve değişkeni için rastgele üretilen rastgele sayılar, $I_k^{en iyi}$ ve $I_k^{en kötü}$ bir iterasyonda üretilen en iyi ve en kötü k-nıncı değişkenini ifade etmektedir. Bu denklemde, $r_{1,k}(I_k^{en iyi} - [I_k^i])$ ifadesi en iyi çerçeveye yaklaşma eğilimini gösterirken, $r_{2,k}(I_k^{en kötü} - [I_k^i])$ ifadesi ise en kötü çerçeveden ıraksama eğilimini göstermektedir. $r_{1,k}$ ve $r_{2,k}$ rastgele sayılar çerçeve uzayında daha etkili arama olayını sağlamaktadır. $[I_k^i]$ mutlak değer, arama yeteneğini geliştirme yeteneği sağlar [8]. Tüm çerçeve değişkenleri değiştirildikten sonra yeni çerçeve değişkenleri eski çerçeve değişkenleri ile karşılaştırılır. Eğer yeni çerçeve değişkeninin cezalandırılmış amaç fonksiyon değeri önce çerçeve değişkeninin cezalandırılmış amaç fonksiyon değerinden küçük ise yeni çerçeve değişkeninin yerini alır. JA ile tüm çerçeve değişkenleri değiştirildikten sonra bir adet iterasyon için döngü tamamlanmış olmaktadır. Maksimum döngü sayısı aşıldığında arama işlemi sonlandırılır. Özet olarak, JA aşağıdaki Adımlardan

oluşur: (i) Algoritmayı başlatmak, (ii) mevcut çerçeveleri değiştirmek ve yeni çerçeveleri elde etmek (iii) mevcut çerçeveleri yenileriyle değiştirmek (iv) arama işlemini sonlandırır.

JA kullanılarak moment dirençli çelik çerçevelerin performansa dayalı optimum sismik tasarım formülasyonu aşağıda adım adım açıklanmıştır.

Adım 1: Ja algoritmanın başlatılması

Sensivite analizi yapılarak popülasyon sayısı (ps), maksimum döngü sayısı (it_{max}) belirlenir. Çerçevenin grup sayısı (ng) [29] da verilmiştir. Ayırık değişkenli çelik çerçeve listesinden rastgele olarak ps satır ve ng sütundan oluşan bir matris ile kesitler seçilir. JA için seçilen kesitler matris formunda aşağıda verilmiştir;

$$Pop = \begin{bmatrix} I_1^1 & I_2^1 & \dots & \dots & I_{ng}^1 \\ I_1^2 & I_2^2 & \dots & \dots & I_{ng}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ I_1^{ps-1} & I_2^{ps-1} & \dots & \dots & I_{ng}^{ps-1} \\ I_1^{ps} & I_2^{ps} & \dots & \dots & I_{ng}^{ps} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Bu matristeki her satır rasgele oluşturulmuş bir çelik tasarımını belirtir, I_k^i , i-inci çelik çerçevenin k-nıncı gruptaki elemanıdır. I^i -inci çelik çerçeve vektörüdür. (I^i), çerçevenin hesaplanan amaç ceza fonksiyonudur. Bu değerler denklem (1)-(15) kullanılarak hesaplanmaktadır. it_{max} , optimizasyon işleminde kullanılan maksimum döngü sayısıdır. Bu döngü sayısı $it=0$ olarak ayarlanır. Her adımda artırılarak maksimum döngü sayısına kadar artırılır.

Adım 2: Döngü sayısını artır, $it=it+1$.

Adım 3: En iyi ve en kötü çerçevenin belirlenmesi

Popülasyondaki en iyi $\phi(I^{min})$ ve en kötü $\phi(I^{max})$ çerçeveler belirlenir. Başlangıç çerçeve sayacı $id=0$, ($id=1,2, \dots, np$).

Adım 4: Çerçeve sayısını artır, $id=id+1$

Adım 5: Yeni çerçevelerin oluşturulması

Dördüncü çerçevenin tüm çerçeve değişkenlerini Denklem (20) tarafından id-inci çerçeveyi değiştirerek yeni çerçeveyi oluşturun. Eğer $W(I^{i,yeni}) < W(I^i)$ veya önceki çerçeve uygunsuzsa Denklem (1)-(15) yardımı ile yeni çerçeveyi cezalandırılmış amaç fonksiyonunu $\phi(I^{i,yeni})$ hesapla, aksi taktirde Adım 4'e git. Eğer $\phi(I^{i,yeni}) < \phi(I^i)$, id-inci çerçeve değişkeninin yerine yeni çerçeveyi yaz, aksi taktirde id-inci çerçeveyi değiştirme.

Adım 6: Eğer $id > np$, Adım 7'ye git, aksi taktirde Adım 4'e git.

Adım 7: JA nın sonlandırılması

Eğer $it > it_{max}$, çerçeve optimum çerçeve olarak kısıtlama ihlali olmadan minimum amaç fonksiyon değeri ile atayın ve optimizasyon işlemini sonlandırın, aksi takdirde Adım 2'ye gidin.

TLBO Kullanılarak Çelik Çerçevelerin Performansa-Dayalı Optimum Sismik tasarımı

Optimizasyon; sınırlayıcılar altında en iyi sonucu bulmaya yönelik yapılan çalışmadır. Son geliştirilen

sezgisel optimizasyon yöntemlerinden biriside Öğretme-öğrenme esaslı optimizasyon yöntemi (TLBO) algoritmasıdır[11]. TLBO'nun, sınırlayıcı ve sınırlayıcısız optimizasyon problemlerinde etkin olduğu belirlenmiştir. TLBO farklı mühendislik çerçevelerinin optimizasyonuna uygulanmıştır [12-14].

TLBO öğretmen-öğrenci etkileşimlerinden ilham alınarak karmaşık problemlerin optimizasyonunu gerçekleştirmek için geliştirilen bir optimizasyon yöntemidir.

Herhangi bir sınıf, öğretmen ve öğrencilerden oluşan topluluk olarak düşünülebilir. Bir sınıftaki ortalama başarı durumunun öğretmenin bilgi ve tecrübesiyle bağlantılı olduğu söylenebilir. Bununla birlikte öğretmen ne kadar bilgili ve tecrübeli olursa olsun sınıftaki öğrencilerin de öğretmen tarafından kendilerine aktarılan bilgileri özümseyebilecek kapasitede olmaları gereklidir. Sonuç olarak, öğretmenin kalitesi ve öğrencilerin kapasitesi arasında sürekli bir etkileşim bulunmaktadır.

Öğretmen bilgisini öğrencileriyle paylaşarak dersi en iyi şekilde öğretmeye çalışmaktadır. Dolayısıyla sınıfın başarı durumu direkt olarak öğretmenin bilgi ve becerisine bağlıdır. Her öğretmen sınıfının başarısını arttırmayı amaçlamakla birlikte bu durum öğretmen tarafından öğrencilere aktarılan bilginin kalitesinin yanında sınıftaki öğrencilerin kalitesine de bağlıdır [13]. Bu durumda öğretmen kalitesi ve öğrenci başarısı arasında sürekli bir etkileşim olduğunu göstermektedir ve bu şekilde öğretmenin (aynı zamanda sınıfın) başarısının sürekli olarak artırılması sağlanır.

TLBO'nun ayırt edici özelliği, diğer sezgisel optimizasyon yöntemleri kendilerine özgü parametreler kullanırken, TLBO bu tip parametrelere ihtiyaç duymadan sadece popülasyon sayısı (ps) ve maksimum iterasyon sayısı (it_{max}) gibi genel kontrol parametrelerini kullanmasıdır.

Adım 1: TLBO algoritmasının başlangıcı

Popülasyon sayısı (ps), maksimum iterasyon sayısı (it_{max}) ve gruplara bölünen çerçevenin grup sayısı (ng) belirlenir. Ayrık değişkenli çelik çerçeve listesinden rast gele olarak ps satır ve ng sütundan oluşan bir matris ile kesitler seçilir. TLBO için seçilen kesitler matris formunda denklem 16 da verilmiştir.

Adım 2: Döngü sayısını arttır, $it=it+1$.

Adım 3: Öğretme aşaması

Cezalandırılmış çelik çerçevenin en küçük amaç fonksiyonu $\varphi(I^{min})$, değerini elde etmek için kullanılan kesitleri öğretmen olarak ata $I_{\text{öğretmen}} = I^{min}$. Öğretmen, sınıf ortalamasını ileriye götürmeyi hedeflemektedir, bu amaçla, TLBO'da I^i çerçeve yeniden üretilir ve yeni çerçeve, $I^{i,yeni}$ şu şekilde elde edilir:

$$I^{i,yeni} = I^i + rand(I_{\text{öğretmen}} - T_f I_{\text{ortalama}})$$

Burada $rand$ 0 ve 1 aralığında random sayıları, T_f öğretim faktörü olup 0 veya 1 olarak rastgele seçilir. I_{ortalama} çerçeve popülasyonundaki aynı grup olarak isimlendirilen kesitlerin ortalama değeridir. Hesaplaması aşağıda verilmiştir:

$$I_{\text{ortalama}} = \left[m \left(\text{pop} \left(\sum_{i=1}^{ps} I_1^i \right) \right), m \left(\text{pop} \left(\sum_{i=1}^{ps} I_2^i \right) \right), \dots \right. \\ \left. \dots, m \left(\text{pop} \left(\sum_{i=1}^{ps} I_{ng}^i \right) \right) \right]$$

Burada $m(\text{pop}(.))$ i'den np'ye kadar çerçeve değişkenlerinin ortalaması, $\varphi(I^{i,yeni})$ denklem (1) – (15) kullanılarak hesaplanan yeni çerçevenin cezalandırılmış amaç fonksiyonudur. eğer $\varphi(I^{i,yeni}) < \varphi(I^i)$ ise yeni çerçevenin cezalandırılmış amaç fonksiyonu $\varphi(I^{i,yeni})$ popülasyona dahil edilerek önceki atılır. Aynı zamanda $I^i = I^{i,yeni}$ olacak şekilde yeni kesitler eski kesitlerin yerini alır.

Adım 4: Öğrenme aşaması

Öğrenme aşamasında döngü sayacı $lp=0$ olarak ayarlanır.

Adım 5: $lp=lp+1$.

Adım 6: i-inci ve j-inci çerçeve arasındaki öğrenme süreci aşağıdaki denklemlerde verilmiştir.

$$I^{i,yeni} = I^i + rand(I^i - I^j) \text{ if } \varphi(I^i) < \varphi(I^j) \\ I^{i,yeni} = I^j + rand(I^j - I^i) \text{ if } \varphi(I^j) < \varphi(I^i)$$

Burada, I^i ve I^j , sırasıyla popülasyonda rasgele seçilen çelik çerçevelerdir. $\varphi(I^{i,yeni})$ değerini hesaplayıp; $\varphi(I^{i,yeni})$, $\varphi(I^i)$ 'den küçükse, yeni çerçeve öncekiyle değiştirilir.

Adım 7: Eğer $lp > ps-1$, ise Adım 8'e git, değil ise Adım 5'e git.

Adım 8: Eğer $it > it_{max}$, ise Adım 9'a git, değil ise Adım 2'ye git.

Adım 9: TLBO'yu sonlandırma kriteri

Arama işlemini sonlandırın ve minimum ağırlık çerçevenin kısıtlama ihlali olmadan, $\varphi(I^{opt}) = \varphi(I^{min})$ olarak optimum çerçeveye atayın.

MC-TLBO Kullanılarak Çelik Çerçevelerin Performansa-Dayalı Optimum Sismik Tasarımı

Frekans kısıtlamalarıyla kafes çerçevelerinin optimizasyonu için çok sınıflı öğretim-öğrenme tabanlı bir yöntem ilk kez Farshchin ve arkadaşları tarafından önerilmiştir. Bu önerilen çok sınıflı yaklaşım, optimizasyon sürecinin başında keşif yeteneğini artırarak daha verimli bir arama yapılmasını sağlar. MC-TLBO, eğitim süreci konseptini tek bir sınıf yerine birden fazla paralel sınıf içeren bir okula benzettir. MC-TLBO algoritması, iki aşamalı bir prosedürle çalışır: İlk aşamada, paralel sınıflar arama alanını keşfeder; ikinci aşamada ise, ilk aşamanın en iyi çözümleri, değiştirilmiş bir TLBO algoritması için başlangıç popülasyonu oluşturacak bir süper sınıf içinde birleştirilir [15].

Bu çalışmada önerilen MC-TLBO, standart TLBO'nun iki önemli yönüyle farklılık gösterir. İlk fark, MC-TLBO'da öğrenme aşamasındaki çerçeve sayısı ile ilgilidir. Standart TLBO algoritmasında her yinelemede

popülasyon iki kez değiştirilir. İlk değişiklik, öğretmenin (yani en iyi çerçevenin) öğretim aşamasında güncellenmesiyle yapılır. İkinci değişiklik ise, rastgele seçilen iki çerçevenin birleştirilmesiyle öğrenme aşamasında gerçekleşir. Ancak, bu sınırlı değişim yaklaşımının optimizasyon sürecinde yakınsamayı yavaşlattığı gözlemlenmiştir. Bu sorunu çözmek ve arama sürecini hızlandırmak amacıyla, MC-TLBO algoritmasında, öğretim aşamasında sadece öğretmen çerçevesi değiştirilir, diğer tüm çerçeveler ise öğrenme aşamasında güncellenir.

İkinci fark ise, başlangıç popülasyonunun oluşturulma biçimidir. Standart TLBO'da, başlangıç popülasyonu doğrudan algoritmanın popülasyon büyüklüğü kadar çerçeve ile belirlenirken, MC-TLBO'da başlangıç çerçeveleri daha farklı bir şekilde oluşturulur. MC-TLBO, başlangıç popülasyonunun büyüklüğünün on katı kadar farklı çerçeve üretir ve bu çerçeveler arasından en uygun olanları seçerek ilk popülasyonu oluşturur. Bu sayede, arama süreci standart TLBO'ya göre daha iyi bir başlangıç ile başlatılabilir.

MC-TLBO kullanılarak çelik çerçevelerin performansa dayalı optimum sismik tasarımı aşağıdaki adımlara sahiptir:

Adım 1: MC-TLBO algoritmasını başlatın:

Nüfus boyutunu (ps), maksimum yinleme sayısını, it_{max} ayarlayın. Çelik çerçevelerin nüfus boyutunun on katı ($30 \times ps$) olarak rastgele oluşturun. Diğerlerinden daha az cezalandırılmış amaç fonksiyonuna sahip çerçeveleri seçin.

Adım 2: Standart TLBO algoritmasındaki 1 ve 8 adımları arasındaki süreçler takip edilerek 9. adıma geçilmektedir.

Adım 9: MC-TLBO'yu sonlandırma kriteri: Arama işlemini sonlandırın ve minimum ağırlık çerçevesini kısıtlama ihlali olmadan, $\varphi(I^{opt}) = \varphi(I^{min})$ olarak optimum çerçeveye atayın.

TARTIŞMA

Sayısal Örnekler

Bu çalışmada MC-TLBO algoritmasının etkinliğini görmek için iki örnek moment aktaran düzlemsel çelik çerçeve seçilmiştir. Bu çerçeveler aynı zamanda TLBO ve JA algoritmaları kullanılarak bir çalışma yapılmış bu çalışmanın sonuçları MC-TLBO ile kıyaslanmıştır. Yapının Doğrusal olmayan davranışını temsil etmek için yayılı akmanın malzeme boyunca meydana geldiği varsayılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan moment aktaran çelik çerçeveler daha önce statik itme analizini gerçekleştirmek için [16, 17] tarafından çalışılmıştır. Algoritma yöntemlerinin etkinliğini göstermek için ACO [17], GA [17] ve CSS [18] tarafından optimum sismik çerçeve tasarımları yapılmıştır. Statik İtme analizleri OpenSees platformu [5] tarafından yapılırken, ana program Matlab'da kodlanmıştır. Performansa dayalı optimum sismik çerçeve tasarımları Matlab ve OpenSees programlarının etkileşimli çalışmasıyla icra edilmiştir.

Önerilen üç algoritma, her çerçeve örneği için farklı başlangıç popülasyonları kullanılarak otuz kez çalıştırılmıştır. Bu çerçeveler arasında optimum ağırlık, optimum ağırlığı elde etmek için gereken yapısal analiz sayısı tablolarda sunulmuştur.

Optimum çerçeve plastik mafsalları dağılımı, her üç performans seviyeleri için gösterilmektedir. Kiriş ve kolon elemanları için akma dönmeleri aşağıdaki denklemlerle FEMA-356'ya [4] göre hesaplanır:

$$\text{Kolonlar için } \theta_y = \frac{ZF_{ye}l_b}{6EI_b} \quad (17a)$$

$$\text{Kirişler için } \theta_y = \frac{ZF_{yl}l_c}{6EI_c} \left(1 - \frac{P}{P_{ye}}\right) \quad (17b)$$

Burada, F_{ye} beklenen akma dayanımı, Z plastik kesit modülü, l_b ve l_c kiriş ve kolon uzunlukları, I_b ve I_c kiriş ve kolon atalet momentleri, E : elastisite modülü, P : hedef deplasmanda eleman eksenel kuvveti, P_{ye} : beklenen eksenel kuvvet ($Z=A_g \cdot F_{ye}$)

Kiriş ve kolon elemanları için hesaplanan plastik dönmelerinin (θ) her performans seviyesinde aşağıda verilen sınır değerleri aşmaması gerekir FEMA 273, 1997 /Tablo 5-6'da verilmiştir [19]. IO performans seviyesi: $0.8\theta_y < \theta < \theta_y$, LS performans seviyesi: $\theta_y < \theta < 6\theta_y$ ve CP performans seviyesi: $6\theta_y < \theta < 8\theta_y$.

Bu çalışmada kullanılan malzeme özellikleri: çekme modülü katsayısı elastik modülün %3'üne eşit, gerilme-kuvvet yer değiştirme eğrisi bi-doğrusaldır. Eleman gruplarına atanan kesitler Amerikan Çelik Konstrüksiyon Enstitüsü'ndeki (AISC) [20] mevcut 267 geniş başlıklı kiriş (W kesitleri) listesinden seçilmiştir.

3 Katlı 4 Açıklıklı Moment Çerçevesi

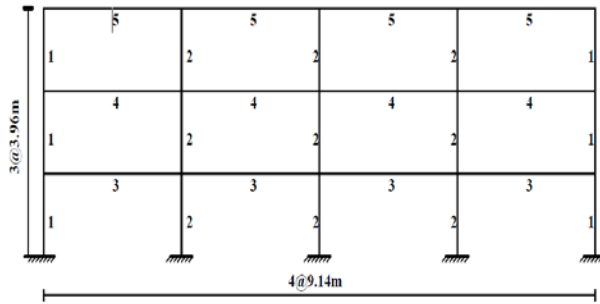
Üç algoritma kullanılarak optimum sismik çerçeve için 3 katlı 4 açıklıklı moment çerçevesi 5 gruptan oluşmaktadır. 27 elemanlı yapının eleman gruplandırılması Şekil 1'de gösterilmiştir. Elastisite modülü $E = 29.000$ ksi (200 GPa) olarak alınmıştır. 2,2 kip/ft (32 kN/m) sabit yerçekimi yükü birinci ve ikinci katlara, 1,97 kip/ft (28,7 kN/m) yerçekimi yükü ise çatı kirişlerine uygulanmıştır. Sismik ağırlıklar birinci ve ikinci katların her biri için 1054 kips (4688 kN) ve çatı katı için 1140 kips (5071 kN) olarak hesaplanmıştır.

Bu çalışmada sunulan algoritmalar sadece iki parametre kullanmaktadır. Bu parametreler popülasyon sayısı (ps) ve maksimum iterasyon sayısı (it_{max}) dir. TLBO algoritması için kullanılan en uygun popülasyon sayısı değeri ($ps=30$), kısıtlama ihlali yüzdesi (CV) ve standart sapma (SD) ve yapısal analizlerin sayısı Tablo 1'de gösterilmiştir. Her ne kadar TLBO $ps = 10$ değeri için en hızlı yakınsama oranına sahip olsa da, optimum sonuçlar açısından ps 'nin en uygun değeri 30 olarak elde edilmiştir [21].

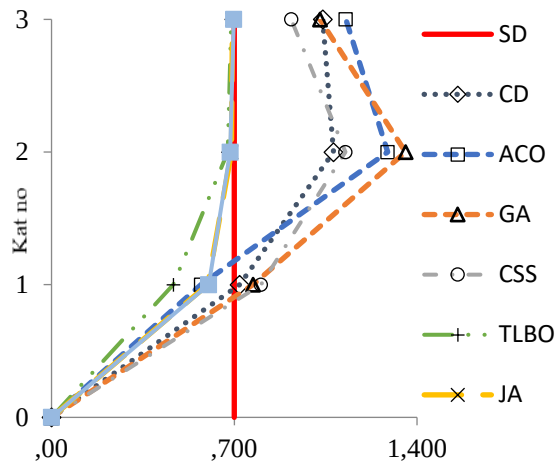
Sonuç olarak JA ve TLBO algoritmaları ile göz önüne alındıklarında diğer algoritmalarla kıyasla genellikle çok daha etkili çalıştığı görülmektedir. ACO, 3900, GA, 6800, CSS ve TLBO 4500 analiz sonucunda sonlandırmış iken JA ve MC-TLBO 3600 analiz sonucunda başarıya ulaşmıştır.

Tablo 1. 3 katlı 4 açıklıklı moment çerçevesi için optimum çerçeve sonuçları

Eleman grubu	CD	ACO	GA	CSS	JAYA	TLBO	MC-TLBO
1-C1	W14X257	W33X118	W12X45	W24X62	W24X76	W24X68	W24X76
2-C2	W14X311	W40X183	W40X235	W21X48	W40X149	W40X199	W40X149
3-B1	W33X118	W24X131	W18X86	W21X48	W40X167	W40X149	W40X167
4-B2	W30X116	W8X28	W14X90	W21X44	W44X230	W44X230	W44X230
5-B3	W24X68	W30X116	W36X135	W21X44	W24X84	W27X84	W24X84
En iyi ağırlık (KN)	412,90	283,40	303,90	250,60	376,50	375,48	361,62
Ortalama ağırlık (KN)	-	294,30	321,50	-	393,94	387,04	400,04
En kötü ağırlık (KN)	-	303,20	339,70	-	414,54	405,63	441,83
Standart sapma (KN)	-	7,57	14,33	-	17,95	11,43	36,38
Ortalama analiz sayısı	-	3.900	6.800	4.500	4.500	3.600	3.600
Sınırlayıcı ihlal oranı (%)	105,68	144,99	151,00	106,67	4.500	3.600	3.600



Şekil 1. 3 katlı 4 açıklıklı moment çerçevesi



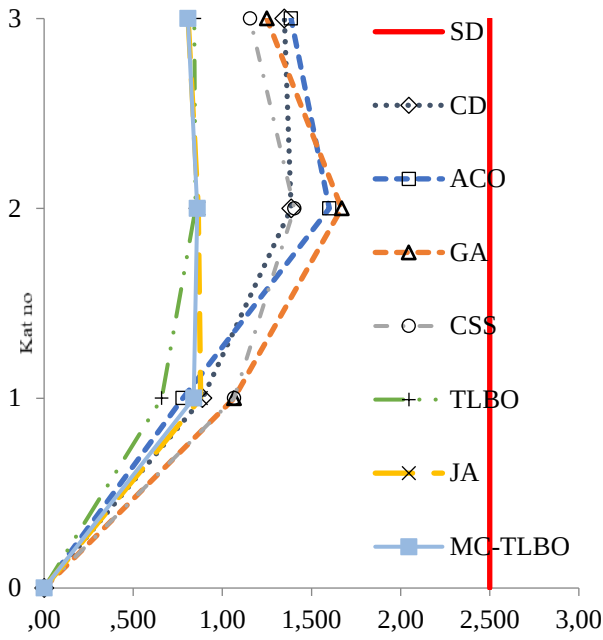
Şekil 2. 3 katlı 4 açıklıklı moment çerçevesi IO performans seviyesinde görel ötelenme (katlar arası) oranı

Şekil 2-3-4'te görüldüğü gibi IO performans seviyesinde katlar arası ötelenme oranı sınır değere yaklaşmış iken LS ve CP performans seviyesinde sınır değerin oldukça gerisinde kalmaktadır. Bu sonuç gösteriyor ki hedef performans seviyesi IO seçildiğinde çok daha ağır

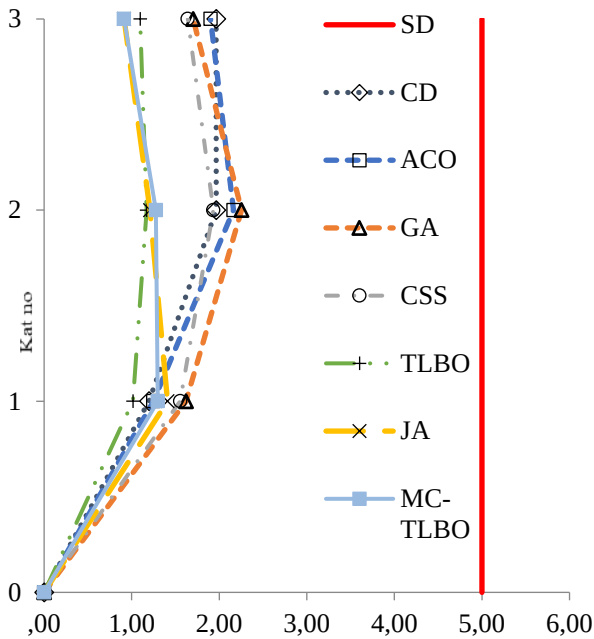
çerçeveler elde edilmektedir. Eğer hedef performans seviyesi LS veya CP seçilirse çok daha hafif çerçeveler söz konusu olabilmektedir. Bu nedenle AISC'de belirlenen yapıların kullanım amacına göre çerçeve hayati önem taşımaktadır.

CD 'de sınırlayıcı ihlal oranı (%) 105.68, ACO, 144.99, GA'da 151.00 ve CSS 'de ise 106,67 olarak belirlenmiştir. Bu dört önceki çalışmada IO seviyesinde deplasman sınırlayıcılarını aştığı görülmüştür. Bu nedenle bu algoritmaların sonuçları denklem 13'e göre ceza kat sayısı uygulanmıştır. Sınırlayıcı ihlal oranları JA ve TLBO ile karşılaştırılan MC-TLBO algoritmalarında 0.00'dır.

Diğer bir sınırlayıcı değer ise plastik dönme sınırlayıcılarıdır. Plastik dönme değerleri (Plastik mafsallaşma) ise SE deprem düzeyinde IO seviyesinde herhangi bir plastikleşme meydana gelmemiştir. DE deprem düzeyinde LS performans seviyesinde ve ME deprem düzeyinde CP performans seviyesinde kaldığı ve herhangi bir mekanizma durumunun oluşmadığı görülmektedir. Mekanizma durumu OpenSees programı tarafından kontrol edilmekte olup mekanizma durumuna geçen çerçeveleri başarısız Statik İtme analizi olarak tanımlamakta ve en yüksek ceza kat sayısı ile çarparak uzaklaştırmaktadır.



Şekil 3. 3 katlı 4 açıklıklı moment çerçevesi LS performans seviyesinde görel ötelenme (katlar arası) oranı

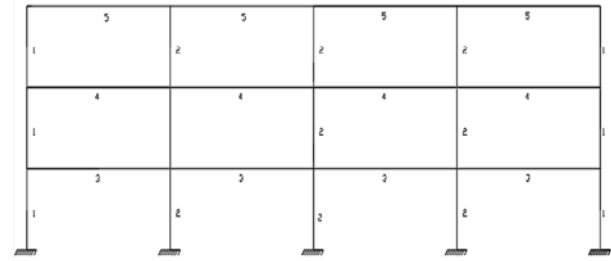


Şekil 4. 3 katlı 4 açıklıklı moment çerçevesi CP performans seviyesinde görel ötelenme (katlar arası) oranı

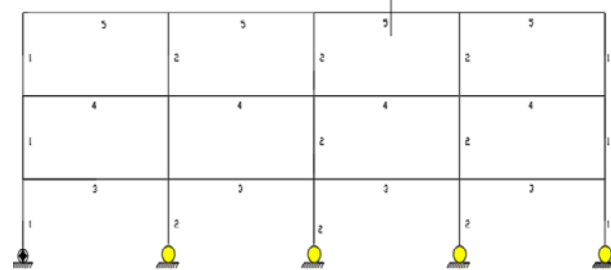
Şekil. 8’de çalışılan TLBO, JA ve MC-TLBO ve literatür çalışmasında sunulan diğer algoritma çerçeve ağırlık değerleri için yakınsama eğrileri gösterilmiştir. Bu yakınsama eğrilerine bakıldığında hemen hemen aynı başlangıç değerlerine sahip olan algoritmalar ilk adımdan itibaren MC-TLBO değeri hızlıca düşmekte daha sonra ise diğer algoritmalar gibi aşama aşama aşağı inmektedir.

Bu çalışmanın amaçlarından biri olan başlangıçta hızlı düşüş ve sonrasında standart algoritma olan TLBO ya yakın ve paralel bir eğimde seyredilmesi beklenmektedir. Bu çalışmanın grafiği MC-TLBO’nun en az diğer algoritmalar kadar etkili çalıştığını göstermiştir.

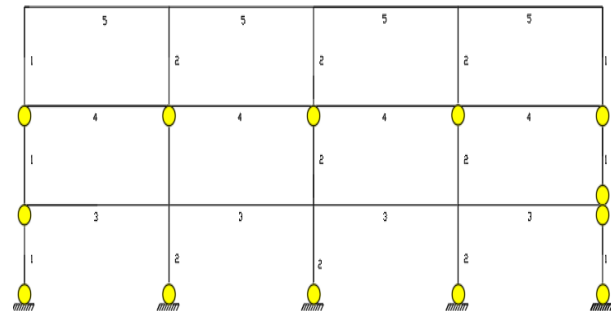
Her ne kadar TLBO ps için 10 değeri için en hızlı yakınsama oranına sahip olsa da, ps’nin en uygun değeri 30 olarak elde edilmiştir[30]. Eleman sayısı ve grup sayısı arasındaki ilişkiden yola çıkılarak kesit seçme işlemi MATLAB tarafından algoritma vasıtasıyla yapıldığından çok uzun süreç almamaktadır. Yapının eleman sayısı ve kat sayısı büyüdükçe programın analiz süresi artmaktadır. Bu nedenle gruplamanın iyi seçilmesi analizde başarısızlık oranını azaltmaktadır. Diğer bir yararı yapının kolon-kolon ve kolon-kiriş geometrik sınırlayıcıları sayısını azaltmakta olduğu için uygun kesitler ile yapılması doğru bir karar olacaktır.



Şekil 5. 3 katlı 4 açıklıklı moment çerçevesi IO performans seviyesinde plastikleşen kolon ve kirişler



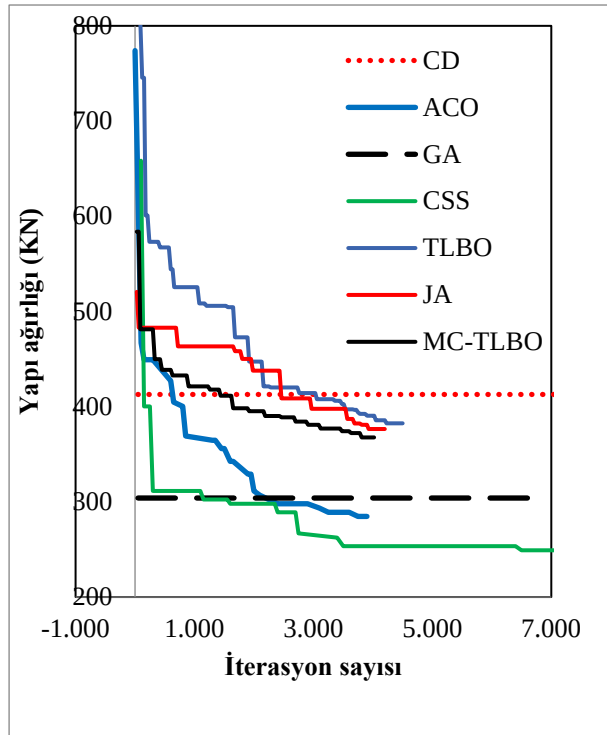
Şekil 6. 3 katlı 4 açıklıklı moment çerçevesi LS performans seviyesinde plastikleşen kolon ve kirişler



Şekil 7. 3 katlı 4 açıklıklı moment çerçevesi CP performans seviyesinde plastikleşen kolon ve kirişler

Şekil 5'te verilen 3 katlı 4 açıklıklı moment çerçevesinin IO, LS ve CP performans seviyelerindeki Plastik dönme (Plastik mafsallaşma) biçimleri verilmiştir. Bu şekillere bakıldığında bazı kritik noktalarda bulunan elamanların bölgelerinin Şekil 5'te SE deprem düzeyinde IO performans seviyesinde kaldığını görmekteyiz. Şekil 6'da DE deprem düzeyinde LS performans seviyesinde ve Şekil 7'de ME deprem düzeyinde LS performans seviyesinde kaldığı ve herhangi bir mekanizma durumunun oluşmadığı görülmektedir.

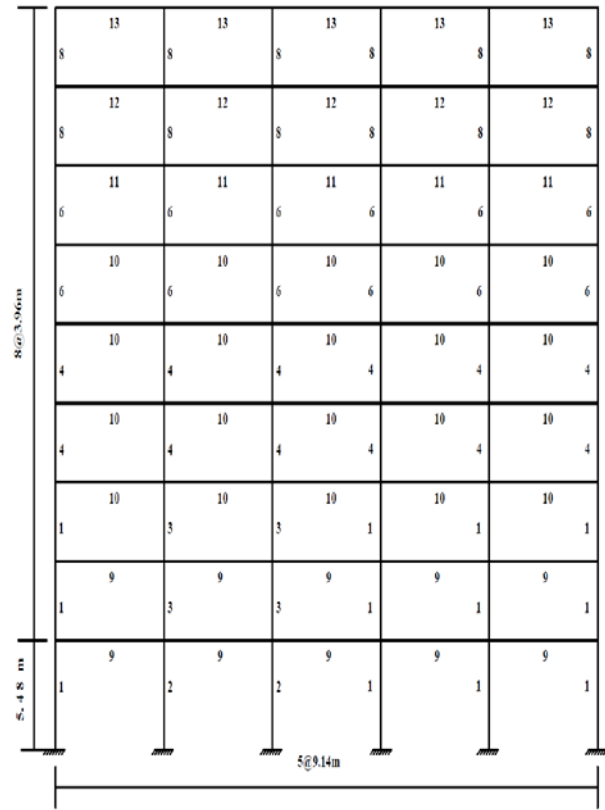
Şekil 8'de Yakınsama eğrilerine bakıldığında dikkate değer diğer bir durum ise MC-TLBO diğer algoritmalara kıyasla daha hızlı sonuçlara erişilebildiğini göstermektedir. Ancak ACO 7.57 KN, GA 14.33, TLBO 17.95, JA 11.43 ve MC-TLBO 36.38 standart sapma göstermiştir. Bu durum bir algoritmanın farklı başlangıç popülasyonu için çok değişik çerçeve sonuçları üretebileceğini göstermiştir. Bir başka değişle, algoritmanın kaderinin başlangıç popülasyonuna bağlı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle çalışma uzayının genişliği ve nihai çerçeveye yakın kesit ataması yapan mühendisin deneyimi ortaya bir daha konulmuş olur.



Şekil 8. 3 katlı 4 açıklıklı moment çerçevesi yakınsama eğrileri

9 Katlı 5 Açıklıklı Moment Çerçevesi

5 açıklıklı-9 katlı çelik çerçeve çelik çerçeve, Şekil 9'da gösterildiği gibi ele alınmıştır. Boyutlar, uygulanan yükleme sistemi ve eleman grupları da bu şekilde verilmiştir. Elastisite modülü 200 GPa (29.000 ksi) olarak alınmıştır.



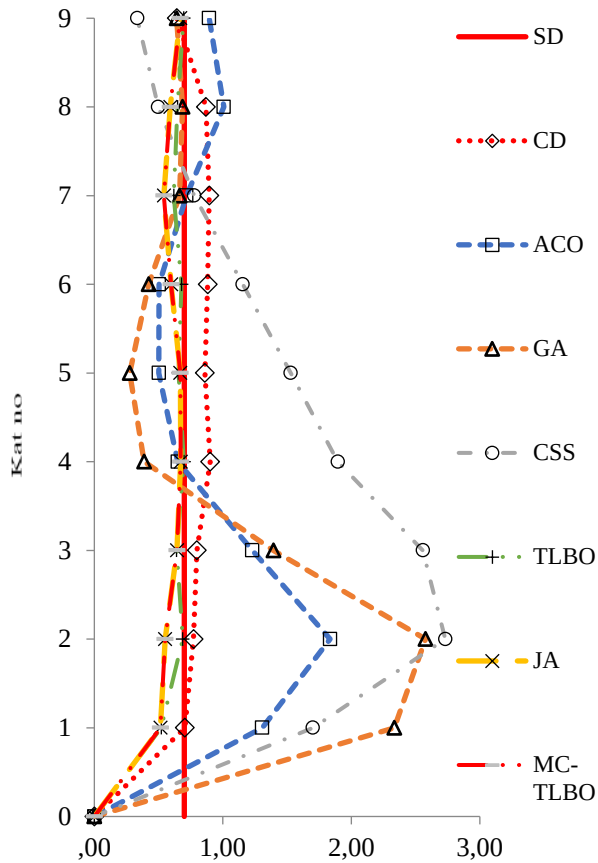
Şekil 9. 9 katlı 5 açıklıklı moment çerçevesine ait IO performans seviyesinde katlar arası görelî ötelenme oranı

Yapının elemanları Şekil 9'da gösterildiği gibi 13 gruba ayrılmıştır. Birden sekizinci kata kadar olan kirişlere 32 kN/m (2,2 kip/ft) sabit yerçekimi yükü uygulanırken, 28,7 kN/m (1,97 kip/ft) yerçekimi yükü ise çatı kirişlerine uygulanmıştır. Sismik ağırlıklar, birinci kat için 1111 kips (4942 kN), ikinci ile sekizinci katların her biri için 1092 kips (4857 kN) ve çatı katı için 1176 kips (5231 kN) olarak hesaplanmıştır.

Bu çalışmada sunulan algoritmalar yine sadece iki parametre kullanmaktadır. Bu parametreler popülasyon sayısı (ps) ve maksimum iterasyon sayısı (it_{max}) dir. TLBO algoritması için kullanılan en uygun popülasyon sayısı değeri ($ps=30$) CV ve SD, Tablo 2'de sırasıyla yapısal analizlerin sayısı, kısıtlama ihlali yüzdesi ve standart sapma anlamına gelmektedir.

Tablo 2'de analiz sayıları ACO [33] için 7.000, GA [33] için 11500, CSS[9] için 10.000, JA ve TLBO ile karşılaştırılan MC-TLBO algoritması analiz sayısı için 7.000 seçilmiştir. MC-TLBO önceki örnekte olduğu gibi analiz sayısı bakımından diğerlerine oranla daha hızlı sonuca erişilmektedir. Ağırlık bakımından CSS'den daha ağırdır. Diğer algoritmalar ACO, GA, CSS, JA ve TLBO algoritmalarına göre daha hafiftir. Literatürde verilen CD hariç ACO, GA ve CSS bu üç algoritmanın sınır değerleri aşarak bu ağırlığa ulaştıklarını göz önünde bulundurmakta yarar vardır.

Sonuç olarak JA ve TLBO algoritmaları ile göz önüne alındıklarında diğer algoritmalarla kıyasla genellikle çok daha etkili çalıştığı görülmektedir.

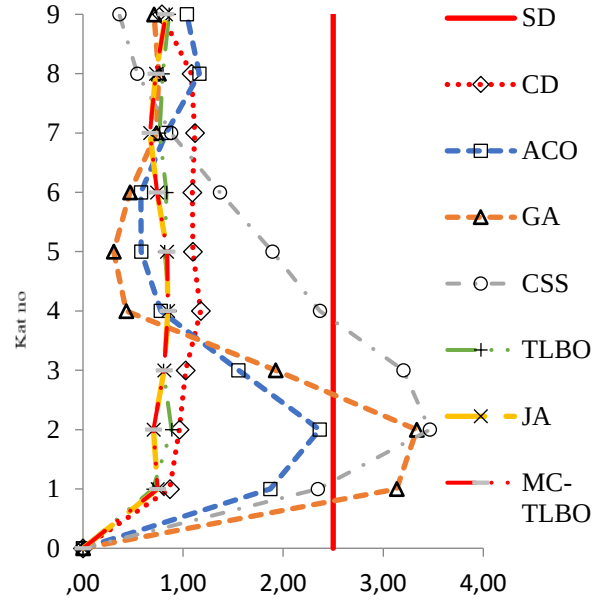


Şekil 10. 9 katlı 5 açıklıklı moment çerçevesine ait IO performans seviyesinde katlar arası görelî ötelenme oranı

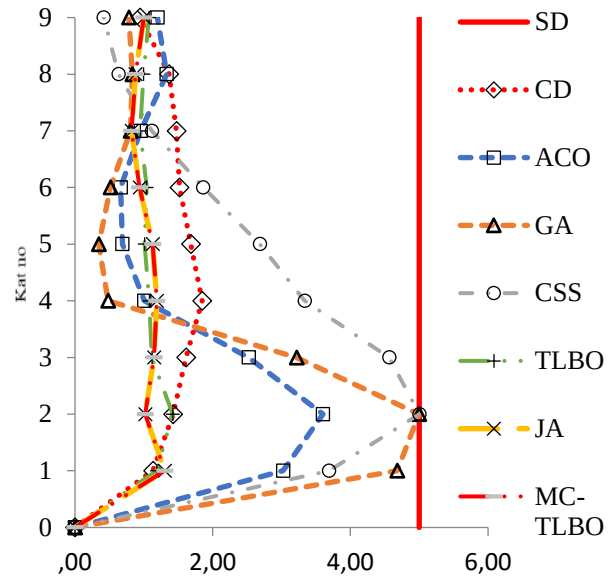
Şekil 10. 9 katlı 5 açıklıklı moment çerçevesinin IO, Şekil 11. 9 katlı 5 açıklıklı moment çerçevesinin LS ve Şekil 12. 9 katlı 5 açıklıklı moment çerçevesinin CO performans seviyelerindeki katlar arası ötelenme oranları verilmiştir. IO performans seviyesinde ACO, GA ve CSS kullanarak elde edilen yatay yer değiştirmeler verilen %0,7'lik değeri aştığı görülmektedir. LS performans seviyesinde GA ve CSS kullanılarak elde edilen yatay yer değiştirmeler verilen %2,5'lik değeri aştığı görülmektedir. CP performans seviyesinde ise herhangi bir sınır değer koşulu aşılmamıştır. %2,5'lik sınır değer koşulu sağlanmıştır.

Şekil 13'te verilen 9 katlı 5 açıklıklı moment çerçevesinin IO, Şekil 14'te verilen 9 katlı 5 açıklıklı moment çerçevesinin LS, Şekil 15'te verilen 9 katlı 5 açıklıklı moment çerçevesinin CP performans seviyelerindeki Plastik dönme (Plastik mafsallaşma) formlarıdır. Bazı kritik noktalarda bulunan elemanların Şekil 13'te SE deprem düzeyinde IO performans seviyesini geçerek LS performans seviyeye ulaştıklarını

ancak Mekanizma durumunun oluşmadığını görmekteyiz. Şekil 14'te DE deprem düzeyinde LS performans seviyesinde ve Şekil 15'te ME deprem düzeyinde CP performans seviyesinde kaldığı ve herhangi bir mekanizma durumunun oluşmadığı görülmektedir.



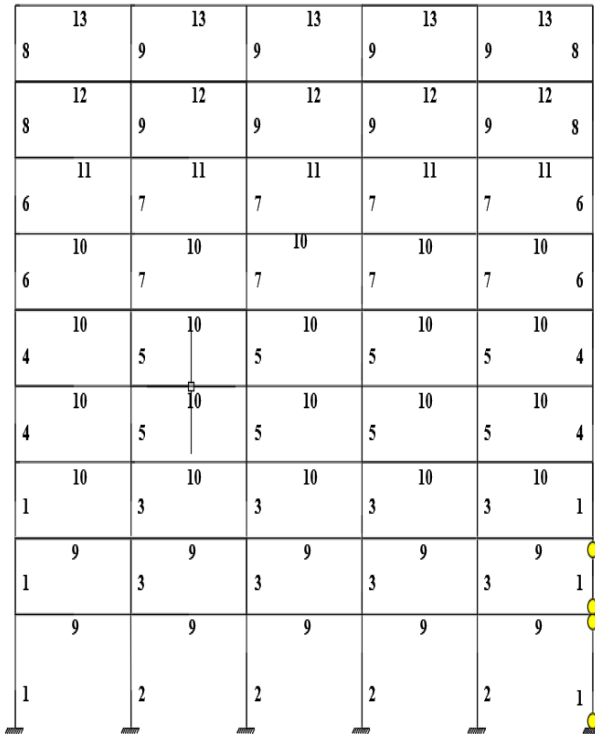
Şekil 11. 9 katlı 5 açıklıklı moment çerçevesine ait LS performans seviyesinde katlar arası görelî ötelenme oranı



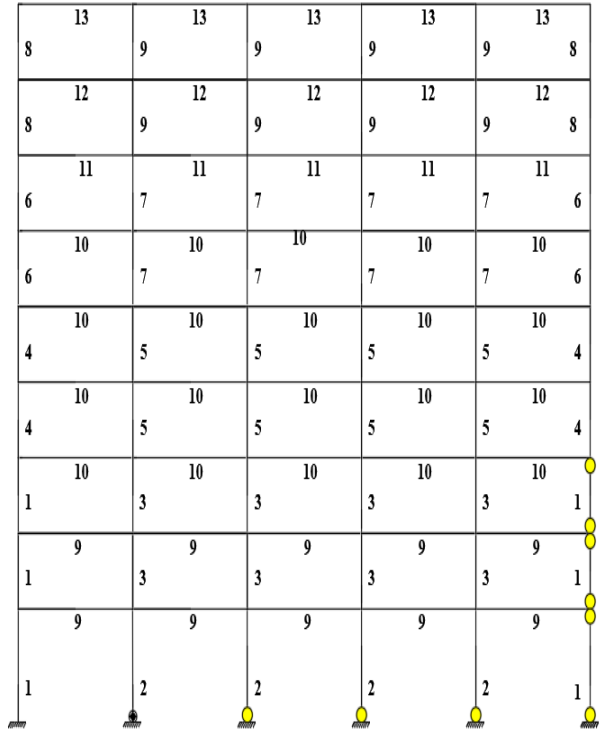
Şekil 12. 9 katlı 5 açıklıklı moment çerçevesine ait CP performans seviyesinde katlar arası görelî ötelenme oranı

Tablo 2. 9 katlı 5 açıklıklı moment çerçevesi için optimum çerçeve sonuçları

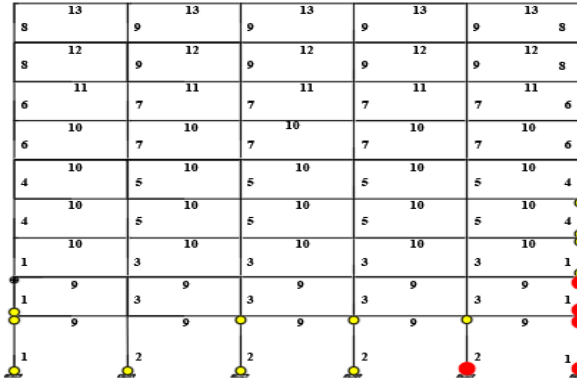
Eleman grubu	CD	ACO	GA	CSS	JAYA	TLBO	MC-TLBO
1-C1	W14X370	W30X235	W27X217	W21X83	W12X96	W12X45	W16X45
2-C2	W14X500	W27X235	W14X233	W40X167	W33X318	W27X194	W40X149
3-C3	W14X455	W36X280	W27X307	W36X135	W36X330	W40X149	W36X135
4-C4	W14X283	W36X280	W27X307	W33X130	W33X141	W21X44	W12X45
5-C5	W14X370	W24X279	W44X290	W40X149	W36X150	W40X278	W40X215
6-C6	W14X257	W30X116	W27X114	W24X62	W24X94	W36X160	W27X84
7-C7	W14X283	W36X170	W24X162	W40X167	W30X116	W30X90	W30X99
8-C8	W14X233	W10X77	W18X176	W40X167	W14X109	W21X44	W24X55
9-B1	W36X160	W14X82	W10X88	W18X40	W36X135	W40X149	W40X149
10-B2	W36X135	W30X235	W36X260	W21X83	W33X141	W33X141	W36X135
11-B3	W30X99	W21X68	W24X62	W30X99	W40X211	W30X99	W33X118
12-B4	W27X84	W27X114	W40X149	W30X116	W27X94	W27X84	W30X90
13-B5	W24X68	W16X36	W6X25	W33X130	W18X106	W21X55	W21X48
En iyi ağırlık (kN)	1.859,30	1.552,60	1.651,10	926,30	1.371,56	1.185,66	1.087,15
Ortalama ağırlık (kN)	-	1.633,90	1.757,10	-	1.442,00	1.225,11	1.206,37
En kötü ağırlık (kN)	-	1.707,60	1.900,00	-	1.516,35	1.274,57	1.321,52
Standart sapma (kN)	-	46,80	81,31	-	72,47	45,30	117,23
Ortalama analiz sayısı	-	7.000	11.500	10.000	7.000	7.000	7.000
Sınırlayıcı ihlal oranı (%)	0	160.00	369.00	662.00+5.00	0.00	0.00	0.00



Şekil 13. 9 katlı 5 açıklıklı moment çerçevesi IO performans seviyesinde plastikleşen kolon ve kirişler



Şekil 14. 9 katlı 5 açıklıklı moment çerçevesi LS performans seviyesinde plastikleşen kolon ve kirişler

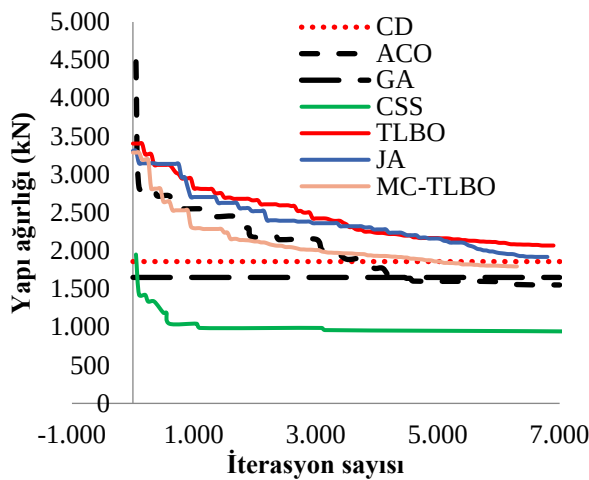


Şekil 15. 9 katlı 5 açıklıklı moment çerçevesi CP performans seviyesinde plastikleşen kolon ve kirişler

Plastik dönme değerleri (plastik mafsallaşma) incelendiğinde; SE deprem düzeyinde IO performans seviyesinde sınırlı plastikleşmelerin olduğu, DE deprem düzeyinde LS seviyesinde kaldığı, ME deprem düzeyinde ise CP performans seviyesini aşmadığı ve herhangi bir mekanizma oluşumunun gözlenmediği anlaşılmaktadır.

Şekil 13'te 9 katlı 5 açıklıklı moment çerçevesinin IO, LS ve CP performans seviyelerinde katlar arası ötelenme oranları verilmiştir. JA, TLBO, MC-TLBO ve CD ile elde edilen ötelenme oranları IO, LS ve CP performans seviyelerinde sınırlayıcıları sağlamaktadır.

Bu çalışmada optimum çerçevenin katlar arası ötelenme oranı IO performans seviyesinde kalmaktadır. Diğerleri ise katlar arası ötelenme oranı sınır değerinin gerisinde kalmaktadır. JA, TLBO, MC-TLBO ve CD algoritmaları ile elde edilen çerçevelerin katlar arası ötelenme oranı SE deprem düzeyinde IO performans seviyesinde DE ve ME deprem düzeylerinde ise LS performans seviyesinde kalmaktadır.



Şekil 16. 9 katlı 5 açıklıklı moment çerçevesi yakınsama eğrisi

Tablo 2'de verilen analizler sonucunda ve şekil 16'da verilen yakınsama değerlerine göre CD 1.859,30 kN, ACO 1.552,60 kN, GA 1.651,10 kN, CSS 926,30 kN,

TLBO 1.371,56 kN, JA 1.185,66 kN ve MC-TLBO 1.087,15 kN değerleri elde edilmiştir.

Şekil 16'da 9 katlı 5 açıklıklı moment çerçevesi yakınsama eğrisine bakıldığında dikkate değer diğer bir durum ise MC-TLBO diğer algoritmalarla kıyasla daha hızlı sonuçlara erişilebildiğini göstermektedir. Ancak ACO 46,80 kN, GA 81,31 kN, JA 72,47 kN, TLBO 45,30 kN ve MC-TLBO 117,23 kN standart sapma göstermiştir. Diğer bir yandan standart sapma değerlerinin birinci örnekte ve ikinci örnekte farklı olduklarını görmekteyiz. Ancak birinci örnek ile ikinci örnek arasında yapı ağırlıklarının dikkate alınarak bir yüzde şeklinde ifade edilmesi gerekmektedir. Üç katlı yapı için ACO 2,67, GA 4,72, JA 4,77, TLBO 3,04 ve MC-TLBO 10,06'dır. 9 katlı yapı için ACO 3,01, GA 4,92, JA 5,28, TLBO 3,82 ve MC-TLBO 10,78'dir. Bu sonuç her algoritma kendi içinde çalışma süreçlerine göre farklı standart sapmalar ürettiğini göstermiştir. Ancak örnekler değiştiğinde standart sapmanın en iyi ağırlığa bölümünün yapının yüksekliğinden ve eleman sayısından bağımsız olarak gerçekleştiği belirlenmiştir. Algoritmalar arasındaki standart sapmanın farklı olması ise global araması iyi olan bir algoritmanın büyük olması demektir. Global araması kötü olan bir algoritma ise sürekli birbirine yakın değerler üreterek standart sapmasını azaltmaktadır. Keşif-Global (exploration) ve sömürü-Lokal (exploitation), arama yoluyla algoritmalarla problem çözmenin iki temel unsurudur. Bu iki kısımdan oluşan algoritma kısımları arasında ne kadar iyi denge kurulursa başarıya ulaşma şansı o kadar artmaktadır [43].

SONUÇLAR

Bu çalışmada, çelik çerçevelerin performansa dayalı optimum sismik tasarımı için MC-TLBO, JA ve TLBO algoritmaları kullanılmış ve iki farklı yapı örneği üzerinde uygulanmıştır. Dört açıklıklı, üç katlı çelik çerçeve örneğinde analiz sayısı sınırlandırılmadan bir optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiş; beş açıklıklı, dokuz katlı çelik çerçevede ise analiz sayısı sınırlandırılmıştır. Her iki yapı örneği karşılaştırıldığında, analiz sayısı artırılsa dahi sonuçların anlamlı ölçüde değişmediği gözlemlenmiştir. Bu durum, algoritmaların çözüm uzayında belirli bir noktadan sonra yakınsama sağladığını göstermektedir.

Gelecek çalışmalarda, algoritmaların lokal ve global arama aşamaları arasında hibrit yaklaşımların uygulanmasıyla analiz sürelerinin daha da kısaltılması mümkündür. Popülasyon büyüklüğü üzerinde yapılan değişiklikler, analiz süresi ve elde edilen optimum çerçeveler üzerinde anlamlı bir etki yaratmamış ve literatürdeki sınırlar aşılmamıştır.

Başlangıç popülasyonlarının seçimi, elde edilen analiz sonuçlarını doğrudan etkilemiştir. Bu bağlamda, MC-TLBO algoritmasının diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında daha az analiz sayısı ile daha verimli sonuçlar elde ettiği belirlenmiştir. Bu çalışmada ilk defa MC-TLBO algoritması, performansa dayalı optimum sismik tasarım amacıyla önerilmiş ve geçerliliği iki farklı

çelik çerçeve örneği ile test edilmiştir. MC-TLBO algoritması ile elde edilen sonuçlar; CD, ACO, GA, CSS, JA ve TLBO gibi yöntemlerle kıyaslandığında, optimum ağırlık ve yapı analiz sayısı açısından üstün performans sergilemiştir.

JA algoritması, tek aşamalı yapısı ve hızlı çözümler üretmesi nedeniyle tercih edilmiştir. TLBO ise çift aşamalı yapısıyla lokal ve global aramayı dengeli şekilde gerçekleştirmesi sebebiyle seçilmiştir. MC-JA kombinasyonu da test edilmiş ancak mevcut yöntemlere kıyasla belirgin bir avantaj sağlamadığı için önerilmemiştir. Öte yandan, TLBO algoritmasının ilk aşamasına çoklu sınıfla başlanması, optimum sonuçları olumlu yönde etkileyerek analiz sayısını azaltmış ve yöntemin daha paralel ve hızlı çalışmasını sağlamıştır. Her yapının farklı deprem tehlike seviyelerine karşı farklı performans kriterlerine göre değerlendirilmesi için MATLAB ortamında özel bir algoritma geliştirilmiştir. Statik itme analizleri ise OpenSees açık kaynaklı yapısal analiz programı ile gerçekleştirilmiştir. OpenSees'in arayüzsüz yapısı analiz sürelerini kısaltmakla birlikte, mühendislik uygulamaları açısından ileri düzey kullanıcı bilgisi gerektirdiği için yaygın mühendislik pratiğinde sınırlı kullanılmaktadır.

KAYNAKÇA

- [1] Khoshnoud, H.R. and K. Marsono, Assessment of FEMA356 nonlinear static procedure and modal pushover analysis for seismic evaluation of buildings. *Structural engineering and mechanics: An international journal*, 2012. 41(2): p. 243-262.
- [2] Committee, S.V., Performance-based seismic engineering. *Structural Engineers Association of California*, Sacramento, California, 1995.
- [3] ATC, S., Evaluation and retrofit of concrete buildings, Rep. ATC-40, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996.
- [4] Council, B.S.S. and A.T. Council, NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings. Vol. 1. 1997: Federal Emergency Management Agency.
- [5] FEMA 356, F.E., Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. *Federal Emergency Management Agency: Washington, DC, USA*, 2000.
- [6] Fema, A., 440, Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures. FEMA-440, Redwood City, 2005. 7(9): p. 11.
- [7] ASCE, Minimum design loads for buildings and other structures. 2010, ASCE Reston, VA.
- [8] Hasan, R., L. Xu, and D. Grierson, Push-over analysis for performance-based seismic design. *Computers & structures*, 2002. 80(31): p. 2483-2493.
- [9] Saafan, S.A., Nonlinear behavior of structural plane frames. *Journal of the Structural Division*, 1963. 89(4): p. 557-579.
- [10] Soleimani Amiri, F., G. Ghodrati Amiri, and H. Razeghi, Estimation of seismic demands of steel frames subjected to near-fault earthquakes having forward directivity and comparing with pushover analysis results. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2013. 22(13): p. 975-988.
- [11] Chopra, A.K. and R.K. Goel, A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 2002. 31(3): p. 561-582.
- [12] Krawinkler, H. Pushover analysis: why, how, when, and when not to use it. in *Proceedings of the 65th Annual Convention of the Structural Engineers Association of California*. 1996.
- [13] Mirjalili, M. and F. Rofooei, The modified dynamic-based pushover analysis of steel moment resisting frames. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2017. 26(12): p. e1378.
- [14] Holland, J.H., Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. 1992: MIT press.
- [15] Dorigo, M., V. Maniezzo, and A. Colomi, Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, part b (cybernetics)*, 1996. 26(1): p. 29-41.
- [16] Eberhart, R. and J. Kennedy. A new optimizer using particle swarm theory. in *MHS'95. Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science*. 1995. Ieee.
- [17] Kaveh, A. and V.R. Mahdavi, Colliding bodies optimization: a novel meta-heuristic method. *Computers & Structures*, 2014. 139: p. 18-27.
- [18] Kaveh, A. and S. Talatahari, Anovel heuristic optimization method: charged system search. *Acta mechanica*, 2010. 213(3): p. 267-289.
- [19] Yang, X.-S. Firefly algorithms for multimodal optimization. in *International symposium on stochastic algorithms*. 2009. Springer.
- [20] Kaveh, A., et al., Performance-based seismic design of steel frames using ant colony optimization. *Journal of Constructional Steel Research*, 2010. 66(4): p. 566-574.
- [21] Gholizadeh, S. and R.K. Moghadas, Performance-based optimum design of steel frames by an improved quantum particle swarm optimization. *Advances in Structural Engineering*, 2014. 17(2): p. 143-156.
- [22] Talatahari, S., et al., Optimum Performance-Based Seismic Design Using a Hybrid Optimization Algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014. 2014(1): p. 693128.
- [23] Veladi, H., Performance-Based Seismic Design of Steel Frames Utilizing Colliding Bodies Algorithm. *The Scientific World Journal*, 2014. 2014(1): p. 240952.
- [24] Kaveh, A. and A. Nasrollahi, Performance-based seismic design of steel frames utilizing charged system search optimization. *Applied Soft Computing*, 2014. 22: p. 213-221.
- [25] Ghasemof, A., et al. Multi-objective optimal design of steel MRF buildings based on life-cycle cost using a swift algorithm. in *Structures*. 2021. Elsevier.
- [26] Mohammadi, R.K. and A.H. Sharghi, On the optimum performance-based design of eccentrically braced frames. *Steel Compos. Struct*, 2014. 16(4): p. 357-374.

- [27] Gholizadeh, S., Performance-based optimum seismic design of steel structures by a modified firefly algorithm and a new neural network. *Advances in Engineering Software*, 2015. 81: p. 50-65.
- [28] Mansouri, I., et al., Performance based design optimum of CBFs using bee colony algorithm. *Steel and Composite Structures*, 2018. 27(5): p. 613-622.
- [29] Degertekin, S.O. and H. Tutar. Performance-based optimum seismic design of planar steel frames using the jaya algorithm. in 4th Eurasian conference on civil and environmental engineering. Istanbul (Turkey). 2019.
- [30] Degertekin, S.O., H. Tutar, and L. Lamberti, School-based optimization for performance-based optimum seismic design of steel frames. *Engineering with Computers*, 2021. 37(4): p. 3283-3297.
- [31] Degertekin, S.O. and H. Tutar, Optimized seismic design of planar and spatial steel frames using the hybrid learning based jaya algorithm. *Advances in Engineering Software*, 2022. 171: p. 103172.
- [32] Rodríguez, C.A., et al., Comparative analysis and evaluation of seismic response in structures: Perspectives from non-linear dynamic analysis to pushover analysis. *Applied Sciences*, 2024. 14(6): p. 2504.
- [33] Tschemmernegg, F., On the nonlinear behaviour of joints in steel frames. *Connections in steel structures: Behaviour, strength and design*, 1988: p. 158-165.
- [34] McKenna, F., et al., OpenSees. University of California, Berkeley: nd, 2010.
- [35] Rao, R., Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2016. 7(1): p. 19-34.
- [36] Degertekin, S.O., L. Lamberti, and I.B. Ugur, Sizing, layout and topology design optimization of truss structures using the Jaya algorithm. *Applied soft computing*, 2018. 70: p. 903-928.
- [37] Rao, R.V., V.J. Savsani, and D.P. Vakharia, Teaching-learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems. *Computer-aided design*, 2011. 43(3): p. 303-315.
- [38] Dede, T. and Y. Ayvaz, Structural optimization with teaching-learning-based optimization algorithm. *Structural engineering and mechanics: An international journal*, 2013. 47(4): p. 495-511.
- [39] Degertekin, S. and M. Hayalioglu, Sizing truss structures using teaching-learning-based optimization. *Computers & Structures*, 2013. 119: p. 177-188.
- [40] Shallan, O., H.M. Maaly, and O. Hamdy, A developed design optimization model for semi-rigid steel frames using teaching-learning-based optimization and genetic algorithms. *Structural engineering and mechanics: An international journal*, 2018. 66(2): p. 173-183.
- [41] Farshchin, M., C. Camp, and M. Maniat, Multi-class teaching-learning-based optimization for truss design with frequency constraints. *Engineering Structures*, 2016. 106: p. 355-369.
- [42] Committee, A., Specification for structural steel buildings (ANSI/AISC 360-16). 2016, American Institute of Steel Construction Chicago.
- [43] Črepinšek, M., S.-H. Liu, and M. Mernik, Exploration and exploitation in evolutionary algorithms: A survey. *ACM computing surveys (CSUR)*, 2013. 45(3): p. 1-33.
- [44] Matlab, S., "Matlab," MathWorks. Natick, MA, 2012.

Polimer Kompozitlerde Siderit Mineralinin Takviye Malzemesi Olarak Kullanımının Fiziksel, Mekanik ve Kalıcılık Özelliklerine Etkisi

Hasan POLAT¹, Adnan TAYGAR²

¹Bingöl Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Bingöl, Türkiye

²Bingöl Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Teknolojisi Bölümü, Bingöl, Türkiye

✉: hpolat@bingol.edu.tr  ¹[0000-0003-1521-0695](https://orcid.org/0000-0003-1521-0695)  ²[0009-0007-3166-4095](https://orcid.org/0009-0007-3166-4095)

Geliş (Received): 14.01.2025

Düzeltilme (Revision): 20.02.2025

Kabul (Accepted): 03.03.2025

ÖZ

Bu çalışma, siderit mineralinin polimer esaslı kompozit malzemelerde dolgu maddesi olarak kullanımının fiziksel, mekanik ve kalıcılık özelliklerine etkilerini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bu kapsamda, farklı oranlarda (%0, %25, %50, %75 ve %100) siderit içeren kompozit numuneler üretilmiş ve bu numuneler üzerinde yoğunluk, ultrases geçiş hızı, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı gibi temel özellikler incelenmiştir. Ayrıca, çevresel dayanım açısından önem arz eden sülfat etkisi (SS) ve donma-çözülme (DÇ) döngüleri sonrası basınç dayanımı da değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, artan siderit oranının kompozitlerin yoğunluğunu ve ultrases geçiş hızını belirgin şekilde artırdığını göstermektedir. Kontrol numunesine kıyasla %108.94'e varan yoğunluk ve %46.92'ye ulaşan ultrases geçiş hızı artışı tespit edilmiştir. Mekanik dayanımda genel bir düşüş gözlenmiş olsa da özellikle %75 ve %100 siderit içeren numunelerde bu azalmaların sınırlı düzeyde kaldığı belirlenmiştir. Sonuç olarak, uygun oranlarda kullanıldığında siderit minerali, polimer kompozitlerin fiziksel ve çevresel performansını artırabilecek potansiyele sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Kalıcılık, mekanik özellikler, polimer kompozitler, siderit mineral

Effect of Using Siderite Mineral as a Reinforcement Material on the Physical, Mechanical, and Durability Properties of Polymer Composites

ABSTRACT

This study aims to evaluate the effects of using siderite mineral as a filler in polymer-based composite materials on their physical, mechanical, and durability properties. Composite specimens were produced by incorporating siderite at varying ratios (0%, 25%, 50%, 75%, and 100%) into the polymer matrix. These samples were tested for density, ultrasonic pulse velocity, compressive strength, and flexural strength. Durability was assessed by measuring compressive strength after sulphate exposure (SS) and freeze-thaw (FT) cycles. The results indicated that increasing the siderite content led to a notable rise in both density and ultrasonic velocity. Compared to the control specimen, density increased by up to 108.94%, and ultrasonic velocity by 46.92%. Although mechanical strength showed an overall decline, the reduction was relatively limited in specimens containing 75% and 100% siderite, indicating a more balanced structure. In conclusion, siderite, when used at appropriate proportions, can effectively improve the physical performance and environmental durability of polymer composite materials.

Keywords: Durability, mechanical properties, polymer composites, siderite mineral

GİRİŞ

Polimer kompozitler, kimyasal ve fiziksel olarak farklı, iki veya daha fazla tipik olarak bir polimer matris ve takviye edici bir dolgudan oluşan ve tek tek bileşenlerle elde edilemeyen üstün özellikler elde etmek için bir araya getirilen malzemelerdir [1].

Polimer matris ve takviye malzemesi birleştirildiğinde, bileşenlerinden farklı özelliklere sahip, yorulma ömrü, mukavemet, aşınma direnci, korozyon direnci, sertlik, ısı iletkenlik, ısı yalıtımı bakımından üstün bir ürün elde edilir [2-3].

Polimer kompozitler, konveksiyonel beton ile benzer şekilde, fiziksel ve kimyasal özellikleri farklı agregaların bir araya getirilmesiyle oluşturulan bir malzeme grubudur. Ancak bu kompozitlerde bağlayıcı malzeme olarak polimerik malzemeler, özellikle termoset reçineler, kullanılır [4]. En yaygın kullanılan termoset reçineler arasında polyeater ve epoksi bulunur [5]. Bu tür polimer kompozitlerin karıştırılması ve üretilmesinden önce, reçineye genellikle katalizör veya sertleştiriciler eklenir. Konveksiyonel betonda su önemli bir rol oynarken, polimer kompozitlerde su bulunmaz [6-7].

Polimer kompozitler, düşük yoğunlukları, uygun maliyetleri, yüksek korozyon dirençleri ve kolay işlenebilirlikleri gibi avantajları sayesinde hem günlük yaşamda hem de endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar [8-10]. Yapılan literatür çalışmasında, birçok yazarın farklı türde ve yoğunlukta takviye malzemesi kullanarak polimer kompozit üretimi gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir [11-13].

Mermer tozu, tuğla tozu atığı, kil tozu, gaz beton atıkları ve kireç tozu gibi farklı türde atık malzemelerin polimer kompozitlerde takviye malzemesi olarak kullanımı üzerine araştırmalar yapılmıştır [14-18]. Endüstriyel atık malzemelerin takviye malzemesi olarak polimer kompozitlerde dayanıklılığını artırmak amacıyla birçok araştırmacı tarafından çalışmalar yapılmıştır [19-21]. Polimer kompozitlerde farklı yoğunlukta agregaların takviye malzemesi olarak kullanıldığı ve radyasyon zırlama özelliklerinin incelendiği çalışmalar literatürde rapor edilmiştir [22-24]. Önemli yer altı kaynaklarından biri olan siderit ülkemizde yaygın olarak bulunan önemli bir demir mineralidir. Demir karbonat bileşiği olan siderit, FeCO_3 formülü ile gösterilmektedir. Yoğunluğu $3.7\text{-}3.9\text{ g/cm}^3$ düzeyindedir [25].

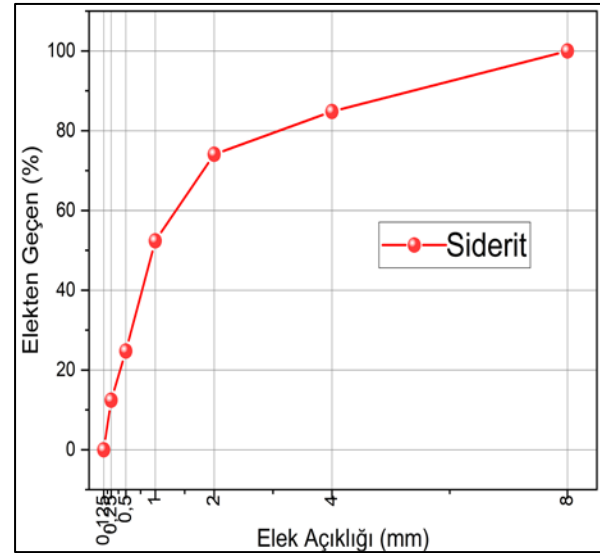
Siderit minerali, çimento ve beton üretiminde özellikle ağır beton uygulamalarında değerli bir katkı maddesi olarak öne çıkmaktadır. Siderit içeren betonların, yüksek yoğunlukları sayesinde gama ışınlarını zayıflatma katsayılarının yüksek olduğu ve bu nedenle radyasyon kalkını olarak etkili oldukları belirlenmiştir [26]. Elyiğit (2024) tarafından yapılan bir çalışmada, limonit ve siderit minerallerinin farklı oranlarda kullanıldığı beton numunelerinde, %80 oranında siderit içeren karışımların en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. Aynı çalışmada, %20 oranında siderit içeren karışımların radyasyon geçirimsizliğini artırdığı tespit edilmiştir [27]. Literatürde siderit mineralinin daha çok çimento ve beton endüstrisindeki kullanımları incelenmiş olup, polimer kompozitlerde etkisi yeterince araştırılmamıştır. Bu çalışma, siderit mineralinin polimer matrisli kompozitlerde dolgu malzemesi olarak kullanılmasının fiziksel, mekanik ve kalıcılık özellikleri ile iç yapı özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirerek, malzeme mühendisliği alanında yeni bir perspektif sunmaktadır.

Ayrıca, bu araştırma kapsamında elde edilen bulgular, polimer kompozitlerin yoğunluk, mekanik dayanım ve diğer kritik performans kriterleri açısından nasıl optimize edilebileceğini anlamaya yönelik bilimsel bir temel oluşturacaktır. Böylece, sürdürülebilir malzeme tasarımı ve alternatif dolgu malzemelerinin değerlendirilmesine katkı sağlayarak literatürdeki mevcut boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır. Bu doğrultuda, literatürde belirtilen farklı faz malzeme oranlarına uygun olarak, doymamış polyester reçine ağırlığının %0, %25, %50, "%75 ve %100'ü oranında siderit minerali ile ikame edilerek toplam beş farklı polimer kompozit numune grubu üretilmiştir. Elde edilen numunelerin fiziksel, mekanik ve dayanıklılık özellikleri ile iç yapı özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiştir.

MATERYAL ve YÖNTEM

Materyal

Polimer kompozit numunelerde takviye malzemesi olarak, Malatya ili Hekimhan bölgesinden temin edilen, yoğunluğu 3.55 g/cm^3 ve tane boyutu 0-4 mm arasında olan siderit minerali kullanılmıştır. Siderit mineralinin tane boyut dağılımına ait elek analizi sonuçları Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1: Siderit mineraline ait elek analizi sonuçları

Çalışmada kullanılan siderit mineralinin XRF analizi yapılmıştır. İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde gerçekleştirilen analizde, Na_2O , MgO , Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 ve MnO elementlerinin oranları sırasıyla %5.60, %6.93, %3.26, %4.43, %75.36 ve %3.90 olarak tespit edilmiştir. Diğer elementlerin miktarlarının ise %1'in altında olduğu belirlenmiştir. Kompozit numunelerin üretiminde bağlayıcı olarak, TP100 kodlu Turkuaz Firmasından temin edilen doymamış polyester reçine kullanılmıştır. Numune üretim sürecinde, reçine ve monomerin sertleşme reaksiyonunu başlatmak amacıyla %1 oranında Metil Etil Ketone Peroksit (MEKP) ve polimerizasyon reaksiyonunu hızlandırmak için %0.2 oranında Kobalt Octoate kullanılmıştır. MEKP ve Kobalt Octoate'in özellikleri sırasıyla Çizelge 1 ve Çizelge 2'de sunulmuştur.

Çizelge 1: MEKP Teknik Özellikleri

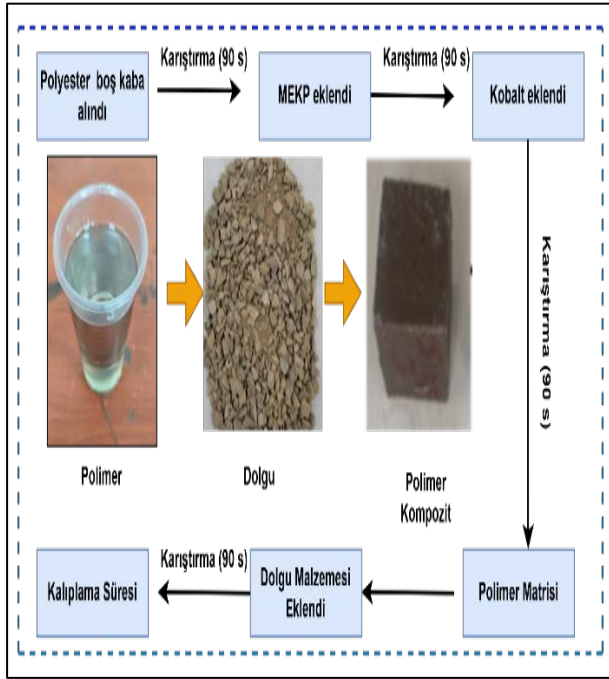
Yoğunluk g/cm^3	1.16
Renk	Renksiz
Aktif Oksijen İçeriği (%)	9.4-9.6
Peroksit İçeriği (%)	40

Çizelge 2: Kobalt Oktoat Teknik Özellikleri

Yoğunluk g/cm^3	0.93
Görünüm	Sıvı
Renk	Menekşe mavisi
Metal içeriği (%)	5.9-6.1
Toplam katı içeriği (%)	30±2

Üretim yöntemi ve analizler

Üretilen polimer kompozit numunelerin üretim yöntemi Şekil 2’de sunulmuştur. Şekil 2’de gösterildiği gibi, ilk aşamada polyester reçine bir kaba alınarak karıştırılmış ve daha sonra polyester reçinenin ağırlıkça %1 oranında MEKP eklenerek karıştırma süreci devam ettirilmiştir. Son olarak, %0.2 oranında kobalt eklenmiş ve karıştırılarak polimer matrisi elde edilmiştir. İkinci aşamada, üretilen polimer matrisine ağırlıkça %0, %25, %50, %75 ve %100 oranında siderit minerali katılmış ve homejenisasyon sağlanması için mekanik bir karıştırıcıda karıştırılmıştır. Tüm karıştırma süreçleri 90 s (saniye) boyunca mekanik karıştırıcıda yapılmıştır. Elde edilen matris ve takviye malzemesi karışımı, kalıplarda bekletilmiştir. 24 saat sonra, polimer kompozit numuneler kalıplardan çıkartılarak normal oda sıcaklığında (23 ± 2 °C) kür edilmiştir. Kür edilen numuneler üzerinde gerekli fiziksel mekanik ve kalıcılık testlerine ait deneyler yapılmıştır.



Şekil 2: Polimer Kompozit Numunelerin Üretim Yöntemi

Siderit minerali, doymamış polyester reçineye ağırlıkça %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında karışıma dahil edilmiştir. Karışım oranları ve bunlara karşılık gelen kodlar Çizelge 3’te gösterilmiştir.

Çizelge 3: Kodlama ve Kompozit Numune Grupları

Bileşenler	Karışım Kodları				
	PS0	PS25	PS50	PS75	PS100
Polyester	%100	%100	%100	%100	%100
Siderit	-	%25	%50	%75	%100
Minerali					
MEKP	%1	%1	%1	%1	%1
Kobalt	%0.2	%0.2	%0.2	%0.2	%0.2

Polimer kompozitlerin yoğunluk değerleri, TS EN 12390-7 (2021) standardına uygun olarak belirlenmiştir. Ultrases geçiş hızı deneyleri ASTM C 597 (2022) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Yoğunluk ve ultrases geçiş hızı deneylerinde 5x5x5 cm boyutunda 3 adet tekrarlanan deney numunesi kullanılmıştır. Ölçümler sonucunda elde edilen verilerin ortalaması alınarak yoğunluk ve ultrases geçiş hızı değerleri belirlenmiştir. Basınç dayanımı deneyi TS EN 12390-3 (2019) standardına göre gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı değerlerin belirlenmesinde Yüksel Kaya Makine marka UTC-4031 600 kN otomatik basınç dayanım test presi kullanılmıştır. Her bir polimer kompozit numune grubundan 5x5x5 cm boyutunda adet numune üretilmiştir. Elde edilen sonuçların, aritmetik ortalamaların alınmasıyla basınç dayanımı değerleri hesaplanmıştır.

Eğilme dayanımına ait gerilme değerini TS EN 12390-5 (2019) standardına uygun olarak hesaplanmıştır. Eğilme dayanımı testi, U Test 5540 model 200 kN kapasiteli test cihazında, üç nokta eğme yöntemi kullanılarak ve 0.01-0.1 mm/dakika yükleme hızıyla gerçekleştirilmiştir. Eğilme dayanımı deneyinde 4x4x16 cm boyutunda 3 adet tekrarlanan deney numunesi kullanılmıştır. Bütün numuneler 23 ± 2 °C kür edilmiştir. Yapılan çalışmada kalıcılık özellikleri olarak donma – çözülme ve sülfat etkisi sonrası basınç dayanımı parametreleri incelenmiştir.

Donma çözülme deneyi TSE CEN/TS 12390-9 (2017) standardına göre yapılmıştır. Sülfat etkisini belirlemek için kimyasal formülü Na_2SO_4 olan sodyum sülfat kullanılmıştır. Hazırlanan sodyum sülfat çözeltisi ASTM C 1012 (2024) standardına uygun olarak çözeltide 1ml/cm³ sülfat kullanılmış ve yapılan çalışmada %5’lik sülfat çözeltisi kullanılmıştır. Ayrıca iç yapı analizlerini belirlemek için SEM ve FTIR analizleri yapılmıştır.

BULGULAR ve TARTIŞMA

Üretilen polimer kompozitlerin fiziksel, mekanik ve kalıcılık özellikleri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler Çizelge 4’de sunulmuştur.

Çizelge 4: Polimer Kompozit Numunelerin Test Sonuçları

Kod	Yoğunluk (g/cm ³)	Ultrases geçiş hızı (km/s)	Basınç dayanımı (MPa)
PS0	1.23	2.60	116.12
PS25	1.72	3.37	91.59
PS50	2.16	3.56	97.53
PS75	2.35	3.73	109.28
PS100	2.57	3.82	113.32

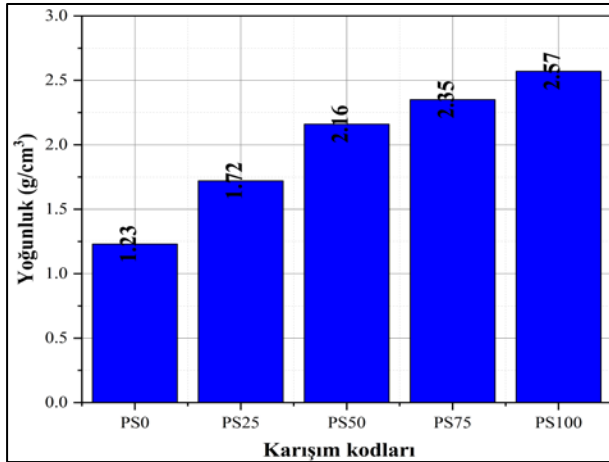
Kod	Eğilme dayanımı (MPa)	DÇ. Sonrası basınç dayanımı (MPa)	SS. sonrası basınç dayanımı (MPa)
PS0	29.72	115.28	115.97

PS25	23.64	88.21	91.33
PS50	25.41	94.76	97.32
PS75	27.14	107.82	109.11
PS100	28.25	112.26	113.15

Yoğunluk ve ultrases geçiş hızı değerleri

Kompozitlerin yoğunluk değerleri Şekil 3'te sunulmuştur. Şekil 3'de sunulan verilere göre, siderit minerali oranındaki artışla birlikte kompozitlerin yoğunluklarında belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Kontrol numunesi (PS0) 1.23 g/cm³ yoğunluk değerine sahipken, en yüksek siderit minerali oranına sahip PS100 numunesinin yoğunluğu 2.57 g/cm³ olarak tespit edilmiştir. Kontrol numunesine kıyasla PS25, PS50, PS75 ve PS100 kodlu numunelerde sırasıyla, %39.84, %75.61, 91.06 ve 108.94 oranında artış meydana gelmiştir.

Yoğunlukta gözlemlenen bu artış, üretim sürecinde düşük yoğunluklu polyester matrisine, yoğunluğu daha yüksek olan siderit mineralinin artan oranlarda eklenmesinden kaynaklanmaktadır. Elde edilen bulgular, literatürde rapor edilen benzer çalışmalarla uyumlu sonuçlar sunmaktadır [14,18,28].

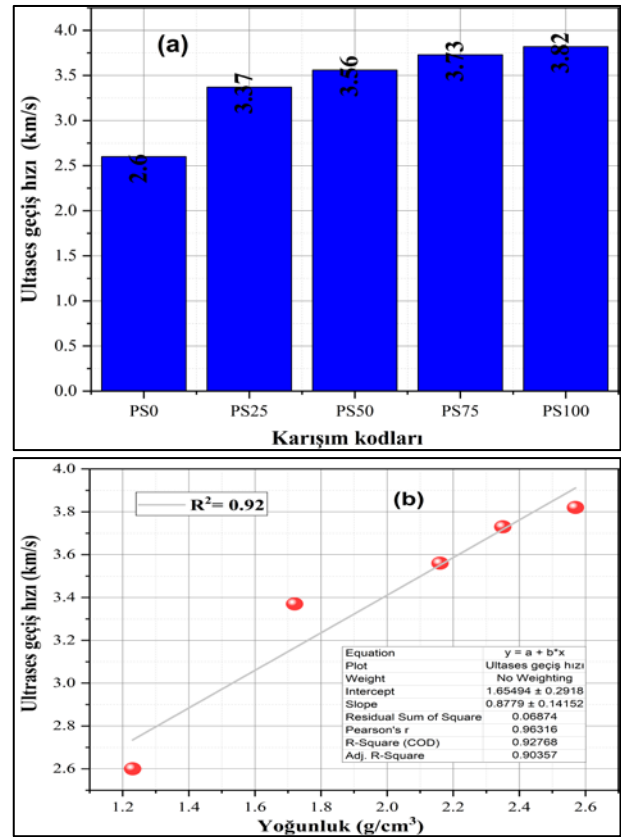


Şekil 3: Polimer Kompozitlerin Yoğunluk Değerleri
Kompozitlerin ultrases geçiş hızı değerleri Şekil 4a'da sunulmuştur. Ultrases geçiş hızı değerleri incelendiğinde PS0 numunesinde 2.6 km/s olan ultrases geçiş hızı, PS100 numunesinde 3.82 km/s değerine ulaşmıştır. Sideritin matris ile güçlü bir bağ oluşturduğunu ve boşluk oranını azalttığını göstermektedir. Bu durum, mekanik dayanım açısından olumlu bir etki yaratmıştır. Literatürde, ultrases geçiş hızının malzeme yoğunluğu ve mekanik özellikleri ile doğru orantılı olduğu belirtilmiştir [29]. Ayrıca, ultrases geçiş hızındaki artış, malzeme içerisindeki mikro boşlukların azalması ve matris-filler arasındaki bağlanma kalitesinin artması ile açıklanabilir [30]. PS100 numunesinde en yüksek ultrases geçiş hızının gözlenmesi, kullanılan takviye malzemesinin, kompozit yoğunluğunu artırarak boşluk oranını

azalttığını ve böylece daha kompakt bir yapı oluşturduğunu göstermektedir.

Bu durum, beton ve kompozit malzemelerde benzer etkilerin gözlemlendiği çalışmalarla uyumludur. Örneğin, Li et al. (2020) [29], farklı oranlarda katkı maddesi içeren beton karışımlarında, takviye oranı arttıkça ultrases geçiş hızının değerlerinin arttığını bildirmiştir.

Basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı arasında doğrudan bir ilişki olmasa da yoğunluk ile ultrases geçiş hızı arasında belirli bir ilişki bulunmaktadır [30]. Yoğunluk arttıkça ultrases geçiş hızının arttığı gözlemlenmiştir. Bu ilişki, Şekil 4b'de gösterilen korelasyon katsayısı ($R^2=0.92$) ile açıkça ortaya konulmuştur.



Şekil 4: Ultrases Geçiş Hızı Değerleri (a) Yoğunluk Ultrases Geçiş Hızı İlişkisi (b)

Basınç dayanımı ve eğilme dayanımı değerleri

Basınç ve eğilme dayanımı değerleri Şekil 5'te sunulmuştur. Şekil 5a'da verilen basınç dayanımı değerleri incelendiğinde, siderit minerali oranının artışıyla birlikte kontrol numunesine kıyasla basınç dayanımında %21 ile %2 arasında azalma kaydedilmiştir. Bununla birlikte, yalnızca agregaya içeren karışımlar (PS25, PS50, PS75 ve PS100) karşılaştırıldığında, artan siderit oranının basınç dayanımını artırdığı gözlemlenmiştir. Bu durum, matristen daha yüksek ezilme dayanımına sahip olan siderit agregalarının karışım içindeki hacimsel oranının artışıyla ilişkilendirilmiştir.

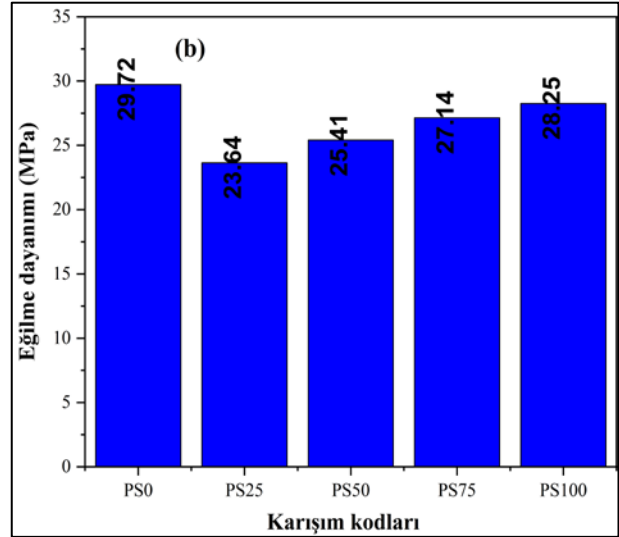
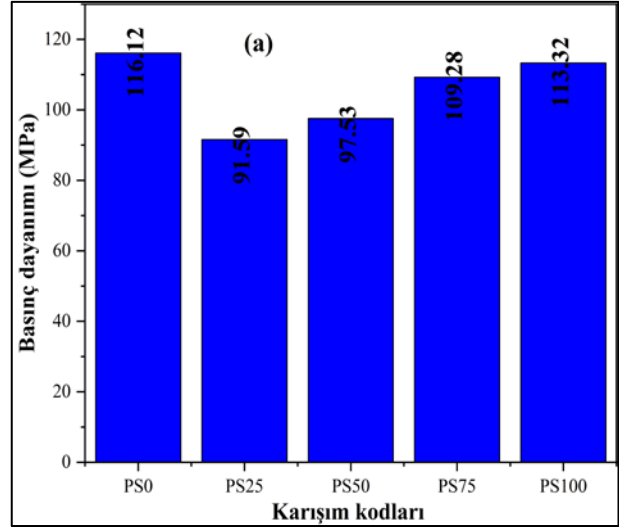
Zhang and Wang (2015) [31], siderit mineralinin yüksek yoğunluk ve mekanik dayanım özellikleri nedeniyle, özellikle yüksek basınçta dayanıklı yapılarda kullanım için uygun olduğunu belirtmiştir. Benzer şekilde, Kuo and Huang (2012) [33], tarafından yapılan bir çalışmada, dolgu oranının belirli bir eşik değerine ulaşmasının, kompozit malzemelerin mekanik dayanımını artırdığı, ancak aşırı dolgu kullanımının matrisin bağlayıcılık kapasitesini azaltarak dayanımı olumsuz etkileyebileceği ifade edilmiştir. Ayrıca, Zhang and Li (2015) [34], yüksek yoğunluklu minerallerin matriste çatlak ilerlemesini yavaşlattığını ve bu durumun dayanımı artırdığını bildirmiştir. Bu bağlamda, PS25, PS50, PS75 ve PS100 kodlu numunelerde artan siderit oranına bağlı olarak gözlemlenen dayanım artışı, literatürde belirtilen minerallerin mekanik özelliklere katkısıyla uyumludur. Sonuçlar, takviye malzemesi ve matris arasındaki etkileşimlerin, kompozit malzemelerin performansını optimize etmek için dikkatle ele alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

Eğilme dayanımı değerleri (Şekil 5b) incelendiğinde, kontrol numunesine (PS0) kıyasla siderit minerali oranının artışıyla birlikte bir miktar dalgalanma olduğu görülmektedir.

PS25 kodlu numunede eğilme dayanımı %20 oranında azalmış, ancak siderit oranının daha yüksek olduğu PS50, PS75 ve PS100 numunelerinde dayanımda kademeli bir artış gözlemlenmiştir. PS100 kodlu numunenin eğilme dayanımı, kontrol numunesine oldukça yakın bir değer olan 28.25 MPa olarak tespit edilmiştir. Bu artış, siderit minerali içeren agregaların matrisle etkileşiminin ve yüksek yoğunluklu agregaların yük aktarımına olan katkısının bir sonucu olarak değerlendirilmiştir.

Literatürde, takviye malzemesi oranı ve özelliklerinin eğilme dayanımı üzerindeki etkisi sıkça vurgulanmıştır. Örneğin, Zhang and Wang (2015) [31], yüksek yoğunluklu minerallerin matrisle güçlü bir bağ oluşturmalarının, eğilme dayanımını artırdığını belirtmiştir. Zhang and Li (2015) [33], takviye malzemelerinin matristeki mikro çatlak ilerlemesini yavaşlatarak eğilme dayanımını artırabileceğini rapor etmiştir.

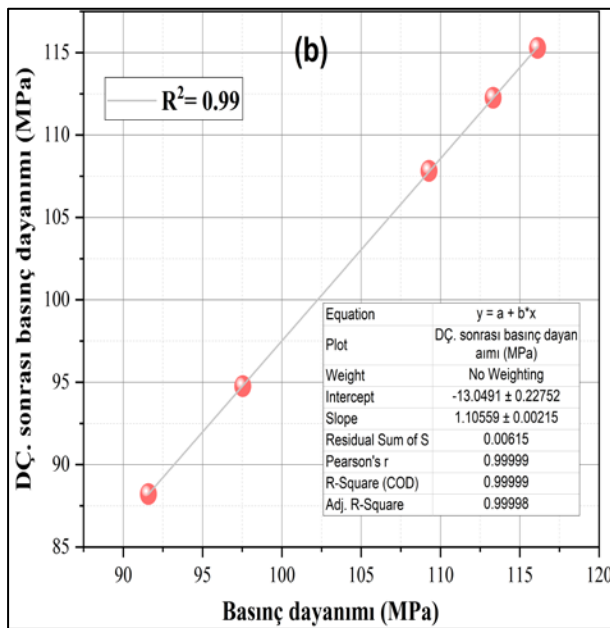
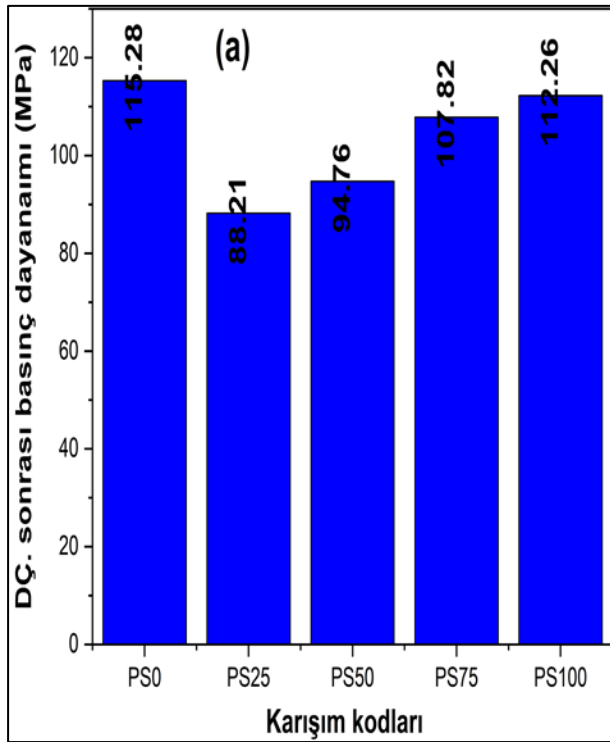
Bu bağlamda, siderit minerali katkısının mekanik dayanım üzerindeki etkisi değerlendirilirken, ekonomik parametreler de göz önünde bulundurulmalıdır. Veriler, katkısız numunenin en yüksek dayanımı sağladığını gösterse de siderit minerali katkısının belirli oranlarda kullanımının dayanımı kabul edilebilir seviyelerde tuttuğu görülmektedir. Bu durum, sideritin düşük maliyetli bir dolgu malzemesi olarak kullanılmasıyla üretim maliyetlerini azaltabileceğini göstermektedir. Özellikle yüksek oranda polimer kullanımı, maliyetleri artırırken, siderit gibi doğal ve bol bulunan bir mineralin belirli oranlarda eklenmesi malzeme tüketimini optimize ederek daha ekonomik ve sürdürülebilir bir üretim sürecine katkı sağlayabilir. Ancak, dayanımda görülen düşüş dikkate alındığında, optimum katkı oranının belirlenmesi hem maliyet etkinliği hem de performans açısından kritik bir faktör olarak değerlendirilmektedir.



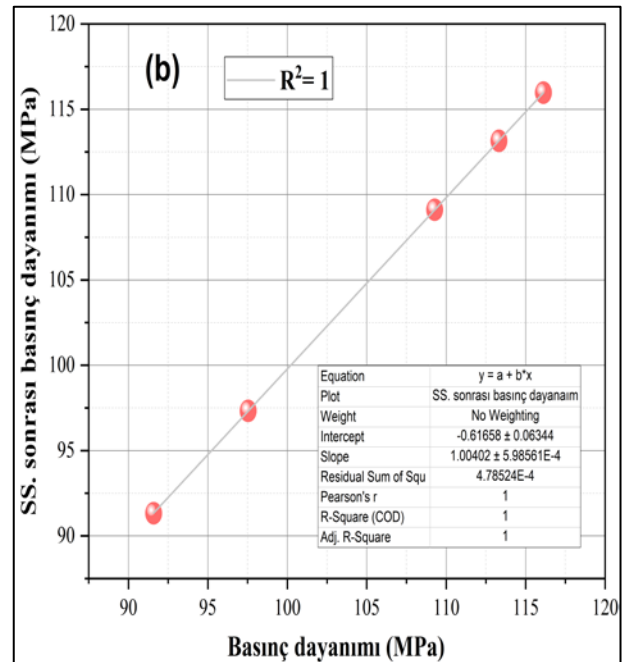
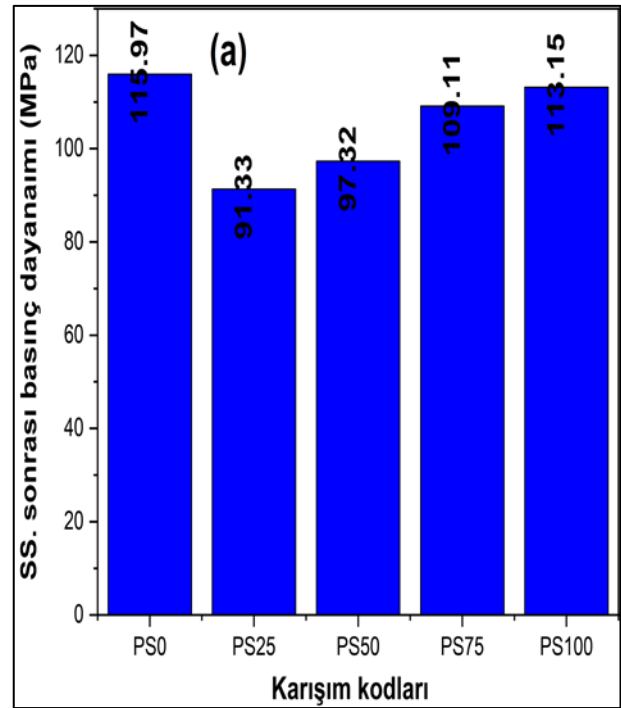
Şekil 5: Basınç Dayanımı (a) Eğilme Dayanımı (b) Değerleri

Dayanıklılık özellikleri

Donma- çözülme sonrası basınç dayanımı değerleri Şekil 6a'da gösterilmiştir. Şekil 6a incelendiğinde kontrol numunesinin (PS0) basınç dayanımı değeri 115.28 MPa olarak ölçülmüş olup basınç dayanımı değeri ile karşılaştırıldığında %0.72 oranında azalma meydana gelmiştir. Tüm kompozit numune serilerinde siderit minerali oranının artmasıyla orantılı bir artış elde edilmiştir. Ancak DÇ öncesi basınç dayanımı ile karşılaştırıldığında sırasıyla %3.69, %2.84, %1.34 ve %0.94 oranında azalma meydana gelmiştir. Bu durum düşük takviye miktarına sahip numunelerdeki ayrışmadan kaynaklandığı şeklinde yorumlanmıştır. Reçine/takviye oranına bağlı olarak daha önce yapılan çalışmalarla uyumludur [35]. DÇ öncesi ve DÇ sonrası basınç dayanımları arasındaki ilişki (Şekil 6b) incelendiğinde aralarında yüksek bir belirleyicilik katsayısı ($R^2= 0.99$) elde edilmiştir.



Şekil 6: DC. Sonrası Basınç Dayanımı Değerleri (a) DC. Sonrası Basınç Dayanımı Değerleri ve DC. Öncesi Basınç Dayanımı İlişkisi (b)



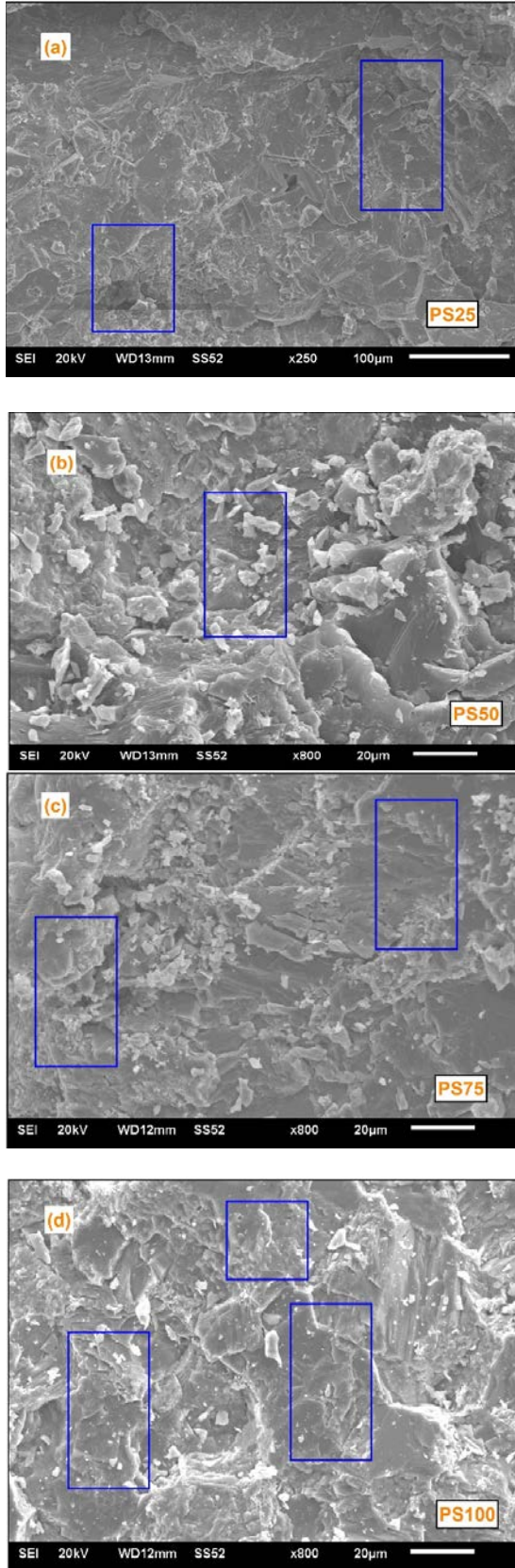
Şekil 7: SS. Sonrası Basınç Dayanımı Değerleri (a) SS. Sonrası Basınç Dayanımı Değerleri ve SS. Öncesi Basınç Dayanımı İlişkisi (b)

Sülfat etkisi sonra basınç dayanımı değerleri Şekil 7a'da sunulmuştur. Şekil 7a incelendiğinde siderit oranının artmasıyla basınç dayanımı değerlerinde artış elde edilmiştir. Ancak sülfat etkisi öncesi basınç dayanımı ile karşılaştırıldığında sırasıyla %0.12, %0.28, %0.21, %0.15 ve %0.15 oranında azalma meydana gelmiştir. Meydana gelen azalama miktarı çok düşük düzeyde olup, bu durum Şekil 7b'de verilen ilişkiden ($R^2=1$) anlaşılmaktadır.

İç yapı analizleri

Üretilen polimer kompozit numunelerin basınç dayanımı testleri sonrasında kırılan yüzeylerinden alınan parçalar, reçine/ takviye arayüz bölgelerinin incelenmesi amacıyla, her bir analizde ortalama 800x büyütme taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Arayüzün yapısını belirlemek amacıyla,

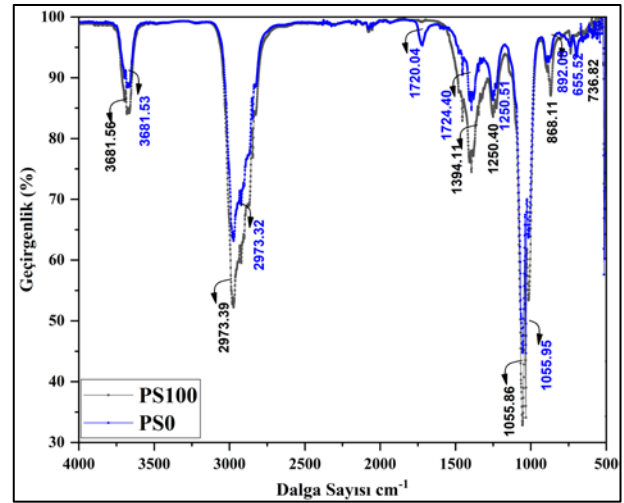
farklı parlaklık ve yüzey pürüzlülüğüne sahip görüntü bölgeleri analiz edilmiştir.



Şekil 8: PS25 (a) PS50 (b) PS75 (c) PS100 (d) Kodlu Numunelere Ait Sem Görüntüleri

PS25 ve PS50 örneklerinde, polimer matris ile takviye malzemesi arasında daha fazla boşluk olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 8a ve b). Bu durum, üretim sürecinde polimer matris ve takviye malzemesi arasındaki uyumsuzluk nedeniyle oluşan faz ayrışması ve düzensiz dağılımdan kaynaklanmış olabilir. Buna karşılık, PS75 ve PS100 örneklerinde daha kompakt (yoğun, boşluksuz ve sıkı bir içyapıya sahip) bir yapı olduğu görülmüştür. Bu durum, polyester ile dolgu malzemesi arasındaki ayrışmanın azaldığını ve polyesterin boşlukları tamamen doldurduğunu göstermektedir.

Polimer kompozit numunelerin mikroyapı analizi, Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi (FTIR) yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. FTIR spektrumları, 4000-500 cm^{-1} aralığında geçirgenlik modunda elde edilmiştir. Analiz sonuçları Şekil 9'da sunulmuştur.



Şekil 9: Polimer Kompozitlere Ait FTIR Analiz Sonuçları

Şekil 9'da sunulan FTIR analiz sonuçlarına göre, PS0 ve PS100 kodlu kompozit numunelerde benzer pik oluşumları gözlemlenmiştir. Ortalama olarak, tüm kompozit serilerinde 3681, 2973, 1721, 1394, 1250, 1055, 868, 736 ve 698 cm^{-1} dalga sayıları arasında titreşim pikleri tespit edilmiştir. Analizler, 3681 cm^{-1} dalga boyunda belirgin bir değişim göstermeyen adsorbe edilmiş nem piki olduğunu ortaya koymuştur. Pik boyutlarının incelenmesi sonucunda, PS100 kodlu numunede daha belirgin bir nem piki gözlenmiş ve bu durum, siderit mineralinin daha fazla nem tutma özelliğine bağlıdır.

Üretilen polimer kompozitlerde diğer karakteristik pikler arasında, CH_2 ve CH_3 gruplarına karşılık gelen 2973.53 cm^{-1} piki [36] yer almaktadır. Ayrıca, karbonil grubuna karşılık gelen 1727 cm^{-1} 'de karakteristik bir pik bulunmuş olup, bu pik dolgu malzemesi miktarı arttıkça kaybolma eğilimi göstermiştir [37]. Bunun yanında, kompozit numunelerde 1055 cm^{-1} 'de simetrik aromatik C-O esnemesine karşılık gelen karakteristik bir tepe noktası tespit edilmiştir [38]. Bu pik, PS100 kodlu numunede daha belirgin bir şekilde tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, polimer reçine (PS0) ve siderit katkı (PS100) numunelerin FTIR analizlerinde belirli pik boyutlarının farklılık gösterdiği görülmüştür. Bu farklılıkların, numunelerin mekanik özellikleri üzerinde etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

SONUÇ

Bu çalışmada, farklı oranlarda siderit minerali kullanılarak üretilen polimer kompozitlerin fiziksel, mekanik ve mikro yapısal özellikleri incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, siderit oranındaki artışın kompozit yoğunluğunu belirgin bir şekilde artırdığını göstermiştir. PS0 numunesinde 1.23 g/cm³ olarak ölçülen yoğunluk, PS100 numunesinde 2.57 g/cm³'e ulaşmıştır (%108.94 artış). Benzer şekilde, ultrases geçiş hızı PS0 numunesinde 2.6 km/s iken PS100 numunesinde 3.82 km/s olarak tespit edilmiştir.

Siderit oranının artışı, kontrol numunesine kıyasla basınç dayanımında %21 ile %2 arasında bir azalmaya neden olmuştur. Ancak sadece siderit içeren numuneler arasında, mineral oranının artışı dayanımı artırmıştır. Bu durum, düşük siderit oranlarında matris-filler etkileşiminin zayıflamasıyla dayanımın düştüğünü, ancak yüksek oranlarda agregalar arası bağlanmanın güçlenerek dayanımı artırdığını göstermektedir. Eğilme dayanımı ise belirli bir doğrusal eğilim göstermemekle birlikte, PS100 numunesinde kontrol numunesine yakın bir değer elde edilmiştir. Bu sonuçlar, sideritin belirli bir oran üzerinde kullanıldığında yapısal katkı sağladığını, ancak düşük oranlarda mekanik dayanımı olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir. Sülfat etkisi sonrası basınç dayanımında düşük düzeyde azalmalar gözlenmiş, ancak bu azalmalar sülfat etkisi öncesi ve sonrası dayanım arasındaki yüksek ilişkiyi ($R^2=0.99$) değiştirmemiştir. Mikro yapı analizleri, özellikle PS75 ve PS100 numunelerinde daha kompakt bir yapı oluştuğunu ve matris-dolgu malzemesi arasındaki bağların güçlendiğini ortaya koymuştur. Elde edilen sonuçlar, siderit mineralinin polimer kompozitlerde dolgu malzemesi olarak kullanımının yoğunluk ve fiziksel özellikler üzerinde olumlu etkileri olduğunu, ancak mekanik dayanımların tasarım aşamasında dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

TEŞEKKÜR

1919B012301584 numaralı projemizi destekleyen TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığına (BİDEB) katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

- [1] Jose J. P., Joseph K. Advances in Polymer Composites: Macro- and Microcomposites – State of the Art, New Challenges, and Opportunities. In Polymer Composites (pp. 1–16). Wiley, 2012.
- [2] Nassar M. M., Arunachalam R., Alzebeid K. I. Machinability of natural fiber reinforced

composites: A review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 88(9-12):2985-3004, 2017.

- [3] Thakur R. K., Singh K. K., Ramkumar J. Experimental investigation of abrasive waterjet hole cutting on hybrid carbon/glass composite. Materials Today: Proceedings., 21: 1551-1558, 2020.
- [4] Reis J.M.L.D. Effect of textile waste on the mechanical properties of polymer concrete. Materials Research, 12(1):63-67, 2009.
- [5] Tavares C.M.L., Ribeiro M.C.S., Ferreira A.J.M., Guedes.R.M. Creep behaviour of FRP-reinforced polymer concrete. Composite Structures., 57(1-4):47-51, 2002.
- [6] Dharmarajan, N. Flexural creep behavior of polymer concrete systems., Rice University, 1987.
- [7] ACI Committee 548. Guide for the use of polymers in concrete (ACI 548, IR-86)., American Concrete Institute, 1986.
- [8] Wang L., Qiu H., Liang C., Song P., Han Y., Han Y., Guo Z. Electromagnetic interference shielding MWCNT-Fe₃O₄@Ag/epoxy nanocomposites with satisfactory thermal conductivity and high thermal stability. Carbon., 141, 506-51, 2019.
- [9] Yang X., Guo Y., Luo X., Zheng N., Ma T., Tan J., Gu J. Self-healing, recoverable epoxy elastomers and their composites with desirable thermal conductivities by incorporating BN fillers via in-situ polymerization. Composites Science and Technology., 164:59-6, 2018.
- [10] Guo Y., Ruan K., Shi X., Yang X., Gu J. Factors affecting thermal conductivities of the polymers and polymer composites: A review. Composites Science and Technology., 193- 108134, 2020.
- [11] Spaeth V., Tegguer A. D. Improvement of recycled concrete aggregate properties by polymer treatments. International Journal of Sustainable Built Environment, 2(2):143-152, 2013.
- [12] Hameed A.M., Hamza M.T. Characteristics of polymer concrete produced from wasted construction materials. Energy Procedia., 157,43-50, 2019.
- [13] Velardo P., del Bosque I.S., Matías A., de Rojas M.S., Medina C. Properties of concretes bearing mixed recycled aggregate with polymer-modified surfaces. Journal of Building Engineering, 38:10221, 2021.
- [14] Soykan O., Özel C. Mermer tozu tane boyutunun polimer beton özelliklerine etkisi. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 4(3):102-111, 2012.
- [15] Özel C., İren, B. Polimer betonlarda gaz beton atıklarının kullanılabilirliğinin araştırılması. Teknik Bilimler Dergisi, 6(2):28, 2016.
- [16] Barbuta M., Harja M., Baran I. Comparison of mechanical properties for polymer concrete with different types of filler. Journal of Materials in Civil Engineering., 22(7): 696-701, 2010.

- [17] Barbuta M., Rujanu M., Nicuta A. Characterization of polymer concrete with different wastes additions. *Procedia Technology.*, 22:407-412, 2016.
- [18] Polat H., Üstün İ., Şafak A., Çakılcıoğlu AN. Atık tuğla tozunun polimer betonda katkı malzemesi olarak kullanımı: Mekanik özelliklerin incelenmesi. *Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi.*, 4(2):76-86, 2023.
- [19] Uygunoğlu T., Brostow W., Gencel O., Topcu I.B. Bond strength of polymer lightweight aggregate concrete. *Polymer Composites*, 34(12):2125-2132, 2013.
- [20] Rebeiz K.S., Serhal S.P., Craft A.P. Properties of polymer concrete using fly ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(1):15-19, 2004.
- [21] Varughese K.T., Chaturvedi B.K. Fly ash as fine aggregate in polyester based polymer concrete. *Cement and Concrete Composites*, 18(2):105-108, 1996.
- [22] Akman F., Ozkan I., Kaçal M. R., Polat H., Issa S. A., Tekin H. O., Agar O. Shielding features, to non-ionizing and ionizing photons, of FeCr-based composites. *Applied Radiation and Isotopes.*, 167-109470, 2021.
- [23] Turhan M.F., Akman F., Polat H., Kaçal M. R., Demirkol İ. Gamma-ray attenuation behaviors of hematite doped polymer composites. *Progress in Nuclear Energy.*, 129:103504, 2020.
- [24] Sharma A., Sayyed M. I., Agar O., Kaçal M. R., Polat H., Akman F. Photon-shielding performance of bismuth oxychloride-filled polyester concretes. *Materials Chemistry and Physics.*, 241, 122330, 2020.
- [25] Topçu, İ. B., Hocaoglu, İ., & Adıl, F. M. A. Ağır Betonlardaki Güncel Gelişmelere Genel Bir Bakış. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 14(2), 385-399, 2023.
- [26] Elyiğit, A., Başyigit, C., & Alkayış, M. H. Farklı mineral kökenli ağır betonların mekanik özelliklerinin araştırılması. *Engineering Sciences*, 19(1), 2024.
- [27] Aşan B. B. Siderit Cevherindeki Demirin Farklı Sıcaklıklarda Bazı Metallerle Olan İlişkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016.
- [28] Topsakal A., Özel C. Faz malzeme oranının polimer beton özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılması. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 9(1):16-28, 2013.
- [29] Neville, A. M. *Properties of Concrete* (5th ed.). Pearson Education, 2011.
- [30] Li Z., Wang Y., Zhang X. Effect of admixtures on ultrasonic pulse velocity and mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 234, 117210, 2020.
- [31] Sevinc A.H., Durgun M.Y., Eken M. A Taguchi approach for investigating the engineering properties of concretes incorporating barite, colemanite, basaltic pumice and ground blast furnace slag. *Construction and Building Materials.*, 135:343-351, 2017.
- [32] Zhang Q., Wang Y. The influence of siderite mineral addition on the mechanical properties of cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 78, 166-172, 2015.
- [33] Kuo W.T., Huang J.S. Effect of aggregate gradation on mechanical properties of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 42(3), 720-728, 2012.
- [34] Zhang H., Li C. High-density mineral fillers in composite materials: Effects on crack propagation and mechanical strength. *Journal of Composite Materials*, 49(15), 1897-1910, 2015.
- [35] Özden Ç.A. Polimer betonların donma-çözülme etkisine dayanıklılığı, Namık kemal üniversitesi, Fen bilimleri enstitüsü, Tekirdağ, Türkiye, 2010.
- [36] Rosu D., Cascaval C.N., Rosu L.. Synthesis and characterization of some composites with bioactive properties on the basis of vinyl ester resins. *e-Polymers*, 8(1):105, 2008.
- [37] Özel F., Akman F., Kaçal M. R., Ozen A., Arslan H., Polat H., Agar O. Production of microstructure BaZrO₃ and Ba₂P2O₇-based polymer shields for protection against ionizing photons. *Journal of Physics and Chemistry of Solids.*, 158-110238, 2021.
- [38] Adıbelli Ü., Mutlu D., Çakır Y. N., Karagöz İ. Ceviz kabuğu dolgulu epoksi hibrit kompozit malzemelerin hazırlanması ve karakterizasyonu. 10. Uluslararası Lif ve Polimer Araştırmaları Sempozyumu., 13-14, 2022.

Bazı Kongrüans Alt Grupların Normalliyenlerinin Ürettiği Devreler ve Yollar

Tuncay KÖROĞLU¹

¹ Matematik, Fen Fakültesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye

✉: tkor@ktu.edu.tr  [0000-0002-1341-1074](https://orcid.org/0000-0002-1341-1074)

Geliş (Received): 07.03.2025

Düzeltilme (Revision): 07.05.2025.

Kabul (Accepted): 22.06.2025

ÖZ

Bu çalışmanın amacı; Modüler grubun bazı kongrüans alt gruplarının $PSL(2, \mathbb{R})$ 'deki normalliyenlerinin genişletilmiş rasyonel sayılar kümesi üzerindeki hareketinden elde edilen sonlu devreleri ve sonsuz uzunluklu yolları incelemektir. Çalışmada, Atkin-Lehner tipi dönüşümler ele alınarak, özellikle bu dönüşümlerin oluşturduğu devreler ve yollar incelenmiştir. Bunu yaparken kullandığımız yöntem, belirli matris çarpımları ile bir yörünge üzerinde elde edilen alt yörüngesel grafların sonlu uzunluklu devreler ve sonsuz uzunluklu yollar oluşturup oluşturmadığını analiz etmektir. Ayrıca bu devrelerin ve yolların eliptik ve hiperbolik elemanlarla olan ilişkisini ortaya koyduk. Çalışmada, belirli bir p asal sayısı seçilerek, farklı durumlar için modüler grubun alt grupları oluşturuldu ve bu alt grupların genişletilmiş rasyonel sayılar üzerindeki hareketi incelendi.

Anahtar Kelimeler: Modüler Grup, Devreler, Yollar.

Circuits and Paths Generated by the Normalizers of Some Congruence Subgroups

ABSTRACT

The aim of this study is to investigate the finite circuits and infinitely long paths obtained by the action of the normalisers of certain congruence subgroups of the modular group in $PSL(2, \mathbb{R})$ on the extended set of rational numbers. In this study, Atkin-Lehner type transformations are considered, and in particular, the circuits and paths formed by these transformations are analysed. The method used involves analysing whether the suborbital graphs obtained from certain matrix multiplications along an orbit form finite-length circuits or infinite-length paths. Furthermore, the relationship between these circuits and elliptic elements is established, as well as the relationship between these paths and hyperbolic elements. In this study, a particular prime number p is chosen and modular subgroup structures are constructed for different cases. The action of these subgroups on the extended set of rational numbers is then studied.

Keywords: Modular Group, Circuits, Paths.

GİRİŞ

$PSL(2, \mathbb{R})$ ile; reel katsayılı, determinanı $ad - bc = 1$ olan $T(z) = \frac{az+b}{cz+d}$ biçimindeki üst yarı düzlemin konform otomorfizmalarının grubu gösterilsin. Bu grubun, tamsayı katsayılı dönüşümleri göz önüne alındığında, Matematikte çok önemli bir yeri olan $PSL(2, \mathbb{Z})$ modüler grubu elde edilir. Bu dönüşümler bileşke işlemine göre bir gruptur ve her bir elemanı $\pm \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$ matris çiftleriyle eşleştirilebilir. Bir dönüşümün iki farklı matrisle eşleşmesi karmaşasını ortadan kaldıracak biçimde $SL(2, \mathbb{Z}) = PSL(2, \mathbb{Z}) / \{\pm I\}$ bölüm grubunu göz önüne alacağız. $SL(2, \mathbb{Z})$ modüler grubunu kısaca Γ ile göstereceğiz. Böylece, fonksiyonlardaki bileşke işleminin yerine nispeten daha kolay olan matris çarpımı yapılabilir. Γ modüler grubunun alt grupları matematiğin çok farklı alanlarıyla ilgili çalışmalarda karşımıza çıkarlar. Özellikle sayılar teorisi ile ilgi problemlerin ele alınmasında oldukça önemli bir yerleri vardır. Örneğin Fermat'ın Son Teoremi'nin Andrew Willes tarafından

1994 yılında yapılan kanıtında, modüler gruplarla ilişkili olarak modüler formlar önemli rol oynar. Eliptik eğrilerin aritmetiği, eliptik integral, kuadratik formlar ve eliptik modüler fonksiyonlar teorilerindeki önemi nedeniyle Γ modüler grubunun kongrüans alt grupları olan $\Gamma(n)$, $\Gamma_0(n)$, $\Gamma^0(n)$, $\Gamma_1(n)$ grupları üzerinde çok sayıda çalışma yapıldı. Bizim çalışmamızda ise bu kongrüans alt gruplardan $\Gamma_0(n)$ grubu ana öğemiz olacaktır. $n > 1$ pozitif bir tamsayı olmak üzere $\Gamma_0(n)$ grubu,

$$\Gamma_0(n) = \left\{ \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in \Gamma : c \equiv 0 \pmod{n} \right\} \quad (1)$$

biçiminde tanımlanır. Ayrıca çalışmada $\Gamma_0(n)$ alt grubunun $PSL(2, \mathbb{R})$ grubundaki normalliyen alt grubunu $N_0(n)$ ile göstereceğiz. Newman, $N_0(n)$ ile ilgili ilk sonuçları verdi [1]. Bu sonuçlar matematiğin çeşitli alanlarına önemli katkılar sağlamıştır. Bu katkılardan belkide en önemlisi; “Monster Grubu” olarak bilinen basit grupların keşfi ve çözümlenmesi üzerine olan katkısıdır. Dahası, $N_0(n)$ normalliyenini, $\Gamma_0(n)$ ile ilişkili

$X_0(n)$ modüler eğrilerinin üzerindeki Weierstrass noktalarının bulunmasında önemli bir role sahiptir [2]. Bu çalışmada ise, sonraki bölümde detaylarını vereceğimiz ve [3] çalışmasında grup yapıları verilen bazı özel kongrüans alt grupların $PSL_2(\mathbb{R})$ deki normalliyenleri ele alındı. Bu normalliyenlerin, genişletilmiş rasyonel sayılar kümesi üzerindeki hareketinden doğan sayı dizileri ve alt yörüngesel graflar incelendi. Bu sayı dizileri ile dönüşümlerin tipleri arasında ilişkiler ortaya kondu. Ayrıca yine bu hareketin ürettiği devreler ve yollar incelendi.

MATERYAL ve YÖNTEM

Alt yörüngesel grafların incelenmesi sonucu doğan sonlu uzunluklu devreler ve bu devrelerin uzunlukları ile üretici eliptik elemanların mertebeleri arasındaki ilişki daha önceki bazı araştırmalarda ele alındı [4]. Yine alt yörüngesel graflar üzerine yapılan başka çalışmalarda ise sonsuz uzunluklu yolların ürettiği sayı dizilerinin, Fibonacci ve Lucas sayı dizileriyle olan ilişkileri araştırıldı [5,6]. Bu çalışmada da benzer yöntemler kullanılarak alt yörüngesel graf fikrinden yola çıkarak belirli özelliklere sahip dönüşümlerin ürettiği devreler ve sonsuz uzunluklu yollar incelendi. Tüm semboller tamsayı olmak üzere, [7]'de $N_0(n)$ normalliyen alt grubunun elemanları aşağıdaki gibi $GL_2^+(\mathbb{Q})$ grubunun matrisleriyle verilmiştir:

$$\begin{pmatrix} ae & \frac{b}{h} \\ \frac{cn}{h} & de \end{pmatrix} \quad (2)$$

Burada, h ile; $h^2|(n, 24)$ özelliğini sağlayan tamsayıyı ($(n, 24)$ gösterimi ile n ile e nin en büyük ortak bölenini gösterir) e sembolü ile de; $\frac{n}{h^2}$ tamsayısının bir tam bölünü (Hall Divisor) olan ve aynı zamanda matrisin determinantı olan $e = ade^2 - bc \frac{n}{h^2} > 0$ sayısı gösterilmiştir (e tamsayısının $\frac{n}{h^2}$ tamsayısını tam bölmesi demek; $\frac{n}{eh^2}$ ile $\frac{n}{h^2}$ tamsayılarının aralarında asal olması anlamına gelmektedir ve bu durum $e || \frac{n}{h^2}$ ile gösterilir). Eğer, bir t tamsayısının asal çarpanlara ayrılışı; $t = p_1^{\alpha_1} p_2^{\alpha_2} \dots p_r^{\alpha_r}$ biçiminde ise t tamsayısının tam olarak 2^r tane tam bölünü bulunur. Bir t tamsayısının tam bölünlerinin kümesi $TB(t)$ ile gösterilsin. $TB(t)$ 'nin iki elemanı u ve v olmak üzere; $u * v := \frac{u \cdot v}{(u, v)^2}$ biçiminde tanımlanan ikili işleme göre $TB(t)$ bir gruptur ve C_2^r grubuna izomorftur. Burada r sayısı, t sayısının farklı asal çarpanlarının sayısıdır [8].

İm ve arkadaşları [3] çalışmalarında; Denklem 3 ile verilen, modüler grubun iyi bilinen kongrüans alt gruplarından, Denklem 1 ile verilen $\Gamma_0(n)$ ile

$$\Gamma_1(n) := \left\{ \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in \Gamma : \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 1 & * \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \pmod{n} \right\}$$

alt grubu arasında kalan $\Gamma_\Delta(n)$ kongrüans alt grubunun $PSL_2(\mathbb{R})$ 'deki normalliyeninin grup yapısını özetle aşağıdaki gibi verdiler:

$$\Gamma_\Delta(n) = \left\{ \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in \Gamma_0(n) \mid a \in \Delta \right\} \quad (3)$$

Burada, Δ ile $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*$ nin herhangi bir alt grubu gösterilmiştir ve $-1 \in \Delta$ kabul edilmiştir.

Eğer, $\Delta = (\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})^*$ ise $\Gamma_\Delta(n) = \Gamma_0(n)$ olur.

Eğer, $\Delta = \{\pm 1\}$ ise $\Gamma_\Delta(n) = \pm \Gamma_1(n)$ olur.

Diğer hallerde ise, $\Gamma_1(n) \not\subseteq \Gamma_\Delta(n) \not\subseteq \Gamma_0(n)$ ilişkisi geçerli olacaktır. Ayrıca çalışma boyunca, $\Gamma_\Delta(n)$ nin $PSL_2(\mathbb{R})$ deki normalliyeni $N_\Delta(n)$ ile gösterilecektir. Tüm semboller tamsayı olmak üzere,

$$M = \begin{pmatrix} Qx & \frac{y}{h} \\ n \frac{z}{h} & Qw \end{pmatrix} \in PGL_2^+(\mathbb{Q}),$$

$Q || \frac{n}{h^2}$, $\det(M) = Q$ biçimindeki M matrisleri $N_\Delta(n)$ grubundadır [3].

Eğer $h = 1$ alınırsa M' 'yi A_Q ile göstereceğiz. Yani,

$$A_Q = \begin{pmatrix} Qx & y \\ nz & Qw \end{pmatrix}$$

biçiminde olup, bu tipli tüm elemanlar $\Gamma_0(n)$ 'nin normalliyenindedir. Bu elemanlara özel olarak Atkin-Lehner involusyonu adı verilir ve bu elemanların oluşturduğu gruba da Atkin-Lehner grubu adı verilir. Çok basit bir gözlemle, (2) biçimli elemanların $N_\Delta(n)$ grubunda olduğu açıktır. Aslında burada bahsedilen tüm gruplar, genel olarak Möbiüs dönüşümleri olarak bilinen $PGL_2(\mathbb{C})$ grubunun alt gruplarıdır. Bu grubun genişletilmiş kompleks sayılar kümesi üzerindeki hareketi göz önüne alınarak, elemanlarının sabit noktalarına göre sınıflandırmasını bu çalışmaya alt yapı olacak biçimde bir özet halinde verelim. Bunun için,

$$M = \begin{pmatrix} Qx & \frac{y}{h} \\ n \frac{z}{h} & Qw \end{pmatrix} \in PGL_2^+(\mathbb{Q})$$

matris gösterimi ile temsil edilen dönüşümler üzerinden aşağıdaki gibi bir sınıflandırma yeterli olacaktır. $\tau(M)$ ile M matrisinin normalleştirilmiş formunun izinin karesini gösterebiliriz. Yani, $\tau(M) := Q(x + w)^2$ olsun. Bu takdirde;

- M paraboliktir ancak ve ancak $\tau(M) = 4$,
- M eliptiktir ancak ve ancak $\tau(M) \in [0, 4)$,
- M hiperboliktir ancak ve ancak $\tau(M) > 4$.

Bu sınıflandırma ile; eğer M parabolik bir dönüşüm ise; genişletilmiş rasyonel sayılar kümesine düşen bir sabit noktası, eliptik bir dönüşüm ise; kompleks eşlenik iki sabit noktası ve hiperbolik bir dönüşümse; reel iki sabit noktası vardır [9].

YAPILAN ÇALIŞMALAR ve BULGULAR

$$\begin{pmatrix} Qx & y \\ nz & Qw \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r \\ s \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} Qxr + ys \\ nzs + Qws \end{pmatrix} \quad (4)$$

Denklem 4 ile verilen matris çarpımı ile Atkin-Lehner grubu, $\mathbb{Q} = \mathbb{Q} \cup \{\infty\}$ genişletilmiş rasyonel sayılar

kümesi üzerinde hareket eder. [10] çalışmasından farklı olarak biz burada; [3] çalışmasından ilham alarak, matrisin birinci girdisi olan x üzerinde kısıtlamalar yaptık. Ayrıca burada $n = p \neq 2$ tek asal sayı olarak seçilmiştir. Böylece, $Q = 1$ veya $Q = p$ olmak üzere $\Delta = (\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^* = \{1, 2, \dots, p-1\}$ ve $\Delta = \{1, p-1\}$ alt grupları göz önüne alınmıştır. Bu durumları; aşağıdaki gibi dört alt başlıkta inceledik.

i) $Q = 1, \Delta = (\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^* = \{1, 2, \dots, p-1\}$ Durumu:

Bu durumda, Denklem 4 ile verilen hareket aşağıdaki gibi olur.

$$\begin{pmatrix} x & y \\ pz & w \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r \\ s \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} xr + ys \\ pZR + ws \end{pmatrix} \quad (5)$$

Şimdi, bu hareket ile $\infty = \frac{1}{0}$ elemanının yörüngesini inceleyelim. Bu yörünge aşağıdaki gibi elde edilebilir ve genel terimini bulmak önemli bir problem olarak düşünülebilir.

$$\begin{pmatrix} x & y \\ pz & w \end{pmatrix} : \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} x \\ pz \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} pyz + x^2 \\ p(xz + zw) \end{pmatrix} \rightarrow \dots \quad (6)$$

Teorem 1. $E := \begin{pmatrix} x & y \\ pz & w \end{pmatrix}$ eliptik bir dönüşüm olmak üzere aşağıdaki durumlar söz konusudur:

a) $x + w = 0$ ise $p \equiv 1 \pmod{4}$ dir,

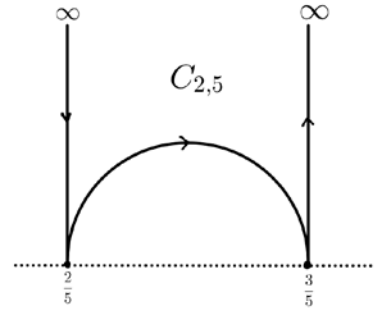
b) $x + w = \pm 1$ ise $\left(\frac{\mp \left(\frac{p+1}{2} \right) - 1}{p} \right) = 1$ eşitliği sağlanır,

burada $\left(\frac{a}{p} \right)$ Legendre sembolüdür. Yani; $\left(\frac{a}{p} \right) = 1$ olması, $x^2 \equiv a \pmod{p}$ kongrüans denkleminin çözümünün mevcut olması demektir.

İspat: a) $\begin{pmatrix} x & y \\ pz & w \end{pmatrix}$ dönüşümünün determinanı; $xw - pyz = 1$ olduğundan, $xw \equiv 1 \pmod{p}$ denkliği elde edilir. E dönüşümü eliptik olduğundan, $|x + w| \leq 1$ şartını sağlayan dönüşümleri göz önüne alacağız. İlk olarak, $x + w = 0$ için, $x^2 \equiv -1 \pmod{p}$ kongrüans denkleminin çözümünün olması için gerek ve yeter koşul, $p \equiv 1 \pmod{4}$ denkliği sağlanır (Kenneth, 2011). b) İkinci olarak, $|x + w| = 1$ için; yine E 'nin determinanı göz önüne alındığında istenen kolay bir şekilde elde edilir. ■

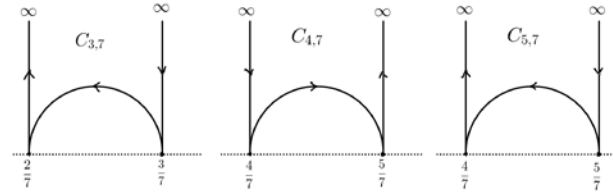
Bu teoremin her iki durumunu da aşağıdaki örneklerle açıklayabiliriz.

Örnek 1. a) $p = 5$ için $e_{2,5} = \begin{pmatrix} 2 & -1 \\ 5 & -2 \end{pmatrix}$ eliptik dönüşümü elde edilebilir. Bu dönüşümün ürettiği devreyi ($C_{2,5}$) üst yarı düzlem modelinin jeodezikleri yardımıyla aşağıdaki Şekil 1'deki gibi gösterebiliriz:



Şekil 1. $\infty \rightarrow \frac{2}{5} \rightarrow \frac{3}{5} \rightarrow \infty$ Devresi.

b) $p = 7, z = 1$ alındığında $e_{3,7} = \begin{pmatrix} 3 & -1 \\ 7 & -2 \end{pmatrix}$, $e_{4,7} = \begin{pmatrix} 4 & -3 \\ 7 & -5 \end{pmatrix}$ ve $e_{5,7} = \begin{pmatrix} 5 & -3 \\ 7 & -4 \end{pmatrix}$ eliptik dönüşümleriyle aşağıdaki Şekil 2 ile gösterilen $c_{3,7}$, $c_{4,7}$, $c_{5,7}$ devreleri elde edilir:



Şekil 2. $C_{3,7}$, $C_{4,7}$, $C_{5,7}$ Devreleri.

ii) $Q = p, \Delta = (\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^* = \{1, 2, \dots, p-1\}$ Durumu:

Bu durumda, Denklem 4 ile verilen hareket aşağıdaki gibi olur.

$$\begin{pmatrix} px & y \\ pz & pw \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r \\ s \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} pXR + ys \\ pZR + pws \end{pmatrix} \quad (7)$$

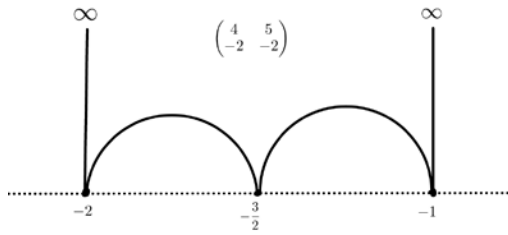
Bu hareket ile $\infty = \frac{1}{0}$ elemanının yörüngesi hesaplandığında elde edilen köşe dizisinin ilk birkaç terimi Denklem 8 ile gösterilebilir.

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} x \\ z \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} yz + px^2 \\ p(xz + zw) \end{pmatrix} \rightarrow \dots \quad (8)$$

Ayrıca bu başlıkta ele aldığımızda, eliptik dönüşümler için sadece, $Q = 2$ veya $Q = 3$ durumları söz konusudur.

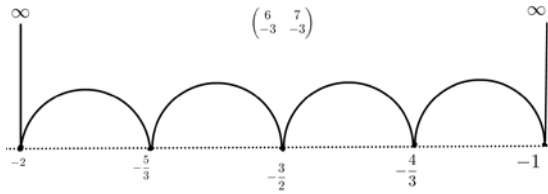
Çünkü; $\begin{pmatrix} Qx & y \\ nz & Qw \end{pmatrix}$ dönüşümünün eliptik olması için $|x + w|\sqrt{Q} < 2$ eşitsizliği sağlanmalıdır. Böylece, $Q = 2$ için dördüncü mertebe, $Q = 3$ için altıncı mertebe eliptik elemanlar bulunabilir [8]. Bunu aşağıdaki örneklerle açıklayabiliriz.

Örnek 2. $\begin{pmatrix} 4 & 5 \\ -2 & -2 \end{pmatrix}$ eliptik dönüşümü için uzunluğu 4 olan ve Şekil 3 ile üst yarı düzlemde gösterilen, $\infty \rightarrow -2 \rightarrow -\frac{3}{2} \rightarrow -1 \rightarrow \infty$ devresi elde edilir.



Şekil 3. $\infty \rightarrow -2 \rightarrow -\frac{3}{2} \rightarrow -1 \rightarrow \infty$ Devresi.

$\begin{pmatrix} 6 & 7 \\ -3 & -3 \end{pmatrix}$ eliptik dönüşümü için ise uzunluğu 6 olan ve Şekil 4 ile üst yarı düzlemde gösterilen, $\infty \rightarrow -2 \rightarrow -\frac{5}{3} \rightarrow -\frac{3}{2} \rightarrow -\frac{4}{3} \rightarrow -1 \rightarrow \infty$ devresi elde edilir.



Şekil 4. $\infty \rightarrow -2 \rightarrow -\frac{5}{3} \rightarrow -\frac{3}{2} \rightarrow -\frac{4}{3} \rightarrow -1 \rightarrow \infty$ Devresi.

Not 1. $|x + w|\sqrt{Q} \geq 2$ eşitsizliğinin sağlanması durumunda parabolik ve hiperbolik dönüşümler söz konusu olacaktır ve bu durumda; sonsuz uzunluklu devreler elde edilecektir. Ayrıca, $n = p \geq 3$ için $h = 1$ olmak zorunda olacağından $n = 2$ durumunu göz önüne almayacağız. Başka bir ifadeyle n doğal sayısını tek asal sayılardan seçeceğiz.

iii) $Q = 1, \Delta = \{1, p - 1\}$ Durumu:

Bu durumda Denklem 4 ile verilen hareket Denklem 9'daki gibi olur:

$$\begin{pmatrix} px + 1 & y \\ pz & w \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r \\ s \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} pxr + r + ys \\ pzx + ws \end{pmatrix} \quad (9)$$

Bu hareket ile; $\infty = \frac{1}{0}$, elemanın yörüngesi Denklem 10 ve Denklem 11'deki gibi elde edilir:

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} px + 1 \\ pz \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} pyz + (px + 1)^2 \\ pz(px + w + 1) \end{pmatrix} \rightarrow \dots \quad (10)$$

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} px - 1 \\ pz \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} pyz + (px - 1)^2 \\ pz(px + w - 1) \end{pmatrix} \rightarrow \dots \quad (11)$$

Bu durumda, eliptik dönüşümleri belirlemek için Teorem 1 geçerli olur.

Örnek 3. $p > 2$ bir asal olmak üzere, $H_p = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ p & p + 1 \end{pmatrix}$ hiperbolik ($\tau(H_p) = p + 2 > 2$) matrisine karşılık gelen

$z \rightarrow \frac{z+1}{pz+(p+1)}$ dönüşümünü göz önüne alalım. Bu dönüşümün genişletilmiş rasyonel sayılar ($\mathbb{Q} \cup \{\infty\}$) üzerindeki hareketi ile $\infty = \frac{1}{0}$ elemanın yörüngesi aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\infty \rightarrow \frac{1}{p} \rightarrow \frac{p+1}{p(p+2)} \rightarrow \frac{p^2+3p+1}{p(p+1)(p+3)} \rightarrow \dots \quad (12)$$

Burada eliptik dönüşümlerin aksine sonsuz uzunluklu bir yol elde edilir. Ayrıca bu dönüşümün sabit noktaları;

$$\frac{z+1}{pz+p+1} = z \text{ denkleminin kökleri olan,}$$

$$z_{1,2} = \frac{-p \pm \sqrt{p^2+4p}}{2p}$$

reel sayıları olarak elde edilir. Denklem 12 ile; ilk dört terimi verilen $\{H_p^k(\infty)\}$ dizisi, bu sabit noktalardan birine yakınsar. Bu sabit noktalar ile ilgili olarak aşağıdaki sonucu verebiliriz.

Sonuç 1. Yukarıdaki gibi tanımlanan dönüşümün sabit noktaları olan $z_1 = \frac{-p + \sqrt{p^2+4p}}{2p}$ ve $z_2 = \frac{-p - \sqrt{p^2+4p}}{2p}$ sayıları irrasyoneldir.

İspat. p asal sayı olmak üzere $p^2 + 4p$ sayılarının tam kare olmayacağını göstermemiz yeterlidir. Bunun için, $p^2 + 4p = n^2$ olacak şekilde bir n tamsayısının bulunamayacağını göstermeliyiz. Buradan;

$$p^2 + 4p - n^2 = 0 \quad (13)$$

p için ikinci derece denklemi elde edilir. (13) denkleminin tamsayı çözümlerinin bulunması, $\Delta = 4n^2 + 16$ diskriminantının tam kare olmasına bağlıdır. Bunun için $4n^2 + 16 = t^2$ denkleminin tamsayı çözümlerine bakalım:

- $n = 0$ için $\Delta = 4$ olur, ancak bu durumda (13) denklemini sağlayan p sayısı bulunamaz.
- $n \neq 0$ durumunda ise; $t^2 - n^2 = 4$ denkleminin tamsayı çözümlerinin olmadığı kolaylıkla görülebilir. Dolayısıyla hiçbir p asal sayısı için $p^2 + 4p$ bir tam kare olamaz ve ispat biter. **Denklemi buraya yazın.**

Diğer taraftan, Denklem 9 ile verilen $\begin{pmatrix} px + 1 & y \\ pz & w \end{pmatrix}$ dönüşümün sabit noktası a ile gösterilsin. Bu durumda, $\frac{(px+1)a+y}{pza+w} = a \Rightarrow pza^2 + (w - px - 1)a - y = 0$, ikinci derece denklemin kökleri, sabit noktaları verir. Denklem diskriminantı; $\Delta = (w - px - 1)^2 - 4py$ ve dönüşümün determinanı; $pxw + w - pzy = 1$ olduğu göz önüne alınırsa, sabit noktalar;

$$a = \frac{(1+px-w) \mp \sqrt{(w+px+1)^2 - 4py}}{2pz} \quad (10)$$

şeklinde elde edilir.

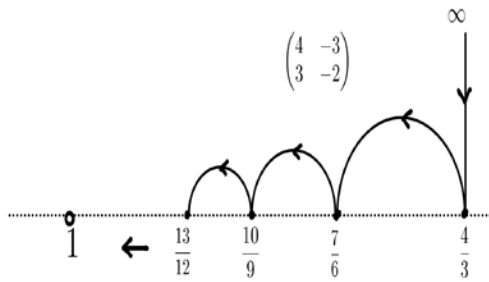
Teorem 2. $S = \begin{pmatrix} px + 1 & y \\ pz & w \end{pmatrix}$ dönüşümünün parabolik olması için gerek ve yeter koşul $px + zy = 0$ olmasıdır

ve bu durumda $z \neq 0$ için sabit nokta; $a = \frac{x}{z} = -\frac{y}{p}$ rasyonel sayısıdır.

İspat. $\tau(S) = (px + w + 1)^2 = 4$, $\det(S) = 1$ olduğu göz önüne alınırsa, istenilen kolaylıkla elde edilir. ■

Örnek 4. $p = 3$, $x = 1$, $y = -3$ ve $w = -2$ alınırsa; S tipli özel bir parabolik dönüşüm elde edilir. Bu dönüşümün ürettiği sonsuz uzunluklu yol; Şekil 5 ile gösterildiği gibi 1 sayısına yakınsayan bir rasyonel dizi ile etiketlenebilir.

$$\infty \rightarrow \frac{4}{3} \rightarrow \frac{7}{6} \rightarrow \dots \rightarrow \frac{3n+1}{3n} \rightarrow \dots \quad (14)$$



Şekil 5. Denklem 14 ile elde edilen sonsuz uzunluklu yol.

iv) $Q = p$, $\Delta = \{1, p - 1\}$ Durumu:

$x \equiv \mp 1 \pmod{p}$ olmak üzere hareket Denklem 14 ile verilebilir.

$$\begin{pmatrix} px & y \\ pz & pw \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r \\ s \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} pxr + ys \\ pZR + pws \end{pmatrix} \quad (15)$$

Eğer, $w = -x$ ise; her $p \geq 3$ asalı için, $px^2 + zy + 1 = 0$ denklemini sağlayan x, z, y tamsayıları ile elde edilen eliptik dönüşümler; Denklem 15 ile gösterildiği gibi 2 uzunluklu devreler üretir:

$$\infty \rightarrow \begin{pmatrix} x \\ z \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} px^2 + yz \\ 0 \end{pmatrix} = \infty \quad (16)$$

Eğer, $|w + x| = 1$ ve $p = 3$ ise, dönüşüm eliptik olup, bu tipli dönüşümler; Denklem 16 ile gösterildiği gibi 3 uzunluklu devreler üretirler.

$$\infty \rightarrow \begin{pmatrix} x \\ z \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} px^2 + yz \\ \pm pz \end{pmatrix} \rightarrow \infty \quad (17)$$

Eğer, $|w + x| \geq 1$ ve $p > 3$ ise, Denklem 14 ile verilen $\begin{pmatrix} px & y \\ pz & pw \end{pmatrix}$ dönüşümü hiperbolik olup, bu durumda;

$$a = \frac{p(x-w) \mp \sqrt{p^2(w+x)^2 - 4p}}{2pz}$$

reel sayılarına yakınsayan sonsuz uzunluklu yollar elde edilir.

TARTIŞMA ve SONUÇ

Bilindiği gibi, $(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z})^*$ çarpımsal grubunun aşikâr alt gruplarından başka alt grupları da vardır. Bu alt gruplar için benzer yolları ve devreleri bulma problemi; çok daha detaylı bir çalışma gerektirecektir ve bunların irdelenmesi daha sonraki çalışmaların konusu olabilir. Bu çalışma ile sunulan yöntem ve fikir doğrultusunda Modüler grup ve benzeri grupların genişletilmiş rasyonel sayılar kümesi üzerindeki doğal hareketinden doğan devreler ve yollar çok daha fazla merak uyandırabilir. Ayrıca, özellikle sonsuz uzunluklu yolların ürettiği rasyonel sayı dizilerinin sayılar teorisi açısından ilginç sonuçları bulunabilmektedir [5]. Örneğin, (13) klem 12 ile verilen yolun rasyonel köşelerinin bu açıdan araştırmaya değer olduğu söylenebilir. Sonuç olarak bu çalışmada; modüler grubun bazı özel kongrüans alt grupların $PSL_2(\mathbb{R})$ deki normalliyenleri ele alındı. Bu alt grupların genişletilmiş rasyonel sayılar kümesi üzerindeki hareketi belli kısıtlamalar altında ayrı ayrı ele alındı. Eliptik elemanların ürettiği 2, 3, 4 ve 6 uzunluklu devrelere örnekler verildi. Hiperbolik ve parabolik elemanların ürettiği sonsuz uzunluklu yollar gösterildi (sırasıyla Örnek 3 ve 4). Buradaki grafların köşelerinin etiketlendiği sayı dizileri ile dönüşümlerin tipleri arasında ilişkiler ortaya kondu. Ayrıca sonsuz uzunluklu yolların yakınsadığı nokta ile üretici dönüşümün sabit noktaları arasındaki ilişkiler irdelendi.

KAYNAKÇA

- [1] Newman, M., The normalizer of certain modular subgroups, Canadian Journal of Mathematics, 8, 29-31, 1956.
- [2] Lehner, J., Newman, M., Weierstrass point of $\Gamma_0(N)$, Annals of Mathematics, 79(2), 260-368, 1964.
- [3] Im, B., Jeon D., Kim, C.H., Normalizers of intermediate congruence subgroups of the hecke subgroups, Open Mathematics, 15(1), 787-799, 2007.
- [4] Güler, B.O., Beşenk, M., Değer, A.H., Kader, S., Elliptic elements and circuits in suborbital graphs, Hacettepe Journal of Mathematics and Statistics, 40(2), 203-210, 2011.
- [5] Şanlı, Z., Köroğlu, T., Some group actions and Fibonacci numbers, Communications Faculty Sciences University of Ankara Series A1 Mathematics and Statistics, 3, 273-284, 2022.
- [6] Akbaba, Ü., Değer, A.H., On applications of pell and pell-lucas numbers with matrix method, Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 44(6), 10703-10707, 2023.
- [7] Conway, C., Norton, S., Monstrous and moonshine, Bulletin of the London Mathematical Society, 11, 308-339, 1979.
- [8] Akbaş M., The normalizer of modular subgroups, Faculty of Mathematical Studies University of Southampton, Phd Thesis, 1989.
- [9] Palka, B. P., An introduction to complex function theory, Springer New York, NY, 405s, 1991.
- [10] Köroğlu, T., Güler, B. Ö., Şanlı, Z., Suborbital graphs for the Atkin Lehner group, Turkish Journal of Mathematics, 41, 235-243, 2017.

Comprehensive Assessment of Morphological, Biochemical and Molecular Responses of *Melissa officinalis* subsp. *officinalis* L. Grown in Vitro Conditions to Copper Oxide Nanoparticles

Ersan BEKTAŞ¹, Hüseyin ŞAHİN¹, Halil İbrahim Güler², Kadriye İNAN BEKTAŞ², Kaan KALTALIOĞLU¹, Nilhan Elif UZUN²

¹ Espiye Vocational School, Giresun University, Giresun, Türkiye.

² Molecular Biology and Genetics, Faculty of Science, Karadeniz Technical University, Trabzon, Türkiye

✉: ersan.bektas@giresun.edu.tr; ebektas61@yahoo.com  [0000-0001-9030-6908](https://orcid.org/0000-0001-9030-6908)  [0000-0002-6018-1494](https://orcid.org/0000-0002-6018-1494)
 [0000-0002-7261-6790](https://orcid.org/0000-0002-7261-6790)  [0000-0002-5909-588X](https://orcid.org/0000-0002-5909-588X)  [0000-0002-4995-2657](https://orcid.org/0000-0002-4995-2657)  [0009-0003-9187-0318](https://orcid.org/0009-0003-9187-0318)

Received (Geliş): 26.05.2025

Revision (Düzeltilme): 11.06.2025

Accepted (Kabul): 20.06.2025

ABSTRACT

Copper oxide nanoparticles (CuO-NPs) were applied in vitro to *Melissa officinalis* L. subsp. *officinalis* seedlings (0.1, 1.0 and 10 mg L⁻¹) to probe morphological, biochemical and molecular responses. At 0.1 mg L⁻¹, shoot elongation rose markedly, whereas 10 mg L⁻¹ stimulated root proliferation but curtailed shoot growth. The highest dose also maximised total phenolic and flavonoid contents and strengthened CUPRAC, DPPH and ABTS antioxidant activities. HPLC revealed elevated rosmarinic acid with concomitant declines in caffeic and p-coumaric acids, implying pathway redirection. Enzyme assays showed peak AChE inhibition at 1.0 mg L⁻¹, while MAO, urease and HIV-1 RT inhibition intensified with increasing doses. GC-MS demonstrated dose-dependent shifts in essential-oil composition, notably higher geranial and neral. qRT-PCR confirmed up-regulation of PAL, TAT and RAS transcripts, especially at 10 mg L⁻¹, corroborating enhanced phenylpropanoid biosynthesis. Overall, CuO-NPs act as concentration-dependent abiotic elicitors, boosting bioactive metabolite production and antioxidant capacity, and thus can improve lemon balm phytochemical quality under controlled conditions.

Keywords: Antioxidant activity, CuO Nanoparticles, Gene expression, In vitro propagation, *Melissa officinalis* subsp. *officinalis*, Phenolic compounds

In Vitro Koşullarda Yetiştirilen *Melissa officinalis* subsp. *officinalis* L.'nin Bakır Oksit Nanopartiküllerine Karşı Morfolojik, Biyokimyasal ve Moleküler Yanıtlarının Kapsamlı Değerlendirmesi

ÖZ

Melissa officinalis L. subsp. *officinalis* (oğul otu) fidelerine in vitro koşullarda 0.1, 1.0 ve 10 mg L⁻¹ konsantrasyonlarında bakır oksit nanoparçacıkları (CuO-NP) uygulanarak morfolojik, biyokimyasal ve moleküler tepkiler değerlendirilmiştir. Düşük dozda (0.1 mg L⁻¹) sürgün uzaması belirgin şekilde artarken, 10 mg L⁻¹ kök gelişimini teşvik etmiş ancak sürgün büyümesini baskılamıştır. En yüksek dozda toplam fenolik ve flavonoid içerikleri artmış, CUPRAC, DPPH ve ABTS testlerinde antioksidan aktiviteler güçlenmiştir. HPLC analizleri, rosmarinik asitte artış ve kafeik ile p-kumarik asitlerde azalma olduğunu göstermiştir; bu da metabolik yol yöneliminin değiştiğini düşündürmektedir. Enzim inhibisyon analizleri, 1.0 mg L⁻¹'de en yüksek AChE inhibisyonunu, daha yüksek dozlarda ise MAO, üreaz ve HIV-1 RT inhibisyonunun arttığını göstermiştir. GC-MS, geranial ve neral gibi bileşenlerin arttığı doz bağımlı uçucu yağ değişimlerini ortaya koymuştur. qRT-PCR sonuçları, özellikle 10 mg L⁻¹'de PAL, TAT ve RAS genlerinin yukarı yönlü düzenlendiğini göstermiştir. Genel olarak, CuO-NP'ler biyotik olmayan uyarıcılar olarak işlev görmek ve fitokimyasal kaliteyi artırma potansiyeli sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Antioksidan aktivite, CuO Nanopartikül, Fenolik bileşikler, Gen ekspresyonu, İn vitro propagasyon, *Melissa officinalis* subsp. *officinalis*

INTRODUCTION

Over the last few decades, the convergence of nanotechnology and plant biotechnology has given rise to new opportunities for the enhancement of beneficial

chemical production in medicinal plants. Engineered nanomaterials-particularly metal and metal oxide nanoparticles-are increasingly utilized in plant tissue cultures due to their reactivity and biodegradation potential [1,2]. Among these, copper oxide nanoparticles

(CuO-NPs) are particularly noteworthy due to their distinct physical and chemical properties and their dual role as a vital nutrient as well as a potential stressor in plants. Copper (Cu) is a trace element that plays a vital role in several plant enzyme functions and redox reactions. It participates in vital activities such as photosynthesis, respiration, lignin synthesis, and antioxidant defense through major copper-dependent enzymes such as plastocyanin, cytochrome c oxidase, and superoxide dismutase [3].

In spite of the significance of Cu in the plant system, levels of Cu must remain strictly regulated. Too intense Cu levels within the plant can lead to oxidative stress through the enhanced production of toxic reactive oxygen species (ROS), damaging cell structures and hindering the process of photosynthesis [3,4]. Because of their minute size and huge surface area, CuO-NPs are capable of releasing easily assimilatable Cu^{2+} ions and directly interacting with plant tissues. Such interaction will largely depend on the concentration and properties of nanoparticles. Various studies confirm that low doses of CuO-NPs improve germination of the seeds, root growth, and absorption of nutrients in a variety of plant species [5,6]. In contrast to this, high concentrations are found to result in reduced plant growth, toxicity, and even DNA damage [1,7,8]. These impacts differ for plant species and nanoparticle characteristics in the form of size, shape, and surface properties. Still, we have a developing body of knowledge about how CuO-NPs affect overall plant metabolism-especially in medical plants that contain healing compounds.

Melissa officinalis L. subsp. *officinalis*, or lemon balm, is a perennial mint plant species (Lamiaceae) that has earned fame for its therapeutic properties in the form of antioxidant, antimicrobial, spasmodic, and neuroprotective activities [9,10]. These activities are due to naturally occurring compounds such as rosmarinic acid, caffeic acid, flavonoids, and other active compounds. Environmental stress in the form of oxidative conditions can affect the synthesis of these products [11].

The tissue culture of plants allows for precise plant growth and the increase in their bioactive compounds in a controlled laboratory setting. It also enables the selective application of nanoparticles to determine their impact [12]. Such in vitro systems are perfect for assessing how CuO-NPs impact plant growth, metabolism, and gene function. While several studies have examined CuO-NP toxicity and uptake in several crops and model organisms [6], we have little focused work in *M. officinalis*, particularly in a laboratory-controlling setting in which external influences are reduced. Further, we have little insight into how CuO-NPs affect the metabolic pathways and gene expressions that produce the secondary compounds in the form of phenylpropanoids.

This study aims to bridge that gap by conducting an in-depth analysis of the response of *Melissa officinalis* L. subsp. *officinalis* seedlings to varied levels of CuO-NPs in a laboratory condition. It targets the development of

shoots and roots, antioxidant potential, phenolic and flavonoid content levels, inhibition of enzymes (acetylcholinesterase, urease, monoamine oxidase (MAO-A)), and the regulation of important genes (phenylalanine ammonia-lyase (PAL), tyrosine aminotransferase (TAT), and rosmarinic acid synthase (RAS)) involved in the synthesis of compounds. The information obtained both identifies the beneficial as well as stressful functions CuO-NPs might have and implies that nanotechnology has the potential to harness nanomaterials as high-value tools for enhancing plants' medical properties.

MATERIALS AND METHODS

Pre-Treatment and In Vitro Culture of *M. officinalis* Seeds

M. officinalis seeds were sterilized through a modified method by Bektaş and Sökmen (2016) [13]. The seeds were first soaked for 12 hours at room temperature in a 5% sucrose solution with a few drops of bleach. They were then briefly treated with a 30% hydrogen peroxide solution for five minutes. After three successive rinses with sterile distilled water, the seeds were placed on Murashige and Skoog (MS) medium, supplemented with vitamins, to promote germination. Cultures were incubated at $25 \pm 1^\circ\text{C}$ under a 16/8 h period. Once healthy seedlings had developed-after approximately four weeks-they were used for the next phase of experimentation.

Copper Oxide Nanoparticle (CuO-NP) Treatment

To assess the effect of copper oxide nanoparticles on *M. officinalis* growth, in vitro seedlings were transferred to fresh MS media containing CuO-NPs at concentrations of 0 (control), 0.1, 1.0, or 10.0 mg/L. The CuO-NPs used in this study were purchased from Nanografi Nanotechnology Company (Ankara, Turkey). The product consisted of high-purity ($\geq 99.995\%$) CuO-NPs with a particle size distribution ranging from 15 to 45 nm. A small quantity of kinetin (0.1 mg/L) was also added to promote shoot development. The control group was grown on MS medium with kinetin, but without CuO-NPs. Although CuO-NPs were originally prepared in five concentrations (0.1, 1.0, 10.0, 100.0, and 1000.0 mg/L), seedlings exposed to the two highest concentrations (100.0 and 1000.0 mg/L) did not survive or show development under in vitro conditions. As a result, only the 0.1, 1.0, and 10.0 mg/L treatments were selected for further physiological, biochemical, and molecular evaluation.

Explants were cultured for 30 days under the same temperature and light conditions. At the end of the treatment period, plant growth parameters-including shoot length, leaf and node numbers, root count, root length, and both fresh and dry weights-were measured. Plant tissues were harvested, flash-frozen in liquid nitrogen, and stored at -80°C until analysis. Before

testing, samples were freeze-dried and ground into a fine powder.

Phytochemical Analysis

Metabolite Extraction

The powdered plant samples were extracted using high-purity methanol at 40 °C for 12 hours with continuous stirring under reflux conditions to preserve volatile compounds. After the extraction, the solutions were cooled, filtered, and stored at -20 °C. These extracts were later analyzed to determine phenolic composition, total phenolics and flavonoids, antioxidant capacity, and enzyme inhibition activity.

HPLC Profiling

To identify individual phenolic compounds, the extracts were subjected to high-performance liquid chromatography (HPLC). A Thermo Fisher Dionex Ultimate 3000 system equipped with a C18 reversed-phase column was used. The mobile phase included a gradient of two solvents: one consisting of water with 2% acetic acid, and the other of acetonitrile with 0.5% acetic acid. Each chromatographic run lasted approximately 45 minutes, with a flow rate of 1.2 mL/min and a column temperature maintained at 30 °C. Eighteen standard compounds, including a variety of acids, flavonoids, and phenylpropanoids, were used to identify components in the samples. Concentrations were determined from calibration curves and expressed as micrograms per gram of dry plant weight.

Total Phenolic and Flavonoid Content

Total phenolic content was measured using the Folin-Ciocalteu method, with absorbance recorded at 760 nm [14]. Results were expressed in milligrams of gallic acid equivalent per gram of dry weight (mg GAE/g DW). Total flavonoid content was assessed using the aluminum chloride method, measuring absorbance at 415 nm [15], and expressed in milligrams of quercetin equivalent per gram (mg QE/g DW).

Antioxidant Assays

Three different in vitro methods were used to evaluate the antioxidant activity of the plant extracts. The CUPRAC method was employed to measure the antioxidant capacity based on the reduction of copper(II) ions, following the procedure developed by Apak et al. (2004) [16]. In this assay, the formation of a colored Cu(I)-neocuproine complex was monitored at an absorbance of 450 nm, and results were expressed in micromoles of Trolox equivalents per gram of dry plant tissue.

To assess the radical scavenging ability of the samples, the DPPH assay was used with the stable DPPH• radical. The plant extracts were mixed with a methanolic DPPH solution and incubated at room temperature. Absorbance

was then measured at 517 nm. The SC₅₀ value, indicating the concentration of extract needed to reduce 50% of the radicals, was calculated using a logarithmic equation derived from a calibration curve [17].

Similarly, the ABTS assay measured the extract's ability to scavenge the ABTS•⁺ radical. The ABTS radical solution was prepared by reacting ABTS with potassium persulfate and incubating it in darkness for 16-18 hours. Before use, the solution was diluted to an absorbance of 0.700 ± 0.020 at 734 nm. The plant extracts were then added and incubated for 5 minutes before absorbance was recorded at 734 nm. The SC₅₀ values were calculated as described by Re et al. (1999)[18]. Trolox served as the standard positive control in all three antioxidant assays.

Enzyme Inhibition Assays

The enzyme inhibitory effects of the plant extracts were evaluated using standard in vitro protocols. Acetylcholinesterase (AChE) inhibition was measured using Ellman's colorimetric method, where the formation of a yellow-colored complex was monitored at 412 nm [19]. A lower absorbance reading indicated stronger enzyme inhibition. Galantamine was used as the reference inhibitor in this assay.

Monoamine oxidase-A (MAO-A) inhibition was assessed using a commercial assay kit (Sigma MAK520-1KT). A decrease in absorbance at 490 nm was interpreted as enzyme inhibition, with clorgyline serving as the positive control [20].

Urease activity was measured by detecting ammonia released from urea, using phenol red as the pH indicator. A reduction in color intensity at 570 nm indicated effective inhibition [21]. Thiourea was used as the standard inhibitor for this assay.

The inhibition of HIV-1 reverse transcriptase (RT) was tested with a commercial ELISA kit from Roche. After a 1-hour incubation at 37 °C, absorbance was recorded at 405 nm. Nevirapine served as the positive control [22].

Analysis by GC-MS for Volatile Compounds

Volatile compounds in the freeze-dried *M. officinalis* seedlings were analyzed using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) with a headspace sampling approach. Roughly 2 grams of powdered plant material were combined with a saturated sodium chloride (NaCl) solution and sealed in a vial, then incubated at 60 °C for 10 minutes to allow volatile collection.

The gas chromatograph was equipped with a BPX-90 high-polarity column, and an optimized temperature ramp was applied during the analysis. Mass spectra obtained were compared against the NIST library and confirmed with authentic chemical standards when available. The relative quantity of each volatile compound was determined based on its peak area in the chromatogram. Key compounds such as geranial and neral were identified and their levels compared across different treatment groups.

Gene Expression Analysis

To explore how CuO-NP treatment affects molecular responses, gene expression levels related to phenolic biosynthesis were measured using quantitative real-time PCR (qRT-PCR). Approximately 100 mg of frozen plant tissue was used to extract total RNA using the Spectrum™ Plant Total RNA Kit (Sigma, STRN50). The quality and integrity of the extracted RNA were checked through spectrophotometry and agarose gel electrophoresis.

One microgram of RNA was then used to synthesize cDNA using a standard reverse transcription kit and oligo(dT)₁₈ primers. The reaction took place at 42 °C for 60 minutes and was then heat-inactivated at 70 °C. Quantitative PCR was performed using SYBR Green chemistry on a Bio-Rad real-time PCR system.

Table 1. Designed specific primers and their properties

Gene	Primer Name	Primer Sequence (5'-3')	Amplification Size (bp)
PAL	PAL-F	AGCCTGGACTACGGCTTC	122
	PAL-R	ACATCCTGGTTATGCTGCTC	
TAT	TAT-F	GCTACCAGCCGACTCTGTC	122
	TAT-R	CGTAGATTGGGAAACA	
RAS	RAS-F	GTKGRRACGAGCAC	122
	RAS-R	AGGMSKSCGGTCGA	
GAPDH	GAPDH-F	GCTAAGGCTGTTGGTA	121
	GAPDH-R	TGGCCTCTTCTCTAG	

Primers were specifically designed to amplify three target genes: phenylalanine ammonia-lyase (PAL, GenBank AC: FN665700.1), tyrosine aminotransferase (TAT, GenBank AC: JN863949.1), and rosmarinic acid synthase (RAS, GenBank AC: KM575933.1) (Table 1). The GAPDH (Genbank AC: KF013133.1) gene served as the internal reference. Amplification was carried out over 40 cycles, and a melting curve analysis confirmed the specificity of the PCR products. Gene expression levels were calculated using the 2-ΔΔCt method

Statistical Analysis

All experiments were repeated at least three times independently. Results are reported as mean ± standard deviation. Statistical significance was determined using one-way ANOVA, followed by Tukey's post-hoc test (p<0.05). All analyses were performed using SPSS version 25.0.

RESULTS

Effects of CuO-NPs on In Vitro Plant Growth Parameters

The application of CuO nanoparticles (CuO-NPs) had notable, dose-dependent effects on various growth parameters of *M. officinalis* seedlings cultured in vitro (Table 2, Figure 1). Among the measured traits, shoot elongation exhibited the highest value at 0.1 mg/L CuO-NP treatment, reaching 101.73 ± 6.11 mm, which was significantly greater than that of the control group treated with kinetin (59.09 ± 2.04 mm; p < 0.05). However, higher CuO-NP concentrations led to reduced shoot length, with 1.0 and 10.0 mg/L treatments resulting in 64.02 ± 3.53 mm and 56.90 ± 1.09 mm, respectively. Although five CuO-NP concentrations (0.1, 1.0, 10.0, 100.0, and 1000.0 mg/L) were initially tested, no seedling growth was observed at 100.0 and 1000.0 mg/L under in vitro conditions (Figure 1 D and E). As a result, only the 0.1, 1.0 and 10.0 mg/L concentrations were evaluated for further physiological and biochemical analysis.

Leaf number showed a slight decline with increasing CuO-NP concentration. While the highest number of leaves (10.88 ± 1.00) was recorded at 0.1 mg/L, it decreased to 8.00 ± 0.00 at 1.0 mg/L and 7.66 ± 0.75 at 10.0 mg/L. A similar trend was observed in nod number, which declined from 5.44 ± 0.50 (0.1 mg/L) to 3.83 ± 0.37 (10.0 mg/L), and was lower than the control (4.15 ± 0.31). The number of shoots per node (tillering) remained unchanged at 2.00 ± 0.00 across all treatment groups, including the control.

In terms of rooting performance, the highest number of roots was observed at 10.0 mg/L CuO-NPs (18.08 ± 0.96), followed by the control (15.14 ± 0.68), while the lowest values were recorded at 0.1 and 1.0 mg/L (11.36 ± 0.83 and 11.53 ± 0.84, respectively). In contrast, root elongation was most pronounced at 1.0 mg/L CuO-NPs (179.68 ± 10.30 mm), which significantly exceeded the control (69.11 ± 2.04 mm) and all other treatments (p < 0.05). Root length was shortest at 10.0 mg/L (34.66 ± 1.34 mm), suggesting a concentration-dependent suppression of elongation despite enhanced root proliferation.

Dry matter accumulation (% dry weight) also varied with CuO-NP dose. The control group exhibited the highest dry weight percentage (14.38 ± 0.57%), whereas values declined slightly with increasing nanoparticle concentration. Specifically, the 10.0 mg/L CuO-NP group reached 13.53 ± 0.85%, followed by 1.0 mg/L (12.13 ± 0.77%) and 0.1 mg/L (10.66 ± 0.64%).

Table 2. Growth responses of *M. officinalis* seedlings to varying concentrations of CuO-NPs.

CuO-NP Concent.	Shoot Elongation	Number Leaves (pcs)	Number of Nodes (pcs)	Shoot Multiplication	Number of Roots (pcs)	Root Length (mm)	% Dry Weight
0,1	101,73±6,11 ^a	10,88±1,00 ^a	5,44±0,50 ^a	2,00±0,00 ^a	11,36±0,83 ^a	116,00±3,17 ^b	10,66±0,64 ^d
1,0	64,02±3,53 ^b	8,00±0,00 ^c	4,00±0,00 ^c	2,00±0,00 ^a	11,53±0,84 ^a	179,68±10,30 ^a	12,13±0,77 ^c
10,0	56,90±1,09 ^e	7,66±0,75 ^c	3,83±0,37 ^c	2,00±0,00 ^a	18,08±0,96 ^a	34,66±1,34 ^d	13,53±0,85 ^b
Control*	59,09±2,04 ^c	8,40±0,67 ^b	4,15±0,31 ^b	2,00±0,00 ^a	15,14±0,68 ^b	69,11±2,04 ^c	14,38±0,57 ^a

Data are presented as mean ± SD (n=15). Different letters indicate significant differences at $p < 0.05$ according to Tukey's test. * Medium containing 0.1 mg/L KIN was considered as control group and all media containing nanoparticles were also supplemented with 0.1 mg/L KIN.



Figure 1. Representative images of *M. officinalis* seedlings after 30 days of in vitro culture under different concentrations of copper oxide nanoparticles (CuO-NPs). A: 0.1 mg/L, B: 1.0 mg/L, C: 10.0 mg/L, D: 100.0 mg/L, E: 1000.0 mg/L. Seedlings grown at 0.1 and 1.0 mg/L exhibited vigorous shoot and root development, while higher concentrations (100.0 and 1000.0 mg/L) led to severe growth inhibition and tissue necrosis. Scale bar = 1 cm.

These findings indicate that low-dose CuO-NP treatment (0.1 mg/L) promotes aerial growth, particularly shoot elongation and leaf formation, while moderate doses (1.0 mg/L) enhance root elongation. High concentrations (10.0 mg/L) appear to stimulate root induction but limit both root elongation and shoot development, demonstrating a biphasic response in plant morphogenesis.

Total Phenolic and Flavonoid Content

The total phenolic content (TPC) and total flavonoid content (TFC) of *M. officinalis* seedlings were significantly influenced by CuO-NP treatments in a dose-dependent manner ($p < 0.05$). results were presented in Table 3. The highest TPC was observed in the 10.0 mg/L CuO-NP group, reaching 43.453 ± 0.80 mg GAE/g plant, which represented a substantial increase compared to the control group (32.687 ± 0.32 mg GAE/g plant). Conversely, the lowest TPC was recorded at 0.1 mg/L CuO-NP (19.391 ± 0.17 mg GAE/g plant), indicating that low concentrations may not sufficiently trigger phenolic accumulation.

Similarly, TFC levels peaked in the 10.0 mg/L CuO-NP treatment group (1.716 ± 0.03 mg QE/g plant), followed by the control (1.612 ± 0.03 mg QE/g plant), while the lowest value was detected at 0.1 mg/L (1.579 ± 0.01 mg QE/g plant). Notably, both TPC and TFC levels were enhanced most markedly at the highest CuO-NP concentration, suggesting that stronger elicitation at elevated nanoparticle levels may stimulate the phenylpropanoid pathway and flavonoid biosynthesis. Statistically significant differences were observed

between all treatment groups ($p < 0.05$), confirming the concentration-specific response of phenolic and flavonoid metabolism to CuO-NP exposure.

Table 3. Total phenolic content (TPC) and total flavonoid content (TFC) in methanolic extracts of *M. officinalis* treated with CuO-NPs.

Concentration (mg/L)		TPC (mgGAE/g plant)	TFC (mgQE/g plant)
CuO-NP	0,1	19,391±0,17 ^d	1,579±0,01 ^b
	1,0	23,036±0,75 ^c	1,632±0,03 ^{ab}
	10,0	43,453±0,80 ^a	1,716±0,03 ^a
Control*		32,687±0,32 ^b	1,612±0,03 ^{ab}

*Data are presented as mean ± SD (n=15). Different letters indicate significant differences at $p < 0.05$ according to Tukey's test. * Medium containing 0.1 mg/L KIN was considered as control group and all media containing nanoparticles were also supplemented with 0.1 mg/L KIN.

HPLC Profiling of Phenolic Compounds

HPLC analysis of *M. officinalis* seedlings exposed to CuO-NPs revealed considerable variation in the levels of individual phenolic compounds, indicating a compound-specific and concentration-dependent response to nanoparticle treatment. A total of ten phenolic compounds were identified and quantified, including phenolic acids, aldehydes, and flavonoids (Table 4).

Rosmarinic acid was the predominant compound across all treatments. Its concentration increased markedly in plants exposed to 10.0 mg/L CuO-NPs (20.796 ± 0.448 µg/g plant) compared to the control group (14.435 ± 0.365 µg/g plant), indicating enhanced biosynthesis under strong elicitor activity. A moderate increase was also observed at 1.0 mg/L (10.477 ± 0.744 µg/g), whereas the lowest value was recorded at 0.1 mg/L (9.148 ± 0.206 µg/g).

Caffeic acid content showed a clear decreasing trend in all CuO-NP-treated groups compared to the control. While control seedlings accumulated 41.92 ± 1.38 µg/g plant of caffeic acid, the levels dropped significantly to 17.49 ± 0.17 , 16.67 ± 0.37 , and 20.99 ± 2.42 µg/g in the 0.1, 1.0, and 10.0 mg/L CuO-NP groups, respectively. A similar reduction pattern was noted for p-coumaric acid, with a maximum concentration of 34.72 ± 0.92 µg/g in the control, and notably lower levels (13.87 ± 0.03 to 12.17 ± 0.25 µg/g) in treated plants.

Ferulic acid levels slightly increased at 10.0 mg/L CuO-NP (8.09 ± 0.24 µg/g), while remaining similar to the control (7.98 ± 0.16 µg/g). In contrast, gallic acid showed a peak at 1.0 mg/L (3.29 ± 0.05 µg/g), being higher than both the control (1.6 ± 0.05 µg/g) and the 10.0 mg/L group (1.32 ± 0.10 µg/g).

Table 4. Phenolic compound profiles of *M. officinalis* extracts determined by HPLC.

CuO-NP (mg/L)	µg phenolic/g plant									
	Gallic acid	Protocatechuic acid	Protocatechuic Aldehyde	Caffeic acid	Syringic acid	Epicatechin	p-Coumaric acid	Ferulic acid	Benzoic acid	Rosmarinic acid
0,1	2,53±0,02 ^b	n.d.	4,77±0,04 ^b	17,49±0,17 ^{bc}	1,89±0,02 ^c	n.d.	13,87±0,03 ^b	1,89±0,00 ^d	28,77±0,51 ^b	9,14±0,20 ^d
1,0	3,29±0,05 ^a	n.d.	4,9±0,08 ^b	16,67±0,37 ^c	4,46±0,33 ^b	n.d.	12,17±0,25 ^c	3,82±0,09 ^c	28,77±0,39 ^b	10,47±0,74 ^c
10,0	1,32±0,10 ^d	n.d.	5,13±0,32 ^b	20,99±2,42 ^b	1,80±0,31 ^c	n.d.	13,55±0,42 ^b	8,09±0,24 ^a	32,3±1,89 ^a	20,79±0,44 ^a
Control	1,63±0,04 ^c	6,49±0,15 ^a	6,18±0,14 ^a	40,74±1,24 ^a	6,84±0,18 ^a	10,24±0,12 ^a	32,16±0,75 ^a	7,48±0,14 ^b	24,17±0,58 ^c	13,67±0,29 ^b

Data are presented as mean ± SD (n=15). Different letters indicate significant differences at $p < 0.05$ according to Tukey's test. * Medium containing 0.1 mg/L KIN was considered as control group and all media containing nanoparticles were also supplemented with 0.1 mg/L KIN. n.d.: Not determined.

Interestingly, protocatechuic acid and epicatechin were only detected in control plants, indicating possible

suppression of their biosynthesis under CuO-NP stress. Protocatechuic aldehyde, however, was present across all treatments, with relatively stable values ranging between 4.77–5.13 µg/g.

The accumulation of benzoic acid remained fairly constant across all groups (25.49–32.3 µg/g), although a slight elevation was noted at 10.0 mg/L CuO-NP. These shifts in phenolic profiles suggest that CuO-NPs selectively affect the phenylpropanoid pathway, upregulating rosmarinic acid while downregulating precursors like caffeic and p-coumaric acids, potentially through pathway redirection or feedback inhibition mechanisms.

Antioxidant Activity

The antioxidant potential of *M. officinalis* seedlings treated with CuO-NPs was evaluated using three independent assays: CUPRAC, DPPH radical scavenging, and ABTS radical cation decolorization. All assays revealed significant differences among treatments ($p < 0.05$), indicating a concentration-dependent response to CuO-NP exposure (Table 5).

According to the CUPRAC results, antioxidant capacity increased markedly with CuO-NP concentration. The highest CUPRAC value was recorded at 10.0 mg/L CuO-NPs (504.3 ± 5.51 µmol TE/g plant), exceeding the control group (454.5 ± 2.04 µmol TE/g). Lower antioxidant activity was observed at 1.0 and 0.1 mg/L CuO-NPs, with values of 275.3 ± 0.58 and 256.3 ± 0.58 µmol TE/g, respectively, suggesting suboptimal elicitor effects at lower doses.

In the DPPH assay, lower SC_{50} values reflect higher radical scavenging capacity. CuO-NP-treated seedlings at 10.0 mg/L showed the most effective DPPH scavenging activity, with an SC_{50} of 68.67 ± 1.23 µg/mL, substantially better than the control group (83.97 ± 0.40 µg/mL). Moderate and low concentrations (1.0 and 0.1 mg/L) yielded SC_{50} values of 161.31 ± 8.73 and 231.88 ± 11.02 µg/mL, respectively, indicating reduced effectiveness.

Table 5. Antioxidant activities (CUPRAC, DPPH SC_{50} , ABTS SC_{50}) of extracts obtained from CuO-NP-treated *M. officinalis* seedlings.

CuO-NP Concentration (mg/L)	CUPRAC (µmol TE/g plant)	DPPH (SC_{50} : µg plant/mL)	ABTS (SC_{50} : mg plant/mL)
0,1	$256,3 \pm 0,58$ _d	$231,8 \pm 11,02$ _b	$3,8 \pm 0,22$ ^d
1,0	$275,3 \pm 0,58$ _c	$161,3 \pm 8,73$ ^c	$4,5 \pm 0,08$ ^{bc}
10,0	$504,3 \pm 5,51$ _a	$68,6 \pm 1,23$ ^d	$4,0 \pm 0,18$ ^{cd}
Control*	$454,5 \pm 2,04$ _b	$83,9 \pm 0,40$ ^d	$4,5 \pm 0,29$ ^b
Trolox	n.t.	$6,0 \pm 0,27$ ^a	$0,3 \pm 0,00$ ^a

Data are presented as mean $\pm$ SD (n=15). Different letters indicate significant differences at $p < 0.05$ according to Tukey's test. Medium containing 0.1 mg/L KIN was considered as control group and all media

containing nanoparticles were also supplemented with 0.1 mg/L KIN. n.t: Not tested.

A similar trend was observed in the ABTS assay. The lowest SC_{50} value was obtained at 10.0 mg/L CuO-NPs (4.05 ± 0.18 mg/mL), demonstrating enhanced antioxidant activity compared to the control (4.54 ± 0.29 mg/mL). Treatments with 0.1 and 1.0 mg/L resulted in ABTS SC_{50} values of 3.82 ± 0.22 and 4.51 ± 0.08 mg/mL, respectively, with the latter being comparable to the control.

These results collectively indicate that CuO-NPs, particularly at 10.0 mg/L, effectively enhance the antioxidant potential of *M. officinalis* seedlings, as reflected by increased reducing power and improved free radical scavenging capacity. The enhanced activities likely result from elevated phenolic compound accumulation, especially rosmarinic acid, as confirmed by HPLC analysis.

Enzyme Inhibitory Activities

The enzyme inhibitory activities of *M. officinalis* extracts obtained from CuO-NP-treated seedlings were evaluated against acetylcholinesterase (AChE), monoamine oxidase (MAO), urease, and HIV-1 reverse transcriptase (RT). All enzyme assays demonstrated a concentration-dependent response to CuO-NP exposure, with significant differences among treatment groups ($p < 0.05$) (Table 6).

For AChE inhibition, the extract obtained from plants treated with 1.0 mg/L CuO-NPs exhibited the strongest activity, with an IC_{50} of 50.40 ± 1.06 mg/mL, which was more potent than the control (57.45 ± 2.75 mg/mL). At 0.1 mg/L, inhibitory activity was weaker (65.76 ± 0.48 mg/mL), and a further decline in efficacy was observed at 10.0 mg/L (78.29 ± 2.70 mg/mL), indicating reduced AChE interaction at higher CuO-NP concentrations.

In terms of MAO inhibition, the most pronounced effect was seen at 10.0 mg/L CuO-NPs with an IC_{50} of 2.33 ± 0.07 mg/mL, followed by 1.0 mg/L (3.20 ± 0.02 mg/mL) and 0.1 mg/L (4.58 ± 0.18 mg/mL). These results suggest that CuO-NPs exert a dose-dependent inhibitory effect on MAO activity. The control group exhibited a moderate level of inhibition with an IC_{50} of 3.68 ± 0.11 mg/mL.

Urease inhibition also followed a clear dose-responsive trend. While the control extract showed an IC_{50} of 10.48 ± 0.90 mg/mL, CuO-NP treatment at 10.0 mg/L significantly improved inhibition, yielding the lowest IC_{50} value of 2.93 ± 0.06 mg/mL. Lower doses showed reduced activity, with IC_{50} values of 6.05 ± 0.17 mg/mL at 1.0 mg/L and 13.36 ± 0.78 mg/mL at 0.1 mg/L.

For HIV-1 reverse transcriptase (RT), all CuO-NP-treated groups exhibited mild to moderate inhibition. The highest activity was recorded at 10.0 mg/L ($26.22 \pm 1.87\%$), marginally higher than the control group ($25.48 \pm 1.11\%$). The lowest inhibition was observed at 0.1 mg/L ($18.98 \pm 1.70\%$), while 1.0 mg/L showed intermediate activity ($21.04 \pm 1.71\%$). Nevirapin, used as a positive control, displayed a high inhibition level (93.98

± 2.94%), but was marked as t.e. (tested but excluded from comparative analysis due to mechanistic differences).

Table 6. Inhibitory activities (IC₅₀ values) against AChE, MAO-A, urease, and HIV-1 RT enzymes for extracts from CuO-NP-treated seedlings.

CuO-NP (mg/L)	Anti-AChE (IC ₅₀ :mg plant/mL)	MAO-A (IC ₅₀ : mg plant/mL)	HIV-1-RT (%inhibition)	Urease (IC ₅₀ : mg plant/mL)
0,1	65,76±0,48 ^b	4,58±0,18 ^a	18,98±1,70 ^c	13,36±0,78 ^a
1,0	50,40±1,06 ^d	3,20±0,02 ^c	21,04±1,71 ^c	6,05±0,17 ^c
10,0	78,29±2,70 ^a	2,33±0,07 ^d	26,22±1,87 ^b	2,93±0,06 ^d
Control*	57,45±2,75 ^c	3,68±0,11 ^b	25,48±1,11 ^b	10,48±0,90 ^b
Nevirapin	n.t.	n.t.	93,98±2,94 ^a	n.t.

Data are presented as mean ± SD (n=15). Different letters indicate significant differences at p < 0.05 according to Tukey's test. *Medium containing 0.1 mg/L KIN was considered as control group and all media containing nanoparticles were also supplemented with 0.1 mg/L KIN. n.t: Not tested.

Taken together, these findings indicate that CuO-NPs exert selective, concentration-dependent inhibitory effects on enzyme activity. While moderate concentrations (1.0 mg/L) were most effective for AChE, higher doses (10.0 mg/L) provided superior inhibition of MAO, urease, and HIV-1 RT. These bioactivities may be associated with CuO-NP-induced accumulation of

specific polyphenolic compounds with known inhibitory properties, such as rosmarinic and ferulic acids.

Volatile Compounds (GC-MS Analysis)

The GC-MS analysis of *M. officinalis* essential oils revealed distinct qualitative and quantitative variations in volatile compounds among the control group (0.1 mg/L kinetin) and CuO-NP-treated groups (0.1, 1.0, and 10.0 mg/L) (Table 7). Various constituents were detected, with geranial, neral, verbenol, and limonene oxide being among the dominant compounds across all samples.

Table 7. GC-MS-identified essential oil components (%) of *M. officinalis* under CuO-NP treatments.

Compound	RI	Cont. *	0.1 mg/ L	1.0 mg/ L	10.0 mg/ L
Valeraldehyde	625	n.d.	n.d.	0.23	n.d.
Hex-2(E)-enal	854	0.82	0.40	n.d.	n.d.
Nona-2(E),6(E)-dial	859	n.d.	0.73	n.d.	n.d.
Hept-5-en-2-one <6-methyl->	986	0.36	0.62	0.50	n.d.
Geranyl acetone	994	n.d.	n.d.	n.d.	0.36
Myrcene	996	0.16	n.d.	n.d.	n.d.
Cymene <para->	102	0.13	n.d.	n.d.	n.d.
Limonene	102	1.19	n.d.	n.d.	n.d.
Linalool	110	0.26	0.80	0.62	n.d.
Verbenol	112	1.76	2.14	3.01	1.72
Citronellal	115	0.14			
Limonene oxide <trans->	117	1.20	1.07	1.81	1.11
Acetovanillone	118	0.38	n.d.	0.92	n.d.
Pent-2(E)-enal	120	0.07	n.d.	n.d.	n.d.
Oct-7-enol <3,7-dimethyl->	124	0.24	n.d.	n.d.	n.d.
Caprylaldehyde	124	n.d.	n.d.	0.24	n.d.
Neral	125	29.16	32.5	32.3	29.6
Nerol	126	4.48	7	6	5
Geranial	128	51.71	60.1	57.1	66.3
Citronellyl acetate	128	0.13	n.d.	n.d.	n.d.
Lavandulol	131	0.05	n.d.	n.d.	n.d.
Geraniol	133	0.53	n.d.	n.d.	n.d.
Eugenol	136	0.11	n.d.	n.d.	n.d.

Geranyl acetate	139	0.74	n.d.	n.d.	n.d.
Verbenone	142	0.23	n.d.	0.99	n.d.
	8				
Caryophyllene <beta->	143	1.73	n.d.	n.d.	0.81
	0				
Aromadendrene	147	0.11	n.d.	n.d.	n.d.
	2				
Isovalerate <allyl->	151	0.10	n.d.	0.28	n.d.
	1				
Heptylidene acetone	154	0.10	n.d.	n.d.	n.d.
	6				
Caryophyllene oxide	158	n.d.	n.d.	0.62	n.d.
	4				
Bergamotol <(Z)-, alpha-trans->	194	0.15	n.d.	n.d.	n.d.
	9				
Viridiflorol	240	2.75	n.d.	n.d.	n.d.
	8				

*Medium containing 0.1 mg/L KIN was considered as control group and all media containing nanoparticles were also supplemented with 0.1 mg/L KIN.

Geranial was the major compound, accounting for 51.71% in the control and increasing with CuO-NP treatments, reaching a peak of 66.35% at 10.0 mg/L CuO-NP. Similarly, neral levels ranged between 29.16% and 32.57%, remaining relatively stable across treatments. Verbenol showed a dose-dependent increase, from 1.76% in the control to 3.01% at 1.0 mg/L CuO-NP, before slightly declining at 10.0 mg/L (1.72%).

A notable finding was that limonene oxide content increased from 1.20% in the control to 1.81% under 1.0 mg/L CuO-NP, while linalool and acetovanillone levels also peaked at this concentration (0.80% and 0.92%, respectively). Certain compounds such as nona-2(E),6(E)-dienal and caprylaldehyde appeared exclusively in CuO-NP-treated samples, indicating a possible CuO-NP-induced biosynthetic pathway activation.

In contrast, several monoterpenes (e.g., myrcene, cymene, citronellal, and geraniol) were only detected in the control group and disappeared with CuO-NP exposure. These observations suggest both upregulation and suppression of specific metabolic routes depending on the nanoparticle dose.

Gene Expression

To evaluate the molecular responses of *M. officinalis* to copper oxide nanoparticles (CuO-NPs), the relative expression levels of three key genes involved in phenylpropanoid metabolism-PAL (phenylalanine ammonia-lyase), TAT (tyrosine aminotransferase), and RAS (rosmarinic acid synthase)-were quantified via qRT-PCR under varying CuO-NP concentrations (0.1, 1, and 10 mg/L). Expression profiles of PAL, TAT, and RAS genes suggest a dose-dependent activation of phenylpropanoid metabolism under CuO-NP treatment. The highest CuO-NP concentration (10 mg/L) consistently led to the most pronounced upregulation across all genes, pointing toward a potential elicitor

effect at higher doses. GAPDH was used as a reference gene for normalization.

PAL expression exhibited a concentration-dependent upregulation in response to CuO-NP exposure (Figure 2). Compared to the kinetin control (0.1 mg/L KIN, set as 1.00), a modest increase was observed at 0.1 mg/L CuO (0.91-fold), followed by a significant elevation at 1 mg/L (set as baseline 1.00), and a striking ~4.9-fold induction at 10 mg/L CuO-NP. The strongest PAL induction under 10 mg/L suggests activation of phenylpropanoid biosynthesis, potentially as a defense mechanism against oxidative stress induced by higher nanoparticle concentrations.

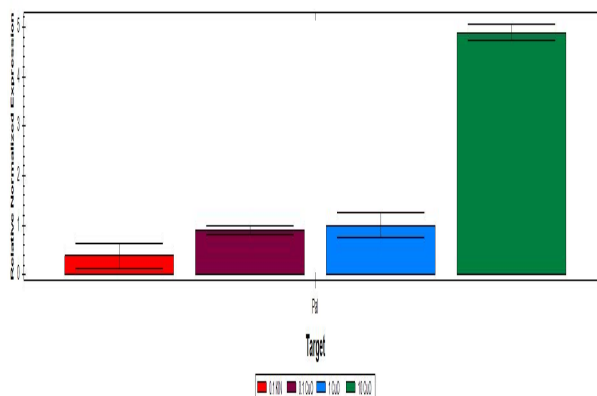


Figure 2. Expression profiles of PAL gene in *M. officinalis* seedlings.

The expression of RAS showed a pronounced upregulation only at the highest CuO-NP concentration (Figure 3). While expression levels remained minimal at 0.1 mg/L KIN (0.0057), 0.1 mg/L CuO (0.097), and 1 mg/L CuO (0.12), a marked ~10.6-fold increase was detected at 10 mg/L CuO-NP. This dose-dependent increase implies that RAS activation is responsive to elevated CuO-NP-induced stimuli and may reflect an upregulated biosynthetic pathway for rosmarinic acid under stress conditions.

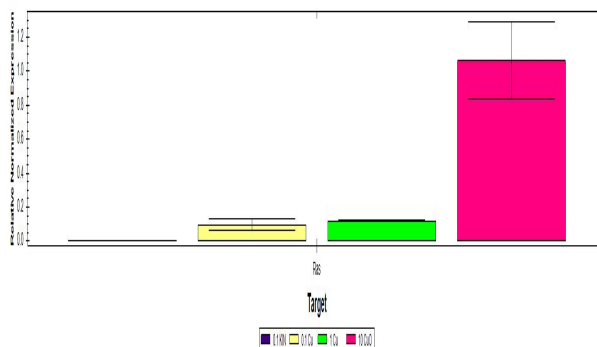


Figure 3. Expression profiles of RAS gene in *M. officinalis* seedlings.

TAT expression followed a biphasic pattern (Figure 4). Relative to the control (1.00), a strong downregulation was observed at 0.1 mg/L CuO (0.19-fold), followed by moderate activation at 1 mg/L (0.32-fold), and a substantial increase at 10 mg/L CuO-NP (1.52-fold). This

pattern indicates that TAT responds dynamically to increasing nanoparticle stress, with maximum.

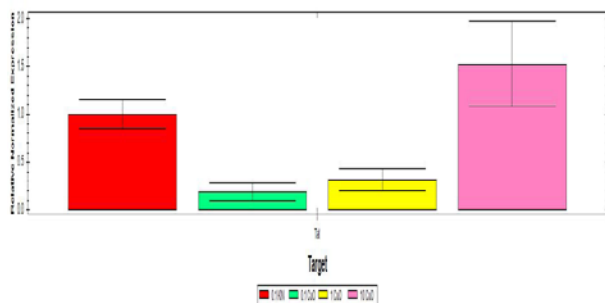


Figure 4. Expression profiles of TAT gene in *M. officinalis* seedlings.

DISCUSSION

This study showed that copper oxide nanoparticles (CuO-NPs) have a significant impact on the growth, metabolism, and overall physiology of lemon balm (*M. officinalis* subsp. *officinalis*) when grown in vitro. Depending on the concentration used, CuO-NPs acted either as growth stimulators or stress inducers, highlighting the importance of dosage in plant-nanoparticle interactions.

The observed growth responses of *M. officinalis* seedlings to CuO-NP treatments revealed a dose-dependent biphasic trend, a hallmark of many nanoparticle-plant interactions. At low concentrations (0.1 mg/L), CuO-NPs significantly enhanced shoot elongation and leaf formation compared to the control. This suggests that trace amounts of copper may act similarly to micronutrients, supporting cell division, chloroplast development, and hormonal balance essential for aerial organ growth [2]. However, at higher concentrations (10.0 mg/L), shoot parameters declined, likely due to Cu-induced oxidative stress that may impair cell elongation and metabolic homeostasis.

Remarkably, root-related parameters displayed an opposite trend. While low CuO-NP concentrations supported limited root development, 10.0 mg/L CuO-NPs significantly increased root number, suggesting that moderate stress conditions triggered an adaptive developmental shift favoring below-ground organogenesis. Such compensatory root proliferation is commonly reported under abiotic elicitor exposure and may reflect an effort by the plant to enhance water and nutrient uptake under perceived stress conditions [23,24]. Root elongation, on the other hand, was maximized at 1.0 mg/L CuO-NP, indicating that moderate concentrations may be optimal for promoting root cell expansion without imposing excessive stress. The decline in root length at 10.0 mg/L, despite the increase in root number, suggests a trade-off between root branching and axial growth, which may be driven by hormonal imbalances or ROS accumulation under higher nanoparticle load.

The percentage of dry weight, used as a proxy for biomass accumulation, also varied with CuO-NP concentration. Although 10.0 mg/L increased root biomass through proliferation, the highest dry weight

percentage was recorded in the control group, indicating that excessive CuO exposure may impair overall carbon assimilation and storage efficiency despite localized organ expansion.

These findings confirm that CuO-NPs exert dual roles depending on dose-acting as stimulants at low levels and stressors at higher concentrations. Such dose-specific responses are consistent with hormetic effects observed in other plant species exposed to metal-based nanoparticles, where growth-promoting effects at sub-toxic doses are often followed by inhibitory or toxic effects beyond a certain threshold [25,26]. Understanding this balance is essential for optimizing nanoparticle-based elicitation strategies in plant biotechnology application.

The increase in total phenolic (TPC) and flavonoid content (TFC) observed in CuO-NP-treated *M. officinalis* seedlings highlights the nanoparticles' role as potent abiotic elicitors of secondary metabolism. A clear dose-dependent response was noted, with 10.0 mg/L CuO-NPs inducing the highest TPC (43.45 ± 0.80 mg GAE/g) and TFC (1.716 ± 0.03 mg QE/g) levels. These enhancements are consistent with prior findings that metal-based nanoparticles can trigger reactive oxygen species (ROS) formation, which in turn activates antioxidant defense mechanisms and upregulates phenylpropanoid biosynthesis [27,28].

HPLC analysis further clarified the impact of CuO-NPs on individual phenolic constituents. Rosmarinic acid, a known antioxidant and anti-inflammatory compound characteristic of *M. officinalis*, was significantly elevated in the 10.0 mg/L treatment group, reaching $20.796 \mu\text{g/g}$ compared to $14.435 \mu\text{g/g}$ in the control. This suggests a strong metabolic redirection toward terminal phenylpropanoid products under CuO-induced elicitation. Supporting this, a decrease in upstream precursors such as caffeic acid and p-coumaric acid was observed in CuO-treated samples, consistent with a feedback-driven channeling of intermediates into downstream branches of the biosynthetic pathway [25,29].

Notably, while low CuO-NP doses stimulated modest increases in some phenolics, higher concentrations appeared to suppress less stable intermediates, possibly due to oxidative degradation or feedback inhibition mechanisms. The concerted enhancement of specific end-products under CuO-NP elicitation aligns with previous studies showing that nanoparticles can influence enzymatic activity and gene expression involved in secondary metabolism [24,26].

Overall, these findings suggest that CuO-NPs modulate phenolic metabolism in a concentration-sensitive manner by promoting the biosynthesis of key bioactive compounds. Such modulation is valuable for phytopharmaceutical applications where enhanced production of select phenolics-especially rosmarinic acid-is desired. These results also provide a biochemical basis for the observed increases in antioxidant and enzyme inhibitory activities, establishing a strong link

between metabolite accumulation and functional bioactivity.

The antioxidant potential of *M. officinalis* extracts increased significantly in response to CuO-NP treatments, with the highest activity observed at 10.0 mg/L across all assays. This concentration yielded the greatest CUPRAC value (504.3 $\mu\text{mol TE/g}$) and the lowest SC₅₀ values in both DPPH (68.67 $\mu\text{g/mL}$) and ABTS (4.05 mg/mL) assays, suggesting a strong enhancement of the plant's non-enzymatic antioxidant defense system. These improvements parallel the dose-dependent increases in total phenolic and flavonoid content, as well as the HPLC-confirmed accumulation of key antioxidant compounds such as rosmarinic and ferulic acids.

Phenolic compounds, particularly those with ortho-dihydroxy or methoxy functional groups, are known to efficiently scavenge free radicals and chelate metal ions [9]. The elevation of such compounds under CuO-NP elicitation likely contributes directly to the enhanced antioxidant profiles observed in this study. Rosmarinic acid, for instance, has been shown to neutralize reactive oxygen species (ROS) by donating hydrogen atoms and stabilizing phenoxyl radicals through resonance, making it a central player in antioxidant activity.

The results also indicate that antioxidant response is highly sensitive to nanoparticle dose. While 0.1 and 1.0 mg/L CuO-NPs moderately improved activity, maximum efficacy was reached at 10.0 mg/L. This supports the notion that a threshold concentration of nanoparticles is required to induce sufficient metabolic stress to activate the phenylpropanoid pathway and trigger defense responses without causing toxicity. Similar concentration-dependent trends have been reported in other medicinal plants treated with metal-based nanoparticles, such as ZnO, Fe₃O₄, and AgNPs, where elicitation of antioxidant pathways was linked to nanoparticle-induced redox perturbations [25,27].

Interestingly, although the CUPRAC assay provided a broad measure of reducing capacity, the radical scavenging assays (DPPH and ABTS) were more discriminative of nanoparticle dose effects, possibly due to the differing reactivity of specific phenolics toward distinct radical species. This highlights the importance of using multiple assays to comprehensively assess antioxidant behavior.

In summary, the enhanced antioxidant performance of CuO-NP-treated *M. officinalis* is strongly associated with nanoparticle-induced phenolic accumulation, particularly of rosmarinic acid. These findings support the utility of CuO-NPs as effective abiotic elicitors for improving the nutraceutical potential of medicinal plants through targeted enhancement of antioxidant capacity.

The enzyme inhibition results clearly demonstrated that CuO-NP-treated *M. officinalis* extracts exert concentration-dependent bioactivity across a panel of clinically relevant targets, including AChE, MAO, urease, and HIV-1 reverse transcriptase (RT). Among these, the strongest AChE inhibition was observed at 1.0 mg/L CuO-NP, suggesting that this concentration may

optimize the balance between secondary metabolite induction and phytotoxicity. Notably, higher doses such as 10.0 mg/L showed reduced AChE inhibitory activity, which may reflect a shift in metabolite profile or saturation of bioactive compound production.

In contrast, MAO and urease inhibition improved progressively with increasing nanoparticle concentration, with the lowest IC₅₀ values recorded at 10.0 mg/L. These results suggest that enzymes involved in oxidative metabolism or microbial virulence may be more responsive to metabolite accumulation triggered by higher elicitor doses. The moderate yet consistent inhibition of HIV-1 RT across all concentrations, particularly at 10.0 mg/L, also points to a broader spectrum of bioactivity in CuO-NP-treated extracts.

These enzyme-inhibitory effects are likely mediated by the increased presence of polyphenolic compounds, especially rosmarinic acid, ferulic acid, and gallic acid, all of which have been reported to possess multi-target inhibitory potential due to their ability to bind enzyme active sites or metal cofactors [30,31]. The correlation between elevated phenolic content (as confirmed by HPLC and TPC/TFC assays) and improved inhibitory activity supports this biochemical linkage.

Notably, the differences in inhibition profiles across enzymes highlight the selective influence of CuO-NPs on metabolic pathways. For example, while AChE inhibition peaked at moderate dose levels, urease and MAO responded better to higher concentrations. This divergence could result from distinct structure-activity relationships among individual phenolic constituents, or from varying sensitivities of enzyme systems to stress-induced phytochemical changes.

Overall, the enzyme inhibition patterns observed in this study suggest that CuO-NPs can effectively modulate the production of functionally bioactive compounds in *M. officinalis*, with implications for developing phytochemical-based inhibitors for therapeutic or agricultural use. These findings align with previous studies demonstrating the potential of nanoparticle-elicited plant systems in generating natural enzyme inhibitors with diverse target selectivity [25,26].

The findings demonstrate that CuO nanoparticles significantly modulate the essential oil composition of *M. officinalis*, with both enhancing and suppressing effects on specific secondary metabolites. The marked increase in geranial and neral content in CuO-NP-treated groups, particularly at 10.0 mg/L, suggests a stimulation of the terpenoid biosynthetic pathway, possibly via stress-induced activation of terpene synthases.

The elevation in verbenol and limonene oxide at low to moderate CuO-NP concentrations further supports the hypothesis that CuO-NPs act as elicitors, promoting oxidative and enzymatic processes that favor monoterpene and sesquiterpene biosynthesis. However, the decline in certain volatile constituents such as myrcene and cymene indicates that some biosynthetic routes may be selectively repressed or that enzymatic competition occurs under nanoparticle stress.

Remarkably, the appearance of compounds not detected in the control group (e.g., nona-2(E),6(E)-dienal, caprylaldehyde) suggests that CuO-NP exposure may induce the de novo synthesis of stress-related volatiles or intermediates associated with lipid peroxidation.

These results align with previous studies reporting that metallic nanoparticles can serve as abiotic elicitors in aromatic and medicinal plants, enhancing secondary metabolite yield while reshaping their metabolic profiles. Therefore, the application of CuO-NPs, particularly at optimized low-to-moderate concentrations, may represent a promising strategy to enrich essential oil quality in *M. officinalis* cultivation.

At the molecular level, gene expression data confirmed these changes. Genes involved in phenolic biosynthesis-PAL, TAT, and RAS-were all upregulated under 1.0 mg/L CuO-NPs. PAL, for instance, is the key gateway enzyme in the phenylpropanoid pathway, and its activation sets the stage for many important secondary metabolites [29]. The coordinated upregulation of TAT and RAS suggests a targeted boost in rosmarinic acid production. In contrast, gene expression levels dropped under high nanoparticle stress, echoing the biochemical results.

In summary, this study shows that carefully dosed CuO-NPs can improve plant growth and boost production of beneficial bioactive compounds in *M. officinalis* by stimulating both metabolic and genetic pathways. However, too much of a good thing-like 10.0 mg/L-can backfire, causing stress and reducing productivity. This reinforces the importance of optimizing nanoparticle concentrations when using them as elicitors in plant science and biotechnology.

Looking ahead, future research should explore the signaling pathways involved, such as the roles of ROS, calcium, and plant hormones like jasmonic and salicylic acid. Broader "omics" approaches, including transcriptomics, proteomics, and metabolomics, could provide deeper insight into how nanoparticles influence plant systems at the molecular level.

CONCLUSION

This study provides clear evidence that copper oxide nanoparticles (CuO-NPs) significantly modulate the growth, secondary metabolism, and molecular responses of *M. officinalis* L. subsp. *officinalis* under in vitro conditions. The findings reveal a dose-dependent biphasic effect of CuO-NPs, where low concentrations (0.1 mg/L) enhance shoot development, while higher doses (10.0 mg/L) trigger root proliferation, secondary metabolite accumulation, and gene upregulation linked to phenylpropanoid biosynthesis.

Elevated total phenolic and flavonoid contents at 10.0 mg/L CuO-NP were associated with improved antioxidant potential and greater rosmarinic acid levels, as confirmed by HPLC and antioxidant assays. Enzyme inhibition results demonstrated the bioactivity of CuO-NP-treated extracts against key targets, including AChE, MAO, urease, and HIV-1 RT, reflecting the therapeutic

potential of nanoparticle-elicited plant systems. Additionally, essential oil profiling and gene expression analysis provided further insights into CuO-NP-induced metabolic reprogramming and activation of defense-related pathways.

Taken together, these findings support the use of CuO-NPs as effective abiotic elicitors to enhance the phytochemical content and functional quality *M. officinalis*. However, the concentration of nanoparticles is critical, as excessive exposure may induce oxidative stress and suppress certain physiological traits. Future work should focus on elucidating the underlying signaling mechanisms and applying omics-based tools to better understand nanoparticle-plant interactions for optimized biotechnological applications.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was financially supported by TUBITAK under Project No. 121Z818, and the authors gratefully acknowledge this support.

REFERENCES

- [1] Rico, C. M., Majumdar, S., Duarte-Gardea, M., Peralta-Videa, J. R., Gardea-Torresdey, J. L. (2011). Interaction of nanoparticles with edible plants and their possible implications in the food chain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(8): 3485-3498.
- [2] Siddiqi, K. S., Husen, A. (2017). Plant response to engineered metal oxide nanoparticles. *Nanoscale Research Letters*, 15: 141.
- [3] Yruela, I. (2009). Copper in plants: Acquisition, transport and interactions. *Functional Plant Biology*, 32(11): 409-430.
- [4] Adrees, M., Ali, S., Rizwan, M., Ibrahim, M., Abbas, F., Farid, M., Zia-Ur-Rehman, M., Irshad, M. K., Bharwana, S. A. (2015). The effect of excess copper on growth and physiology of important food crops: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 22: 8148-8162.
- [5] Pelegrino, M. T., Kohatsu, M. Y., Seabra, A. B., Monteiro, L. R., Gomes, D. G., Oliveira, H. C., Rolim, W. R., de Jesus, T. A., Batista, B. L., Lange, C. N. (2020). Effects of copper oxide nanoparticles on growth of lettuce (*Lactuca sativa* L.) seedlings and possible implications of nitric oxide in their antioxidative defense. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192: 1-14.
- [6] Feigl, G. (2023). The impact of copper oxide nanoparticles on plant growth: a comprehensive review. *Journal of Plant Interactions*, 18(1).
- [7] Atha, D. H., Wang, H., Petersen, E. J., Cleveland, D., Holbrook, R. D., Jaruga, P., Dizdaroglu, M., Xing, B., Weston, D. J. (2012). Copper oxide nanoparticle mediated DNA damage in terrestrial plant models. *Environmental Science & Technology*, 46(3): 1819-1827.
- [8] Ruttkay-Nedecky, B., Krystofova, O., Nejd, L., Adam, V. (2017). Nanoparticles Based on Essential Metals and Their Phytotoxicity, *Journal of nanobiotechnology*, 15(1): 33.
- [9] Petersen, M., Simmonds, M. S. J. (2003). Rosmarinic acid. *Phytochemistry*, 62(2): 121-125.
- [10] Lamaison, J. L., Petitjean-Freytet, C., Carnat, A. (1991). Medicinal Lamiaceae with antioxidant properties, a potential

source of rosmarinic acid. *Pharmaceutica Acta Helvetiae*, 66(7): 185-188.

[11] Kumar, K., Debnath, P., Singh, S., Kumar, N. (2023). An Overview of Plant Phenolics and Their Involvement in Abiotic Stress Tolerance. *Stresses*, 3(3): 570-585.

[12] Pant, B. (2014). Application of Plant Cell and Tissue Culture for the Production of Phytochemicals in Medicinal Plants. In: Adhikari, R., Thapa, S. (eds) *Infectious Diseases and Nanomedicine II. Advances in Experimental Medicine and Biology*, vol 808. Springer, New Delhi.

[13] Bektaş, E., Sökmen, A. (2016). In vitro seed germination, plantlet growth, tuberization, and synthetic seed production of *Serapias vomeracea* (Burm.f.) Briq. *Turkish Journal of Botany*, 40: 584-594.

[14] Singleton, V. L., Rossi, J. A. 1965. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American journal of enology and viticulture*, 16: 144-158.

[15] Chang, C., Yang, M., Wen, H., Chern, J. (2002). Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods. *Journal of Food and Drug Analysis*, 10(3): 178-182.

[16] Apak, R., Güçlü, K., Özyürek, M., Karademir, S. E. (2004). Novel total antioxidant capacity index for dietary polyphenols and vitamins C and E, using their cupric ion reducing capability in the presence of neocuproine: CUPRAC method. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(26): 7970-7981.

[17] Cuendet, M., Hostettmann, K., Potterat, O. (1997). Iridoid glucosides with free radical scavenging properties from *Fagraea blumei*. *Helvetica Chimica Acta*, 80(4): 1144-1152.

[18] Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*, 26(9-10): 1231-1237.

[19] Ellman, G. L., Courtney, K. D., Andres, V. Jr., Featherstone, R. M. (1961). A new and rapid colorimetric determination of acetylcholinesterase activity. *Biochemical Pharmacology*, 7: 88-95.

[20] Olsen, H. T., Stafford, G. I., van Staden, J., Christensen, S. B., Jäger, A. K. (2008). Isolation of the MAO-inhibitor naringenin from *Mentha aquatica* L. *Journal of ethnopharmacology*, 117: 500-502.

[21] Van Slyke, D. D. E., Archibald, R. M. (1944). Manometric, titrimetric and colorimetric methods for measurement of urease activity. *Journal of biological chemistry*, 154: 623-642.

[22] Bektaş, E., Şahin, H., Beldüz, A. O., Güler, H. İ. (2022). HIV-1-RT inhibition activity of *Satureja spicigera* (C.KOCH) BOISS. aqueous extract and docking studies of phenolic compounds identified by RP-HPLC-DAD. *Journal of Food Biochemistry*, 46(4): e13921.

[23] Tripathi, D. K., Singh, V. P., Prasad, S. M., Chauhan, D. K., Dubey, N. K. (2015). Silicon nanoparticles alleviate chromium phytotoxicity in *Pisum sativum* (L.) seedlings", *Plant Physiology Biochemistry*, 96: 189-198.

[24] Babajani, A., Iranbakhsh, A., Oraghi Ardebili, Z., Eslami, B. (2019). Differential growth, nutrition, physiology, and gene expression in *Melissa officinalis* mediated by zinc oxide and elemental selenium nanoparticles. *Environmental Science and Pollution Research International*, 26(24): 24430-24444.

[25] Riahi, M. A., Nasiri, B. M., Rezaee, F., Baghizadeh, A. (2018). Rosmarinic Acid Accumulation and Expression of

Tyrosine Aminotransferase Gene in *Melissa officinalis* Seedlings in Response to CuO Nanoparticles. *Iranian journal of biology*, 31: 106-116.

[26] Martínez-Chávez, L. A., Hernández-Ramírez, M. Y., Feregrino-Pérez, A. A., Esquivel Escalante, K. (2024). Cutting-Edge Strategies to Enhance Bioactive Compound Production in Plants: Potential Value of Integration of Elicitation, Metabolic Engineering, and Green Nanotechnology. *Agronomy*, 14(12): 2822.

[27] Gonçalves, S., Mansinhos, I., Rodríguez-Solana, R., Pereira-Caro, G., Moreno-Rojas, J. M., Romano, A. (2021). Impact of Metallic Nanoparticles on In Vitro Culture, Phenolic Profile and Biological Activity of Two Mediterranean Lamiaceae Species: *Lavandula viridis* L'Hér and *Thymus lotocephalus* G. López and R. Morales. *Molecules*, 26(21): 6422.

[28] Tripathi, D. K., Shweta, S., Singh, S., Singh, S., Pandey, R., Singh, V. P., Sharma, N. C., Prasad, S. M., Dubey, N. K., Chauhan, D. K. (2017). An overview on manufactured nanoparticles in plants: Uptake, translocation, accumulation and phytotoxicity. *Plant Physiology and Biochemistry*, 110: 2-12.

[29] Dixon, R. A., Paiva, N. L. (1995). Stress-induced phenylpropanoid metabolism. *The Plant Cell*, 7(7): 1085-1097.

[30] Gülçin, İ., Scozzafava, A., Supuran, C. T., Koksall, Z., Turkan, F., Çetinkaya, S., Bingöl, Z., Huyut, Z., Alwasel, S. H. (2016). Rosmarinic acid inhibits some metabolic enzymes including glutathione S-transferase, lactoperoxidase, acetylcholinesterase, butyrylcholinesterase and carbonic anhydrase isoenzymes. *Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry*, 31(6): 1698-702.

[31] Gonçalves, S., Romano, A. (2017). Inhibitory Properties of Phenolic Compounds Against Enzymes Linked with Human Diseases. *Phenolic Compounds - Biological Activity*. InTech. Available at: <http://dx.doi.org/10.5772/66844>.

Beslenme ve Hastalık Modellemelerinde *Drosophila melanogaster*'in Yeri ve Önemi

Selinay TAYSI¹, Bülent ÇETİN²

¹ Beslenme ve Diyetetik, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye

² Gıda Mühendisliği, Ziraat Fakültesi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye

✉: selinay.taysi17@ogr.atauni.edu.tr ¹ [0009-0006-9307-7796](https://orcid.org/0009-0006-9307-7796) ² [0000-0002-4679-2555](https://orcid.org/0000-0002-4679-2555)

Geliş (Received): 06.11.2024

Düzeltilme (Revision):13.01.2025.

Kabul (Accepted): 17.04.2025

ÖZ

Bu çalışmanın amacı biyolojik bilimler çalışan farklı disiplinler için *Drosophila melanogaster*'in tanıtılması ve model organizma olarak kullanıldığı çalışmaların anlamlı bir bütün içerisinde sunulmasıdır. Bu amaçla organizmanın tanıtılması için fizyolojik ve anatomik özellikleriyle yaşam döngüsü görseller eşliğinde daha anlaşılır hale getirilmiştir. Ayrıca diğer model organizmalar hakkında bilgiler verilerek *D. melanogaster* ile mukayesesi yapılmıştır. *D. melanogaster*'in hastalık modellerine değinilmiş, farklı uygulamaların organizmadaki etkileri literatür desteğiyle sunulmuştur. Böylece gıda ve beslenme araştırmalarında giderek daha fazla araştırmaya konu olan *D. melanogaster*'in çevre ve beslenme faktörlerine yanıt olarak besin alımı, vücut kompozisyonu, bağırsak bariyer fonksiyonu, mikrobiyota, doğurganlık, yaşlanma ve yaşam süresinin sistematik olarak belirlenebileceği görülmüştür. Öte yandan metabolik hastalıklar, dolaşım ve boşaltım sistemi hastalıkları, kanser ve nörodejeneratif hastalıklar içinde organizmanın yoğun olarak kullanıldığı anlaşılmaktadır. Sonuç olarak *D.melanogaster*' in sağlık, gıda ve beslenme çalışmalarında model olarak kullanılabileceği, ülkemizde sağlık alanında araştırma yapan kişi ve kurumlarca kullanımıyla anlamlı verilere ulaşılabileceği, zaman ve maliyet açısından faydalı olabileceği öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: *Drosophila melanogaster*, Model organizma, Hastalıklar, Beslenme

The Place and Importance of *Drosophila melanogaster* in Nutrition and Disease Modeling

ABSTRACT

The aim of this study is to introduce *Drosophila melanogaster* for different disciplines working in biological sciences and to present the studies in which it is used as a model organism in a meaningful whole. For this purpose, the physiological and anatomical characteristics and life cycle of the organism were made more understandable with visuals. In addition, information about other model organisms was given and compared with *D. melanogaster*. Disease models of *D. melanogaster* were mentioned and the effects of different applications on the organism were presented with the support of literature. Thus, it was seen that food intake, body composition, intestinal barrier function, microbiota, fertility, ageing and life span of *D. melanogaster*, which is the subject of more and more research in food and nutrition research, can be systematically determined in response to environmental and nutritional factors. On the other hand, it is understood that the organism is intensively used in metabolic diseases, circulatory and excretory system diseases, cancer and neurodegenerative diseases. As a result, it is predicted that *D.melanogaster* can be used as a model in health, food and nutrition studies, meaningful data can be obtained by the use of people and institutions conducting research in the field of health in our country, and it can be beneficial in terms of time and cost.

Keywords: *Drosophila melanogaster*, Model organism, Diseases, Nutrition.

GİRİŞ

Model organizmalar; laboratuvar ortamında ya da yapay şartlarda üretimi gerçekleştirilen ve üretiminin devam ettirilmesi basit olan, deney çalışmalarında avantaj sağlayan ve biyolojik süreçlerin araştırılması amacıyla yararlanılan canlılardır. Model organizmaların deneylerde kullanılma nedenleri insan genomuna göstermiş oldukları genetik ve biyolojik benzerliklerdir. Model organizmalar, insanlar üzerinde yapılamayacak deney çalışmalarında kullanılmaktadırlar [1]. Bir canlının model organizma olarak tercih edilmesinde;

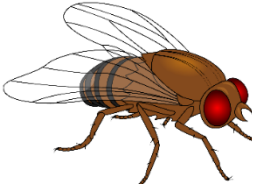
- ✓ İnsan fizyolojisi ve anatomisiyle yüksek oranda benzerlik göstermesi,
- ✓ Jenerasyon süresinin kısa olması,
- ✓ Embriyojenik gelişiminin kolay takip edilmesi ve müdahale şansının olması,
- ✓ Kültür ortamına kolay alınabilmesi,
- ✓ Deney çalışmalarına ve genetik analizlere uygunluk göstermesi,
- ✓ Etik sorun oluşturmaması gibi önemli hususlar yer almaktadır.

Model organizmaların sunduğu avantajlar arasında gen düzeninin, fizyolojik ve biyolojik işlemlerin ve

hastalıkların mekanizmasının anlaşılması yer almaktadır [5]. Her model organizmanın sağladığı avantajların yanı sıra bazı dezavantajları da bulunmaktadır (Tablo 1). Bu nedenle çalışılacak hastalık üzerinde doğru sonuçlar elde edebilmek için uygun modeli seçebilmek önemlidir. Organizmalar arasında var olan türlerin göstermiş oldukları genetik benzerlik bir organizma ile yapılan çalışmadan elde edilen sonuçların diğer türlerde de veri olarak kullanılabileceği anlamı taşımaktadır. 90'lı yıllarda insan genomuyla ilgili yapılan çalışmalarda sıklıkla kullanılan model organizmalar fareler, mayalar,

nematodlar ve koli basilleridir. Günümüzde ise gelişen teknolojiyle birlikte omurgalı ve omurgasız canlı türlerinin moleküler ve genetik yapılarının daha iyi anlaşılması için çalışmalar gerçekleştirilmiş ve önemli adımlar atılmıştır [1,5]. Omurgasız model organizmaların tercih edilme nedenleri üretimlerinin kolay olması, kısa sürede çok sayıda üretilibilmeleri, bakımları için fazla maliyet gerektirmemeleri, deneylerde kolayca kullanılıp kısa sürede sonuç vermeleridir [2]. Yaygın olarak tercih edilen omurgasız canlılardan biri de *Drosophila melanogaster* Meigen, 1830 olmuştur.

Tablo 1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Model Organizmaların Avantaj ve Dezavantajları [1,3,4,5,6.]

	Avantaj	Dezavantaj
Omurgasız Canlılar		
 <i>Drosophila melanogaster</i> (Meyve Sineği)	Genetik analizler için uygundur. Etik sorun oluşturmaz. İnsan hastalıklarıyla ilişkili pek çok ortolog gene sahiptir. İnsan fizyolojisi ve anatomisiyle yüksek oranda benzerlik gösterir. Birçok farklı türde moleküler teknik kullanılabilir. Genomik dizisi tamamlanmıştır. Sistem kurmak kolaydır. Genetik manipülasyonlara son derece uygundur. Bakım maliyeti düşüktür ve üremesi kolaydır. Kısa ömürlüdür. Gelişimi hızlıdır. Son derece verimlidir, her gün ovülasyon gerçekleşir.	Omurgalı değildir. İnsandaki bazı dokuları (kemik, kıkırdak) bulundurmamaktadır. İnsanlardaki her hastalık modellenememektedir.
 <i>Caenorhabditis elegans</i> (Yuvarlak kurt) Maupas, 1899	Genetik analizler için uygundur. Birçok farklı türde moleküler teknik kullanılabilir. Genomik dizisi tamamlanmıştır. Genetik manipülasyonlara oldukça yatkındır. Hermafrodittir, kendi kendine döllenir. Sistem kurmak kolaydır. Kısa ömürlüdür. Bakım maliyeti düşüktür ve kolay üretilir. Son derece verimlidir, her gün ovülasyon gerçekleşir. Gelişimi hızlıdır. Yetişkinliğe kadar gelişimleri şeffaftır ve takip edilebilir. Dondurulup saklanabilir ve gerektiğinde tekrar kullanılabilir.	<i>D. melanogaster</i> 'e göre insana daha az benzerlik gösterir. İnsan fizyolojisine benzer bir fizyolojiye sahip değildir. Bazı embriyolojik manipülasyonlar zordur. Bağışıklık sistemi yoktur.
Omurgalı Canlılar		
 <i>Danio rerio</i> (Zebra balığı) Hamilton, 1822	Genetik analizler için uygundur. Embriyosu şeffaf olduğu için embriyo gelişim süreci rahatlıkla gözlemlenebilir. İnsan genomuna uygun en basit omurgalıdır. Embriyolojik manipülasyon mümkündür ve geniş tarama imkanı sunar. Diğer omurgalılara benzer organ sistemleri bulundurulur. Bağışıklık sistemi tamdır. Gelişimi hızlıdır. Yüksek doğurganlık gösterir, bir ila iki haftada bir yumurta bırakır.	İnsan fizyolojisine benzer bir fizyolojiye sahip değildir. <i>D. melanogaster</i> ve <i>C. elegans</i> ile karşılaştırıldığında bakım açısından nispeten pahalıdır. Biyolojik ortamı insanlardan çok farklıdır. Memelilere kıyasla vücut ısısı düşüktür ve ortam sıcaklığından etkilenir.



**Mus musculus
(Fare)**
Linnaeus, 1758

Genetik analizler için uygundur.
İnsanlara benzer bir patolojiye sahiptir.
Filogenetik olarak insanlara yakındır.
İnsan genomu ile yüksek oranda benzerlik gösterir.
Gelişim süreçleri diğer memelilerinkine benzemektedir.
Genomları tamamen açıklanmıştır.
Laboratuvarda üretimleri kolaydır.

Genetik manipülasyon, diğer model organizmalardan daha zor ve karmaşıktır.
Bakım maliyeti yüksektir.
Gebelik süresi uzundur, çalışmak zaman alıcıdır.
Büyük ölçekli çalışmalar sınırlıdır.

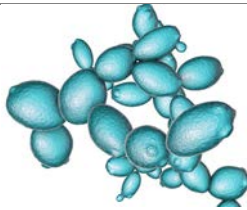


**Xenopus laevis
(Kurbağa)**
Daudin, 1802

Omurgalı gelişimi için uygundur.
Embriyonik gelişim hızlıdır.
Şeffaf bir embriyoya sahiptir ve embriyosu büyüktür, bu nedenle manipüle edilmesi kolaydır.

İnsan fizyolojisine benzer bir fizyolojiye sahip değildir.
Transgenik hayvan oluşturmak zordur.
Jenerasyon süresi uzundur.
Zayıf bir genetik haritaya sahiptir.

Mantar



**Saccharomyces
cerevisiae (Maya)**
Meyen, 1838

Genetik analizler için uygundur.
Birçok farklı türde moleküler teknik kullanılabilir.
Genomik dizisi tamamlanmıştır.
Ucuz ve kolay üretilir.
Bakımı kolaydır.
Ökaryottur.
Hücre bölünmesi insana benzer.
İzole edilmesi kolaydır.
Patojen değildir.

İnsan fizyolojisine benzer bir fizyolojiye sahip değildir.

Bu çalışmada beslenme ve diyetetik, gıda mühendisliği biyoloji, tıp gibi beslenme ve sağlık alanlarında faaliyet gösteren disiplinlerin araştırmalarının ilk aşamalarında *D. melanogaster*'i rahatlıkla kullanabilecekleri ilgili literatüre atıf yapılarak gösterilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla özellikle fizyolojik, metabolik hastalıklar, biyolojik gelişim, sinir, kanser ve nörodejeneratif hastalıklar gibi birçok hastalık için çok yönlü bir model organizma olarak *D. melanogaster*'in kullanımı örneklerle açıklanmıştır. Ayrıca muhtemel araştırmacıların ve okuyucuların konuyla ilgili farkındalıklarını artırmak ve model organizmayı daha iyi tanıyabilmeleri amacıyla model organizmanın gelişimi, yaşam döngüsü, anatomisi ve fizyolojik özellikleri hakkında da bilgiler verilmiştir.

Drosophila melanogaster'in Tarihsel Süreci

Drosophila, Drosophilidae familyasında yer alan, meyve veya sirke sineği olarak bilinen küçük sineklerdir. Özellikle çürüyen meyveler olmak üzere çürüyen besinler üzerinde bulunurlar [7]. *D. melanogaster*, Antarktika dışında dünyanın her yerinde var olan ortak bir canlı türüdür. Yaklaşık 15.000 yıl önce Güney Sahra Altı Afrika'dan Avrupa'ya göç etmiş daha sonra dünyanın geri kalan kısmında kolonileşmiş ve son birkaç yüzyıl içinde Amerika'ya ulaşmıştır. Yakın tarihte yapılan meyve ticareti *D. melanogaster*'in göç etmesinde büyük etkindir [5]. Anavatanı Tropikal Sahra Altı Afrika olan *D. melanogaster*'in hayatta kalabilmesi için ılıman iklim

bölgelerinde yaşaması gerekir. Bu nedenle yeni yaşam yerlerine uyumu incelemek için de kullanılmaktadır. *D. melanogaster*, *D. erecta*, *D. yakuba*, *D. simulans*, *D. santomea* gibi 2000'den fazla tanımlanmış *Drosophila* türü vardır; ancak, bu türlerin çoğu arasındaki filogenetik ilişkiler çözülememiştir ve taksonomistler arasında tartışılmaktadır [5]. Araştırmacılar, *Drosophila* cinsindeki türleri spermlerinin boyutundan türleşme geçmişlerine kadar incelemektedirler. Yaklaşık iki düzine *Drosophila* türünün mevcut genom dizileri bulunmaktadır. Bunlardan ilk tamamlanan ve model çalışmalarında sıklıkla tercih edilen *D. melanogaster* olmuştur. Çünkü *D. melanogaster* endemik değildir, dünyanın her yerinde kolaylıkla ulaşılabilir, uzun zamandır üzerinde çalışıldığı için anatomisi ve fizyolojisi açıklanmıştır, hücre çeşitleri çok iyi bilinmektedir, genlerin tanımlanmasında kullanılmış ve daha sonra bu genlerin homologlarının insanlarda bulunduğu keşfedilmiştir [5]. Son yıllarda, *Drosophila* yaygın olarak genetik, ilaç taraması ve toksisite, immünoloji, metabolizma ve beslenme ile ilgili çalışmalarda yer almaktadır. Ek olarak bir sinek ve memeli bağırsağı arasında göstermiş olduğu yapısal ve fonksiyonel benzerliğin yüksek olması sayesinde bağırsak ile ilgili sorunları anlayabilmek için çalışmalarda *Drosophila* 'ya özel ilgi duyulmaktadır [2].

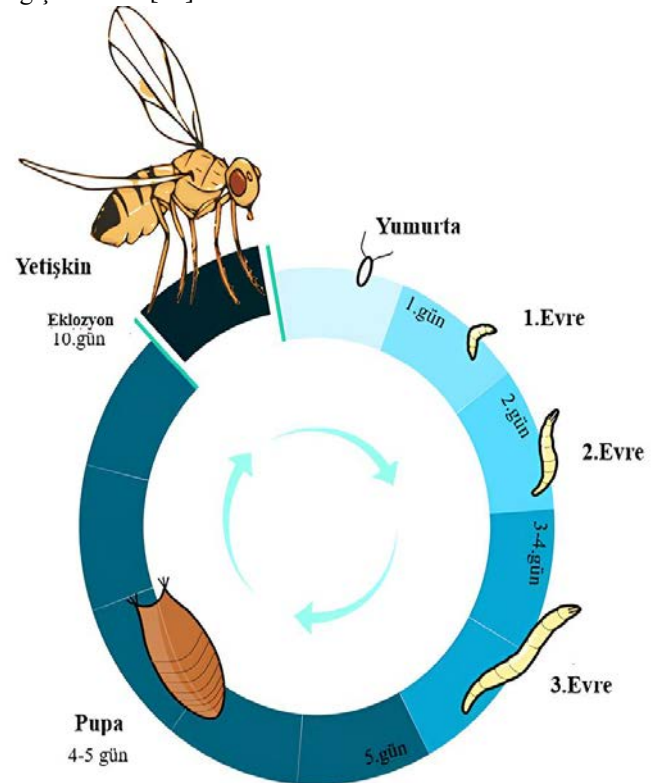
Sophophora alt cinsinde bulunan *D. melanogaster* ilk kez 1901 yılında Harvard'da William Castle ve arkadaşları tarafından laboratuvarda çalışılmıştır. Ancak Thomas Hunt Morgan, hiç şüphesiz *Drosophila* çalışmalarının

babası olarak kabul edilmektedir [9]. Thomas Hunt Morgan 20. yüzyılın başında Columbia Üniversitesi'nde *D. melanogaster*'i model organizma olarak kullanmıştır. İlk çalışması ise genleri tanımlamak ve genlerin kromozomlar içinde yer aldığını belirtmek için Gregor Mendel'in önerdiği kalıtım teorisini geliştirmek olmuştur [8]. Yapılan çalışmayla genlerin kromozom içinde yer aldığı kanıtlanmış ayrıca beyaz göz rengi geninin X kromozomu ile taşındığı ortaya çıkarılmıştır. T.H. Morgan kromozom kalıtım teorisini doğrulayarak ün kazanmış, bilim camiasının dikkati model organizma olarak kullanılan *D. melanogaster*'e çekilmiştir [5]. 1920'lerde *Drosophila*'yı kullanan Muller, X ışınlarının genlerin mutasyon oranında büyük bir artışa neden olduğunu ve aslında kromozomları kırabileceğini keşfetmiştir [8,9]. Daha sonra *D. melanogaster* ile yapılan çalışmalarla doğuştan gelen bağışıklık sisteminin tanımlanması, sirkadiyan ritim kontrolünü yapan moleküler mekanizmaların çözülmesi ve erken embriyonik gelişimin genetik kontrolü gibi birçok mekanizma aydınlatılmıştır [5]. *Drosophila*, son 40 yılda genler tarafından embriyo gelişiminin tek hücreden nasıl olgun çok hücreli organizmaya dönüştürdüğünü anlayabilmek için yaygın olarak kullanılan bir model haline gelmiştir [9]. Günümüzde dünya genelinde binlerce laboratuvar güçlü bir model organizma olan *D. melanogaster*'i incelemektedir. Çünkü laboratuvarla kolayca kültürlenebilir, birçok yavru oluşturabilir ve kısa jenerasyon süresine sahiptir; ek olarak, insan genomuna kıyasla daha basit bir genoma sahiptir, gen haritası çıkarılmıştır ve insan hastalıklarıyla ilişkili pek çok ortolog gene sahiptir [5].

***Drosophila melanogaster*'in Yaşam döngüsü ve Biyolojik Özellikleri**

D. melanogaster'in model sistem olarak kullanılmasının en büyük avantajı, genomunun tamamen dizilenmiş ve açıklanmış olmasının yanı sıra çok sayıda dölün hızlı bir şekilde üretilmesine izin veren kısa yaşam döngüsüne sahip olmasıdır [10]. *Drosophila* metamorfoz geçiren bir canlıdır. Yaşam döngüsü 4 temel evreden oluşur: Embriyo, larva, pupa ve yetişkin (Şekil 1) [11]. *D. melanogaster*'de, döllen yumurtanın yetişkin sineğe dönüşme işlemi 25°C'de yaklaşık 9-10 günlük süreçte gerçekleşirken 18°C'de bu süre 19 güne kadar çıkabilmektedir. Yani bu işlemin gerçekleşme süresi büyük ölçüde sıcaklıktan etkilenmektedir. Döllenme üzerine, embriyogenez 24 saatte tamamlanır, ardından her aşama geçişinde bir deri değiştirme olayı ile birinci, ikinci ve üçüncü dönem olarak adlandırılan üç larva aşaması gerçekleşir. Birer gün süren ilk iki evrenin ardından iki gün süren üçüncü evre gerçekleşir. Döllenmeyi takip eden beşinci gün sonunda larvanın gelişimi tamamlanmış olur ve sinekler sert ve koruyucu özelliği olan kitin yapılı bir pupa (puparium) içerisinde başkalaşım geçirir. Dört-beş gün kadar pupa durumunda kalan sineklerin birçok larva dokusu bu süreçte parçalanır [7]. Sineğin gelecekteki yetişkin yapıları, esas olarak farklılaşmamış epitelden oluşan hayali diskler

olarak larva içinde bulunur ve larvalarda bulunan bu 19 hayali diskten gözler, bacaklar ve kanatlar gibi birçok yetişkin yapı gelişir [10]. İnsanlar gibi, *Drosophila*'da da yetişkin dokuları genellikle yenilenemez; bir sineğin kanatlarını koparırsanız, bir daha kanatları gelişemez. Ancak bu durum hayali diskler için geçerli değildir. Çünkü zarar gören hayali diskler yenilenebilme özelliğine sahiptir. Bu sebeple son zamanlarda yenilenen doku genetiğini incelemek için *D. melanogaster* sıklıkla başvurulmuş bir model organizma olmuştur [12]. Yetişkin sinekler, eklozyon adı verilen bir süreçte pupa durumundan çıkar ve 8-12 saat içinde cinsel olarak olgunlaşarak yaşam döngüsünün kendini tekrar etmesine izin verir [7]. Bu davranışsal ve fizyolojik olgunlaşma dönemi, üreme çağında fenotipik esnekliği düzenleyen nörohormonal yolların uzun vadeli modülasyonuna yol açtığı için yetişkin sineklerin sosyal işlevselliği açısından kritik öneme sahiptir [68]. Bu dönemde izole edilen sinekler yaşamın ilerleyen süreçlerinde uyku süresinde azalma veya uyku bölünmeleri, aşırı besin alımı, hücresel strese artış, yaşam süresinin kısalması ve saldırganlık gibi davranışlar sergilemektedirler [68]. Oluşan yetişkin bireylerin ortalama yaşam süresi 40 ila 50 gün arasında değişmektedir [11].

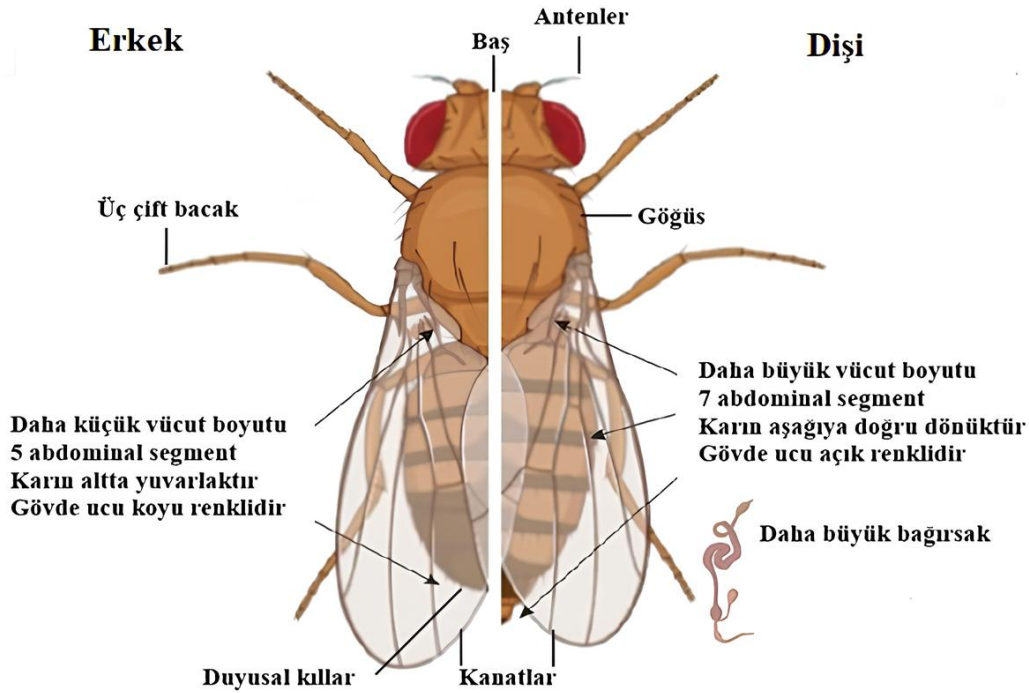


Şekil 1. *Drosophila melanogaster*'in Yaşam Döngüsü [13].

Karakteristik böcek morfolojisine göre, yetişkin meyve sineklerinin gövdesi 3 ana bölümden oluşur: baş, göğüs ve karın (Şekil 2). Kafada gözler ile birlikte gıdanın alınması ve tadının algılanabilmesi için uzatılıp geri çekilebilen tat alma organını temsil eden yiyeceğin bağırsağına ulaşmasını sağlayan hortum benzeri yapılar bulunur. Göğüs üç bölüme ayrılmıştır: bir çift bacaklı

prothorax (anterior), bir çift bacak ve bir çift kanattan oluşan mesothorax (middle), bir çift bacak ve bir çift yulardan (modifiye kanatlar) oluşan metathorax (posterior). Dişiler ve erkekler morfolojik özelliklerle kolayca ayırt edilebilir, özellikle dişiler genellikle daha büyüktür ve sivri uçlu bir karına sahiptir, erkekler ise arka segmentte bir epandrium (erkek dış genital organı) ile siyah pigmentasyonlu yuvarlak bir karna sahiptirler

[14]. Yetişkin sinekler çok karmaşık organizmalardır. Memeli beyni, periferik sinir sistemi, kalbi, akciğerlere benzer trakea sistemi, böbreklere benzer malpighian tübülleri, bağırsakları, adipoz doku ve karaciğerin fonksiyonlarını birleştiren oenositli yağ gövdesi ve üreme sisteminin eşdeğer işlevlerini yerine getiren yapılara sahiptirler [15].



Şekil 2. *Drosophila melanogaster*'in Morfolojisi [16].

Drosophila melanogaster Bağırsak Yapısı ve Mikrobiyota

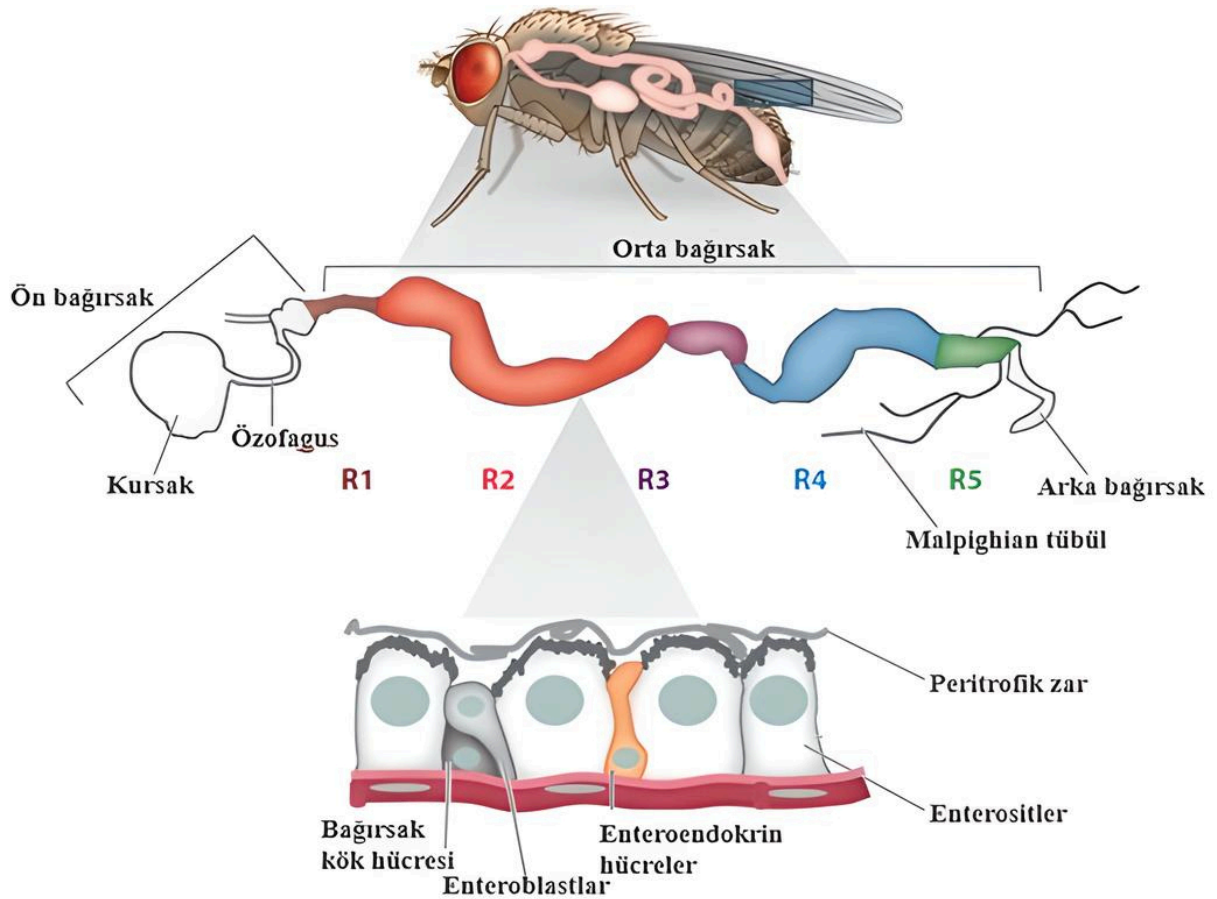
Drosophila bağırsağı visseral kaslar, sinirler ve trakea ile çevrili basit bir epitelden oluşan ön bağırsak, orta bağırsak ve arka bağırsak olmak üzere üç ana bölüme ayrılmıştır [17,18,19]. Ön bağırsak ektodermal kökenliken, orta bağırsak ve arka bağırsak diğer tüm organlar gibi endodermal kökenlidir [20]. *Drosophila* bağırsak epiteli birbirinden farklı 4 hücre tipinden oluşmaktadır: enterositler, enteroendokrin hücreler, bağırsak kök hücreleri ve olgunlaşmamış progenitör enteroblastlar (Şekil 3). Enteroblastlar, henüz tam olarak tanımlanamayan ve çeşitli farklılaşma sinyalleri sayesinde enterositlere veya enteroendokrin hücrelere dönüşebilen hücrelerdir [21]. Enterositler ise bağırsağın farklı bölümlerinde morfoloji ve işlev açısından önemli derecede farklılık gösterirler. Enterositler sindirim enzimleri salgılar besinlerin emilim ve taşınmasında rol alırlar. Enteroendokrin hücreler ise bağırsak motilitesini düzenleyen hormonları salgılar ayrıca dış ortamdan gelen biyotik ve abiyotik uyarılara karşı da işlev görürler [22]. Ayrıca enteroendokrin hücreler, *Drosophila*'nın doğuştan gelen bağırsıklık sistemi için ilk antimikrobiyal

savunmayı sağlarken organizmanın beslenme durumunu iletmek ve memeli ortologlarına benzer şekilde besin mevcudiyetine yanıt olarak davranışı ve metabolizmayı modüle etmek için bağırsak-beyin eksenini gibi organlar arası iletişimi kontrol eden hormonal sinyaller ve peptitler de üretirler [18, 22]. Bağırsak epiteli dış ortamla sürekli temas halindedir, ancak bağırsak kök hücreleri kısmen izole edilmiştir yani hem *Drosophila*'da hem de insanlarda dış çevreden korunmaktadır [23]. İnsan ince bağırsağında bulunan kript benzeri niş yapılar ve salgılanan mukus tabakası gibi karbonhidrat açısından zengin bariyerler, bağırsak kök hücrelerini çeşitli dış uyarılardan izole eden koruyucu bir ortam sağlar. Mukus, antimikrobiyal rollere sahip fiziksel bir bariyerdir ve bakteri önleyici özelliği olan müsin glikoproteinlerinden oluşur [24]. *Drosophila*'da bağırsak epitelinde mukus tabakasına ek olarak kitin ve proteinlerden oluşan yarı geçirgen bir yapı, peritrofik zar da bulunmaktadır [18]. Peritrofik zar bağırsakta görülen bakteriyel enfeksiyonlara karşı koruyucu rol oynar. Bu bariyerler sayesinde bağırsak epitelini hem bakterilerden hem de bağırsak lümeninde bulunan toksik bileşiklerden koruyarak insan mukus tabakasına benzer özellik gösterirler [18]. Ancak *Drosophila*'da insanlardan farklı

olarak dendritik hücreler, makrofajlar, eozinofiller, mast hücreleri ve adaptif bağışıklık hücreleri gibi doğuştan gelen bağışıklık hücrelerini içeren lamina propria bağ dokusu bulunmamaktadır [25]. Peritrofik zar ve lamina propria mikrobiyal bileşenlerin veya metabolitlerin enterositlere temas etmeden ve zarar vermeden geçmesine seçici olarak izin veren yapılardır [21]. *Drosophila* adaptif bağışıklıktan ve doğuştan gelen bağışıklık hücrelerinden yoksun olduğu için konağın bağışıklık sistemi bu açıdan *Drosophila* modelinde incelenememektedir [17].

Drosophila'nın bağırsak yapısı ve işlevleri insan bağırsağıyla benzerlik göstermektedir. Yetişkin sineklerde ön bağırsak yiyeceğin yutulduğu ve enzimler tarafından işlendiği ağız boşluğu, yemek borusu ve gıdanın depolanması, karıştırılması ve detoksifikasyonunu sağlayan kursaktan oluşur [14,18]. Ön bağırsak, gıda geçişini kontrol eden bir sfinkter olan kardiy ile orta bağırsakla bağlantılıdır [19]. Gıdanın sindirim enzimleri (karbohidrazlar, proteazlar ve lipazlar gibi) tarafından sindirilmesi ve absorpsiyonu orta bağırsakta gerçekleşir. Bu nedenle orta bağırsak,

metabolik olarak en aktif, sindirimin merkezi bölgesidir [21]. Geçmişte ön, orta ve arka olmak üzere 3 bölüme ayrılan orta bağırsak günümüzde farklı metabolik ve sindirim işlevleri olan 6 anatomik bölgeye (R0-R5) ayrılmıştır (Şekil 3) [18]. Arka bağırsak bölümünde ise omurgalılarda bulunan böbreklere benzer işlevi olan malpighian tübüllerinden salınan su, iyonlar ve besinlerin emilimi düzenlenmektedir [26]. *Drosophila*'nın orta bağırsak bölümü insan ince bağırsağına benzerken arka bağırsak insan kolonuna benzerlik göstermektedir [21]. Spesifik olarak memelilerde sindirim, proteinlerin aminoasitlere parçalanmasını, mineral ve metallerin absorpsiyonunu kolaylaştıran asidik şartlarda gerçekleşirken sineklerde memelilerden farklı olarak, nötr veya bazik şartlarda sindirim gerçekleşir [18]. *Drosophila* bağırsağı esas olarak nötr veya hafif alkalidir, ancak arka bağırsakta olduğu gibi bazı kısımlar güçlü bir şekilde asidik özellik gösterir. Bu nedenle bağırsak boyunca mikrobiyal çeşitlilik, dağılım ve yoğunluk değişkenlik göstermektedir [27].



Şekil 3. *Drosophila melanogaster*'in bağırsak yapısı ve hücre çeşitleri. R1-5: Bölge 1-5 [17].

D. melanogaster'in bağırsağı, *Lactobacillus plantarum*, *Acetobacter pomorum* ve *Lactobacillus brevis* dahil olmak üzere 3 ila 30 tür arasında değişen sınırlı sayıda kommensal bağırsak bakterisine ev sahipliği yapar [28]. İnsan gastrointestinal sisteminde ise, 500'den fazla farklı bakteri türü dahil olmak üzere çok sayıda mikroorganizma mevcuttur [14]. Sağlıklı insanların mikrobiyotası *Bacteroidetes* (*Bacteroides spp.*), *Firmicutes* (*Lactobacillus spp.*), *Actinobacteria* (*Bifidobacterium spp.*), *Proteobacteria* (*Escherichia*, *Helicobacter*) ve *Verrucomicrobia* (*Akkermansia spp.*) olmak üzere beş filumdan oluşur [29]. Bu mikrobiyota çeşitliliği çocukluk çağı ve ileri yaş dönemlerinde yetişkinlik dönemine göre daha değişkendir [30]. *Drosophila* bağırsağı ise insan mikrobiyotasına kıyasla daha az çeşitlilik göstermektedir. Sineklerin mikrobiyal çeşitliliğindeki bu basitliğin sebebi tam olarak belirlenememekle birlikte; memelilerde daha yüksek mikrobiyal çeşitlilik gıda çeşidine ve adaptif bağışıklık sisteminin varlığına bağlanmaktadır [2]. Bağırsak oksijen konsantrasyonu veya pH'daki değişiklikler, genotip, gelişim ve yaş, fizyoloji ve bağışıklık yanıtı, coğrafi konum, rahatsızlıklar ve çevresel şartlar gibi konakçı faktörleri de dahil olmak üzere çeşitli faktörler de *Drosophila* bağırsağında mikrobiyota çeşitliliğinin azlığını açıklayabilir [31]. Örneğin mısır unu ve soya unu gibi kompleks polisakkaritlerle beslenen laboratuvarda yetiştirilen sineklerin mikrobiyotasında yüksek miktarda *Lactobacillus* (*Lactobacillus* sınıfından *Firmicutes*) bulunurken, şeker açısından zengin diyetlerle beslenenlerde *Acetobacteraceae* (*α-Proteobacteria*) bulunur. Özellikle baskın olan türler ise *Acetobacter* ve

Gluconobacter'dir [26]. Bazı sineklerde ise *Acetobacteraceae* ve *Lactobacillus*'u yok edecek kadar *α-Proteobacteria* veya *Enterococcus* bulunmaktadır. Doğal ortamında yetişen *Drosophila* ile laboratuvar şartlarında yetiştirilen *Drosophila* mikrobiyotası arasında farklılıklar bulunur. Doğal ortamda yetişen sineklerin bağırsağı *Acetobacteraceae*, *Lactobacillales* ve *α-Proteobacteria* bakımından daha fazla çeşitlilik göstermektedir [32]. Ek olarak doğal *Drosophila* popülasyonlarında *Lactobacillus* miktarı düşük veya hiç tespit edilmemişken, yalnızca *Lactobacillus*'u temsil eden *Leuconostoc*, *Enterococcus* ve *Weissella* bol miktarda bulunmuştur [33]. Henüz yeterince çalışma olmasa da, çürümüş meyvelerle beslenen *Drosophila*'ların bağırsak mikrobiyotasında *Hanseniaspora*, *Pichia* ve *Candida* gibi mayalarda tespit edilmiştir [26].

***Drosophila melanogaster*' de Ömür Uzunluğu ve Beslenme**

D. melanogaster'in ömür uzunluğunu etkileyen parametreler arasında beslenme önemli bir yer almaktadır. *Drosophila*'da obeziteye neden olan birçok etmen sineğin ömür uzunluğu üzerinde etki göstermektedir. *D. melanogaster*'in geniş bir diyet kompozisyonu olduğu bilinmektedir [34]. Diyet kısıtlaması, yaşam süresini uzatmak için bilinen en ünlü, evrimsel olarak korunmuş bir yöntemdir [35]. Yüksek şekerli ve yüksek yağlı diyetlerde kullanılan şeker ve yağ çeşitleri de yaşam süresi üzerinde değişken özellikler göstermektedir (Tablo 2).

Tablo 2. Obeziteye Neden Olan Etkenlerin *Drosophila*'nın Yaşam Süresine Etkisi [36].

Obezite etkeni	İçerik	Yağ	Glisemi	Ömür	Referans
Yüksek Şekerli Diyet	Sakaro	↑	Ø	↑	37
	Glikoz	↑	↑	↑	38
	Sakaro	↑	↑	↓	39
	Sakaro	↑	Ø	↓	40
Yüksek Yağlı Diyet	Domuz yağı	↑	↑	↓	41
	Hindistan cevizi yağı	↑	Ø	↓	42
Diyet kısıtlaması	Aminoasit kısıtlaması	↑	-	↑	43
	Maya kısıtlaması	↑	Ø	↑	44

↑: Artış, ↓: Azalış, -: Değişiklik yok, Ø: Belirlenemedi

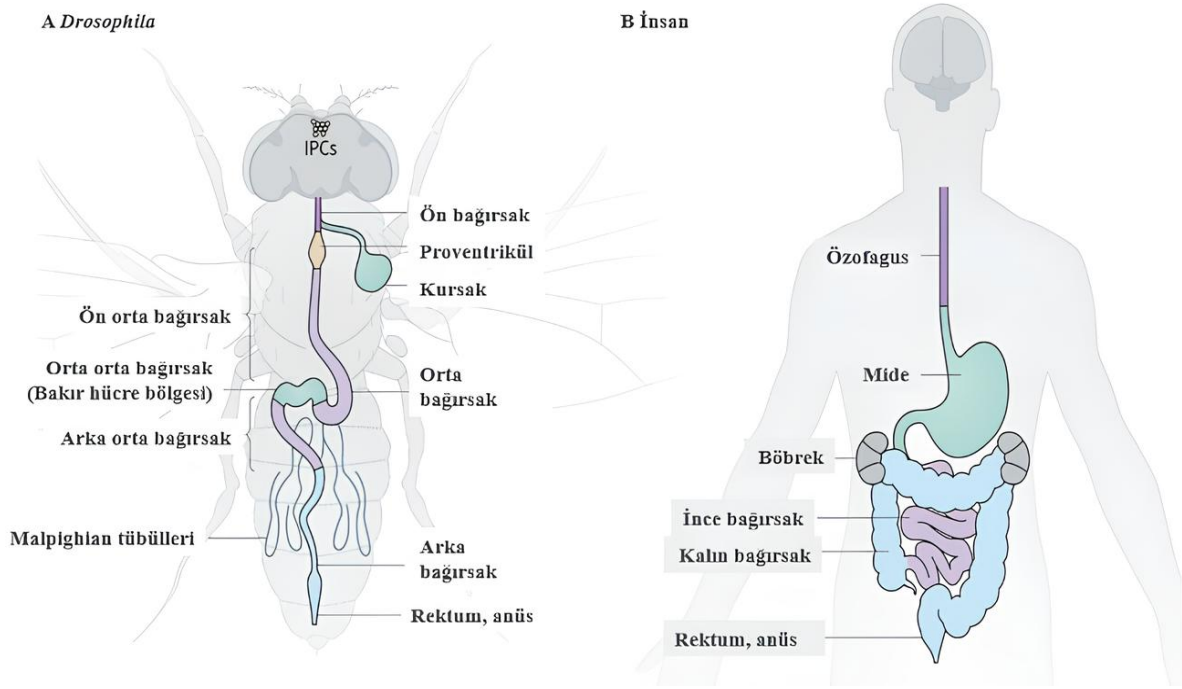
***Drosophila melanogaster*'in İnsan Hastalıklarının Modellemesinde Kullanımı**

Karmaşık yapı gösteren insan hastalık mekanizmalarını modelleyebilmek için uygun organizmayı seçmek oldukça zordur ve seçmeden önce hastalık patolojisi iyi değerlendirilmelidir. *D.melanogaster*' in omurgasız bir canlı olması, açık dolaşım sisteminin olması, kan, kemik ve kıkırdak

gibi dokularının olmaması ve insanlarda var olan organların bazılarını bulundurmaması bu canlının insan çalışmaları için ne kadar uygun olabileceğini düşündürmektedir [9]. Ancak gen ekspresyonu, sinaptogenez, hücre sisteminin işleyişi, hücre içi protein akışı ve hücrelerin ölümü gibi insana benzer mekanizmalar bulundurması ve küçük boyutlu olması, in vitro şartlarda kısa zamanda, kolay ve düşük maliyetle çoğaltılması, genomu üzerinde

değişiklik yapılabilmesi model olarak tercih edilmesini sağlamaktadır [5, 49]. 2000’li yıllarda tamamlanan çalışmalar sonucunda elde edilen bilgilere göre insanlarda var olan genlerin yüzde 60’ının ve insanlar üzerinde hastalık yapan genlerin de yüzde 70-75’inin *D. melanogaster*’de fonksiyonel ortologları olduğu tahmin edilmektedir [10, 49]. İki genom arasında gözlenen bu benzerlik sayesinde *D. melanogaster* model organizma olarak

kullanılabilmekte böylece insan biyolojisi, hastalık süreçleri, hastalıkların genetik ve hücrel mekanizmaları araştırılabilmektedir. *D. melanogaster* aracılığıyla araştırma teknikleri önce sinek üzerinde açıklanıp daha sonra memeli sistemlerinde dönüştürülmektedir. Bu nedenle insan hastalıklarının aydınlatılmasında *D. melanogaster* büyük önem arz etmektedir [10].



Şekil 4. Yetişkin *Drosophila melanogaster* ve İnsanlar Arasındaki Gastrointestinal Sistem Anatomisinin Karşılaştırılması. IPCs: İnsülin Üreten Hücreler [45].

Drosophila son yıllarda gıda ve beslenme çalışmaları için çok yönlü ve değerli bir model organizma olarak görülmektedir [49]. Memelilerle göstermiş olduğu birçok benzerlik beslenme müdahale çalışmalarında kullanım kolaylığı sunmaktadır [45,49]. *Drosophila*’nın vücut yapısı memelilere kıyasla daha basit olmasına rağmen kalp, akciğer, böbrek ve bağırsak gibi organ sistemlerini bulundurmaktadır [49]. *Drosophila*’nın memeli gastrointestinal sistemiyle göstermiş olduğu yapısal (şekil 4) ve fonksiyonel benzerlik sayesinde de *Drosophila* gastrointestinal sisteminde yapılan çalışmalarla bağırsak homeostazına, rejenerasyonuna ve tümör gelişimine neden olan, konak bağışıklığının, metabolizmasının ve davranışlarının düzenlenmesine aracılık eden çoklu hücrel ve moleküler süreçlere ışık tutulmuştur [45]. *Drosophila*, nörolojik hastalıklar, kardiyovasküler hastalıklar, diyabet ve obezite gibi metabolik bozukluklar olmak üzere birçok farklı patolojik durumun genetik ve biyolojik çalışmaları için iyi bir model oluşturmaktadır (Tablo 3) [46].

Beslenme çalışmaları, bireylerde veya genel popülasyonda tüketilen besinlerin sağlık ve hastalık arasındaki karmaşık etkileşimleri incelemek amacıyla yapılır. Diyetin bireyin sağlığı üzerindeki potansiyel etkisi ve beslenmenin yaşamın vazgeçilmez bir parçası olması göz önüne alındığında beslenme üzerine yapılan çalışmaların son derece önemli olması şaşırtıcı değildir [76]. Ancak beslenme çalışmalarını insanlar üzerinde yürütmek kolay değildir. Bu çalışmalar, katılımcıların tükettiği besinleri kontrol etmek için tüm ana ve ara öğünleri, atıştırma ve içecekleri sağlamalıdır. Bu nedenle pahalıdır ve katılımcılara yiyecek hazırlamak ve sağlamak için özel tesislere ihtiyaç vardır. Çalışmalara katılan katılımcıların sürece adapte olmaları ve yaşamlarını ona göre şekillendirmeleri gerekir. Bu durumda zaman ilerledikçe katılımcıların uyumsuzluk riskini artırabilmekte ve bu nedenle çalışma bulguları ciddi anlamda etkilenebilmektedir. Katılımcıların uyum derecesini kesin olarak belirlemek zordur çünkü kendilerine verilen yiyecekler dışında başka yiyecekler yiyebilirler veya yiyeceklerini

başkalarıyla paylaşabilirler. Bu çalışmalar hem araştırmacılar hem de katılımcılar için yoğun emek gerektirir. [76]. Tüm bu nedenlere ek olarak besin ve organizma etkileşimlerinin karmaşıklığı nedeniyle fizyolojik ve patolojik süreçleri anlamak için model organizmalar üzerinde gerçekleştirilen beslenme çalışmaları önem arz etmektedir. *Drosophila melanogaster*’ de birçok avantajı sayesinde beslenme çalışmalarında sıklıkla tercih edilen model organizmalardan biri olmuştur. *Drosophila* diyetleri genellikle maya, mısır, sakaroz ve agardan oluşmaktadır [58]. Ancak modellenen hastalığa göre çeşitli diyet modifiyeleri uygulanabilmektedir. Örneğin obezite veya diyabet fenotiplerinde yüksek yağlı ve/veya yüksek şekerli diyetler uygulanmaktadır [51]. Diyet kısıtlaması gereken modellerde ise protein ve/veya aminoasit

kısıtlaması yapılarak çalışmalar gerçekleştirilir [58]. Hastalık fenotipleyen *Drosophila* modelleri, diyet-hastalık etkileşimlerini belirlemek için farklı diyet rejimlerine tabi tutulabilir. Diyet bileşimindeki farklılıklar *Drosophila*’ da sağlık ve yaşam süresinde çeşitli farklılıklar gösterir [49]. Beslenme perspektifinden bakıldığında, besin alımı, besin seçimi, vücut kompozisyonu, enerji harcaması ve mikrobiyota kompozisyonu hastalık fenotipi için önemli göstergelerdir [58]. Bu göstergeler, deneysel ortama bağlı olarak lokomotor aktivite ve uyku, biliş, stres ve enfeksiyon yanıtı, yaşam süresi ve doğurganlık gibi diğer işlevsel testlerle de tanımlanabilmektedir. Bu tür çalışmaların nihai amacı, hastalık sürecini hafifleten veya hızlandıran besin maddelerinin veya diyet rejimlerinin belirlenmesidir [58].

Tablo 3. Beslenme kaynaklı Çeşitli Hastalıkların *Drosophila* Modeli Üzerinde İncelenmesi [47,48].

Modellenen Hastalıklar	Modelde Uygulanan Deneysel Yöntem	Elde Edilen Sonuçlar	Referanslar
Metabolik Hastalıklar			
İnsülin eksikliği (T1D modelleri):	İnsülin üreten hücrelerin kısmi ablasyonu	Hiperglisemi, korunmuş insülin duyarlılığı, dolaşımdaki lipit seviyelerinde artış, korunmuş insülin duyarlılığı, yaşam süresinde artış ve doğurganlıkta azalma	[47]
	İnsülin üreten hücrelerin tam ablasyonu	Gelişimsel gecikme, küçük vücut boyutu, hiperglisemi ve korunmuş insülin duyarlılığı	[47]
	Ilp2-3 ve 5'in genetik bozulması	Gelişimsel gecikme, küçük vücut boyutu, hiperglisemi, korunmuş insülin duyarlılığı, doğurganlıkta azalma ve yaşam süresinde artış	[50]
	Ilp1-4 ve 5'in genetik bozulması		
İnsülin direnci (T2D modelleri):	İnsülin reseptörü heterozigot mutantları		[52]
	Yağ gövdesinde insülin reseptörünün yıkılması	Yüksek ILP sekresyonu, normal karbonhidrat seviyeleri	
	YŞD	Hiperglisemi, insülin direnci, gelişimsel gecikme, küçük vücut boyutu, yaşam süresinde kısalma, ILP'lerde erken yükselme ardından azalma	[53]
		Kan glikoz ve trigliserit seviyelerinde artış	[54]
		Glikoz ve trigliserid seviyelerinde artış, yaşam süresinde kısalma	[55]
	YYD (hindistan cevizi yağı)	ILP'lerde erken yükselme, hiperglisemi, insülin direnci,	[56]
	YYD (domuz yağı)	İnsülin direnci, hiperglisemi ve yaşam süresinde kısalma	[57]
Hipoglisemi modelleri:	CC hücre ablasyonu		[47]
	AKH'nin genetik bozulması	Obezite, hipoglisemi ve açlık direnci	[59,60]

	Lst'nin genetik bozulması	Yüksek ILP sekresyonu ve hipoglisemi	[61]
Obezite	YYD (hindistan cevizi yağı)	Yağ birikimi, insülin direnci, hiperglisemi, hiperinsülinemi,	[56]
	YYD (Hurma yağı-hindistan cevizi yağı)	Vücut trigliserit ve glikoz seviyelerinde artış, yaşam süresinde azalma, soğuğa ve anoksiye karşı toleransta azalma	[36]
	YYD (domuz yağı)	Yağ birikimi	[57]
	YŞD (sakaroz)	Yağ birikimi, insülin direnci, hiperglisemi, hiperinsülinemi, gelişme geriliği	[53]
		Yağ birikimi, insülin direnci, hiperglisemi, yaşam süresinde kısılma, doğurganlıkta azalma, kardiyomiyopati, böbrek fonksiyon bozukluğu, dehidratasyon	[48, 62,63]
Kalp Hastalıkları			
Kalp Fonksiyonları	YYD (Hindistan cevizi yağı)	Kardiyak lipit birikimi, azalmış kardiyak kontraktilite ve kardiyomiyopati, kardiyak toksisite	[56]
	YŞD (Sakaroz)	Kardiyak aritmi, yaşam süresinde kısılma, kardiyak işlev bozukluğu	[53]
Böbrek Hastalıkları			
Kronik Böbrek Yetmezliği	YYD	Böbrekte lipit birikimi, nefrosit boyutlarında artış, mitokondri ve endoplazmik retikulum hacimlerinde azalma, albuminin nefrosit birikiminde azalma	[64]
Renal Tübüler Disfonksiyonu	YŞD (sakaroz)	Kronik hiperglisemi nedeniyle malpighian tübüllerde fizyolojik ve anatomik deformasyon	[65]
Podosit Disfonksiyonu	YŞD (sükroz)	Nefrosit kaybı, nefrosit fonksiyonunda azalma	[62]
Böbrek Taşı	YŞD (sükroz)	Ürik asit birikimi, tübül taşlarının gelişimi ve tübül disfonksiyonu	[63]
Kanser			
Tümör Gelişimi	Diyet kısıtlaması (protein, şeker)	Tümör baskılayıcı gen <i>PTEN</i> homologunda işlev kaybı, organ büyümesinde azalma (mutant hücreler enerjilerini böyle sağlıyor)	[66]
	HSD (sükroz)	Tümör gelişimi ve metastaz	[67]
T1D: Tip 1 Diyabet, T2D: Tip 2 Diyabet, YŞD: Yüksek Şekerli Diyet, YYD: Yüksek Yağlı Diyet, ILP: İnsülin Benzeri Peptit, CC: Korporo Kardiak, AKH: Adiponektin Hormon, Lst: Limostatin, AkhR: AKH reseptörünü kodlayan gen			

Drosophila, biyolojik ve tıbbi araştırma incelemeleri için güçlü bir model oluşturmakla birlikte son yıllarda çeşitli kimyasalların güvenlik ve risk değerlendirmesinde toksikolojik çalışmalarda da yaygın olarak kullanılan bir model haline gelmiştir [69]. Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde konuyla ilgili farklı çalışmalar görülmüş olup aşağıda sunulmuştur;

Kadmiyum, doğal kaynaklar ve endüstriyel faaliyetler sonucu çevreye yayılan ağır metallerden biridir. Kadmiyuma maruziyet nedeniyle oluşan hasarın belirlendiği bir çalışmada dişi sineklerde, toksisite grubunda kontrol grubuna kıyasla *Drosophila* ömründe kısalma, oksidatif stres düzeyinde ve antioksidan savunma sisteminin bozulması sonucu lipid peroksidasyonunda artış gözlemlenmiştir [70].

Klorpirifos, su ve besinlerde yaygın olarak bulunan pestisitlerden biridir. İnsan sağlığı üzerinde çeşitli zararlı etkileri vardır. Mitokondriyal işlev bozukluğu sonucu meydana gelen nörodejeneratif hastalıklarda klorpirifosun glutatyon, reaktif oksijen türleri ve mitokondriyal işlev üzerindeki etkisinin incelendiği bir çalışmada sineklerde reaktif oksijen türlerinde artış, indirgenmiş glutatyon seviyesinde azalma ve oksitlenmiş glutatyon formunda artış, mitokondriyal aktivitelerde inhibasyon ve sineklerde ölüm meydana gelmiştir [71]. Klorpirifosun hareket üzerindeki etkilerinin incelendiği bir başka çalışmada ise diyetinde klorpirifos bulunan sineklerde artan stres nedeniyle antioksidan enzim seviyeleri azalmış, hareket yetenekleri hızlanmış ancak düzensiz hale gelerek ölüm oranında artışa sebep olmuştur [72].

Gıda katkı maddesi olarak kullanılan E171 TiO₂ (Titanyum dioksit)'e maruz bırakılan *Drosophila* modellerinde hayatta kalma, doğurganlık, pupalaşma süreci ve antioksidan enzim aktivitesi gibi parametrelerin izlendiği bir çalışmada sineklerin hayatta kalma ve doğurganlık durumları etkilenmezken pupalaşma sürecinde artış ve antioksidan enzim olan katalaz aktivitesinde azalma meydana gelmiştir [73].

Tıbbi ürün ve cihazlarda, gıda depolama malzemelerinde, kozmetiklerde ve endüstriyel ürünlerde yaygın olarak kullanılan gümüş nanopartiküllerine (AgNP) maruz kalan *Drosophila* modellerinde pigmentasyon kusurları ve hareket yeteneklerinde azalmalar meydana gelmiştir [74]. Antimikrobiyal ajan olarak kullanılan gümüş nanopartiküllerine maruz kalan *Drosophila* modellerinin kullanıldığı başka bir çalışmada ise doğurganlıkta azalma, gelişim aşamalarında gecikme, ağırlık kaybı, DNA hasarı ve oksidatif stres düzeyinde artış meydana gelmiştir [75].

SONUÇ

D. melanogaster, biyolojik çalışmalarda en iyi karakterize edilen model organizmalardan biri olması nedeniyle beslenme ve hastalık modellemelerinde çok uygun bir model sistem olarak kullanılabilir. İnsanlarda sağlık ve hastalıkların temelinde yer alan temel biyolojik süreçler *Drosophila*'da benzerlik göstermektedir. Ve insan üzerinde hastalık yapan genlerin büyük bir kısmı

Drosophila'da fonksiyonel ortolog bulundurmaktadır. Ek olarak *Drosophila*'nın etik sorun oluşturmaması, bakım maliyetlerinin az olması, kısa yaşam döngüsü, endemik olmaması çalışmalarda büyük avantajlar sağlamaktadır. Bu nedenle temel biyolojik mekanizmaları çözebilmek için *Drosophila* güçlü bir modeldir. Gelişen teknoloji ile insan hastalıkları üzerinde yapılacak çalışmalarla *Drosophila* modelinin kullanımı daha da önem kazanacaktır.

KAYNAKÇA

- [1] Polat M., Şahin F. İ., Terzi Y. K. Model Organisms and Systems in Life Sciences. Cumhuriyet Medical Journal, 44(1), 1-8, 2022.
- [2] Kamareddine L., Najjar H., Sohail M. U., Abdulkader H., Al-Asmakh M. The microbiota and gut-related disorders: insights from animal models. Cells, 9(11), 2401, 2020.
- [3] Giong H.-K., Subramanian M., Yu K., Lee J.-S. Non-Rodent Genetic Animal Models for Studying Tauopathy: Review of *Drosophila*, Zebrafish, and *C. elegans* Models. International Journal of Molecular Sciences, 22(16), 8465, 2021.
- [4] Bertotto L. B., Catron T. R., Tal T. Exploring interactions between xenobiotics, microbiota, and neurotoxicity in zebrafish. Neurotoxicology, 76, 235-244, 2020.
- [5] Hazır C., Bora G., Yurter H. E. Nörodejeneratif Hastalık Araştırmalarında *Drosophila melanogaster* Modeli. Uludağ Üniversitesi Tıp Fakültesi Dergisi, 46(2), 237-245, 2021.
- [6] Kayhan F., Kaymak G., Duruel H. E. E., Kızılkaya Ş. T. Biyolojik çalışmalarda zebra balığının (*Danio rerio* Hamilton, 1822) kullanılması ve önemi. Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi, 7(2), 38-45, 2018.
- [7] Hales K. G., Korey C. A., Larracuente A. M., Roberts D. M. Genetics on the fly: a primer on the *Drosophila* model system. Genetics, 201(3), 815-842, 2015.
- [8] Yamaguchi M. & Yoshida H. *Drosophila* as a model organism. *Drosophila* models for human diseases, 1-10, 2018.
- [9] Verheyen E. M. The power of *Drosophila* in modeling human disease mechanisms. Disease Models & Mechanisms, 15(3), dmm049549, 2022.
- [10] Wangler M. F., Yamamoto S., Chao H. T., Posey J. E., Westerfield M., Postlethwait J. & Bellen H. J. Model organisms facilitate rare disease diagnosis and therapeutic research. Genetics, 207(1), 9-27, 2017.
- [11] Cabirolu S. Yağ, şeker ve protein ağırlıklı beslenmenin *Drosophila melanogaster*'de genotoksik potansiyele etkisi.[Effect of fat, sugar and protein-headed diet on genotoxic potential in *Drosophila melanogaster*] (Tez Numarası: 743324) [Yüksek lisans tezi, Akdeniz Üniversitesi]. Yüksek Öğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi, 2022.
- [12] Beira J. V. & Paro R. The legacy of *Drosophila* imaginal discs. Chromosoma, 125, 573-592, 2016.
- [13] Flatt T. Life-history evolution and the genetics of fitness components in *Drosophila melanogaster*. Genetics, 214(1), 3-48, 2020.
- [14] Baenas N., Wagner A. E. *Drosophila melanogaster* as an alternative model organism in nutrigenomics. Genes & nutrition, 14, 1-11, 2019.
- [15] Ugur B., Chen K., Bellen H. J. *Drosophila* tools and assays for the study of human diseases. Disease models & mechanisms, 9(3), 235-244, 2016.
- [16] Lushchak O., Strilbytska O., Storey K. B. Gender-specific effects of pro-longevity interventions in *Drosophila*.

- Mechanisms of Ageing and Development, 209, 111754, 2023.
- [17] Lemaitre B., Miguel-Aliaga I. The digestive tract of *Drosophila melanogaster*. Annual review of genetics, 47, 377-404, 2013.
 - [18] Miguel-Aliaga I., Jasper H., Lemaitre B. Anatomy and physiology of the digestive tract of *Drosophila melanogaster*. Genetics, 210(2), 357-396, 2018.
 - [19] Buchon N., Osman D. All for one and one for all: regionalization of the *Drosophila* intestine. Insect biochemistry and molecular biology, 67, 2-8, 2015.
 - [20] Martín-Durán J. M., Hejnal A. The study of *Priapulus caudatus* reveals conserved molecular patterning underlying different gut morphogenesis in the Ecdysozoa. BMC biology, 13(1), 1-20, 2015.
 - [21] Capo F., Wilson A., Di Cara F. The intestine of *Drosophila melanogaster*: an emerging versatile model system to study intestinal epithelial homeostasis and host-microbial interactions in humans. Microorganisms, 7(9), 336, 2019.
 - [22] Kopp Z. A., Jain U., Van Limbergen J., Stadnyk A. W. Do antimicrobial peptides and complement collaborate in the intestinal mucosa?. Frontiers in immunology, 6, 17, 2015.
 - [23] Barker N. Adult intestinal stem cells: critical drivers of epithelial homeostasis and regeneration. Nature reviews Molecular cell biology, 15(1), 19-33, 2014.
 - [24] Barbara G., Barbaro M. R., Fuschi D., Palombo M., Falangone F., Cremon C. & Stanghellini V. Inflammatory and microbiota-related regulation of the intestinal epithelial barrier. Frontiers in nutrition, 8, 718356, 2021.
 - [25] Mowat A. M., Agace W. W. Regional specialization within the intestinal immune system. Nature Reviews Immunology, 14(10), 667-685, 2014.
 - [26] Douglas A. E. The *Drosophila* model for microbiome research. Lab animal, 47(6), 157-164, 2018.
 - [27] Overend G., Luo Y., Henderson L., Douglas A. E., Davies S. A., Dow J. A. Molecular mechanism and functional significance of acid generation in the *Drosophila* midgut. Scientific reports, 6(1), 1-11, 2016.
 - [28] Newell P. D., Douglas A. E. Interspecies interactions determine the impact of the gut microbiota on nutrient allocation in *Drosophila melanogaster*. Applied and environmental microbiology, 80(2), 788-796, 2014.
 - [29] Peterson C. T., Sharma V., Elmen L., Peterson S. N. Immune homeostasis, dysbiosis and therapeutic modulation of the gut microbiota. Clinical & Experimental Immunology, 179(3), 363-377, 2015.
 - [30] Cuevas-Sierra A., Ramos-Lopez O., Riezu-Boj J. I., Milagro F. I., Martinez J. A. Diet, gut microbiota, and obesity: links with host genetics and epigenetics and potential applications. Advances in Nutrition, 10, 17-30, 2019.
 - [31] Clark R. I., Salazar A., Yamada R., Fitz-Gibbon S., Morselli M., Alcaraz J., Rana A., Rera M., Pellegrini M., Ja W. W., Walker D. W. Distinct shifts in microbiota composition during *Drosophila* aging impair intestinal function and drive mortality. Cell reports, 12(10), 1656-1667, 2015.
 - [32] Adair K. L., Wilson M., Bost A., Douglas A. E. Microbial community assembly in wild populations of the fruit fly *Drosophila melanogaster*. The ISME journal, 12(4), 959-972, 2018.
 - [33] Pais I. S., Valente R. S., Sporniak M., Teixeira L. *Drosophila melanogaster* establishes a species-specific mutualistic interaction with stable gut-colonizing bacteria. PLoS biology, 16(7), e2005710, 2018.
 - [34] Musselman L. P., & Kühnlein R. P. *Drosophila* as a model to study obesity and metabolic disease. Journal of Experimental Biology, 221(Suppl_1), jeb163881, 2018.
 - [35] He Y., Jasper H. Studying aging in *Drosophila*. Methods, 68(1), 129-133, 2014.
 - [36] Gálíková M., Klepsatel P. Obesity and aging in the *Drosophila* model. International journal of molecular sciences, 19(7), 1896, 2018.
 - [37] Reis T. Effects of Synthetic Diets Enriched in Specific Nutrients on *Drosophila* Development, Body Fat, and Lifespan. PLoS ONE, 11, e0146758, 2016.
 - [38] Galenza A., Hutchinson J., Campbell S.D., Hazes B., Foley E. Glucose modulates *Drosophila* longevity and immunity independent of the microbiota. Biol. 5, 165–173, 2016.
 - [39] Na J., Sweetwyne M.T., Park A.S., Susztak K., Cagan, R.L. Diet-Induced Podocyte Dysfunction in *Drosophila* and Mammals. Cell Rep. 12, 636–647, 2015.
 - [40] Eickelberg V., Lüersen K., Staats S. & Rimbach G. Phenotyping of *Drosophila melanogaster*—A nutritional perspective. Biomolecules, 12(2), 221., 2022.
 - [41] Woodcock K.J., Kierdorf K., Pouchelon C.A., Vivancos V., Dionne M.S., Geissmann F. Macrophage-derived upd3 cytokine causes impaired glucose homeostasis and reduced lifespan in *Drosophila* fed a lipid-rich diet. Immunity, 42, 133–144, 2015.
 - [42] Wen D.T., Zheng L., Yang F., Li H.Z., Chen J. Endurance exercise prevents high-fat-diet induced locomotor impairment, cardiac dysfunction, lifespan shortening, and dSir2 expression decline in aging *Drosophila*. Exp. Gerontol. 2018.
 - [43] Emran S., Yang M., He X., Zandveld J., Piper M.D. Target of rapamycin signalling mediates the lifespan-extending effects of dietary restriction by essential amino acid alteration. Aging, 6, 390–398, 2014.
 - [44] Katewa S.D., Demontis F., Kolipinski M., Hubbard A., Gill M.S., Perrimon N., Melov S., Kapahi P. Intramyocellular fatty-acid metabolism plays a critical role in mediating responses to dietary restriction in *Drosophila melanogaster*. Cell Metab. 16, 97–103, 2012.
 - [45] Medina A., Bellec K., Polcowñuk S., Cordero J. B. Investigating local and systemic intestinal signalling in health and disease with *Drosophila*. Disease Models & Mechanisms, 15(3), dmm049332, 2022.
 - [46] Allocca M., Zola S., Bellosta P. The Fruit Fly, *Drosophila melanogaster*: modeling of human diseases (Part II). *Drosophila melanogaster*-Model for Recent Advances in Genetics and Therapeutics, 131-156, 2018.
 - [47] Alfa R. W., Kim S. K. Using *Drosophila* to discover mechanisms underlying type 2 diabetes. Disease models & mechanisms, 9(4), 365-376, 2016.
 - [48] Hirabayashi S. The interplay between obesity and cancer: A fly view. Disease models & mechanisms, 9(9), 917-926, 2016.
 - [49] Staats S, Lüersen K, Wagner AE, Rimbach G. *Drosophila melanogaster* as a versatile model organism in food and nutrition research. J Agric Food Chem. 66:3737–53, 2018.
 - [50] Grönke S., Clarke D.-F., Broughton S., Andrews T. D., Partridge L. Molecular evolution and functional characterization of *Drosophila* insulin-like peptides. PLoS Genet. 6, e1000857, 2010.
 - [51] Güneş E. Besinler ve beslenme çalışmalarında *Drosophila*. KSÜ Doğa Bilimleri Dergisi, 19(3), 236-243, 2016.
 - [52] Park S., Alfa R. W., Topper S. M., Kim G. E., Kockel L., Kim, S. K. A genetic strategy to measure circulating *Drosophila* insulin reveals genes regulating insulin production and secretion. PLoS Genet. 10, e1004555, 2014.
 - [53] Musselman L. P., Fink J. L., Narzinski K., Ramachandran P. V., Hathiramani S. S., Cagan R. L., Baranski T. J. A high-sugar diet produces obesity and insulin resistance in wild-type *Drosophila*. Dis. Model. Mech. 4,842-849, 2011.
 - [54] Loreto J. S., Ferreira S. A., Ardisson-Araújo D. M., Barbosa N. V. Human type 2 diabetes mellitus-associated transcriptional disturbances in a high-sugar diet long-term exposed *Drosophila melanogaster*. Comparative

- Biochemistry and Physiology Part D: Genomics and Proteomics, 39, 100866, 2021.
- [55] Beanas N, Wagner A.E. *Drosophila melanogaster* as a Model Organism for Obesity and Type-2 Diabetes Mellitus by Applying High-Sugar and High-Fat Diets. *Biomolecules*, 12(2),307, 2022.
- [56] Diop S. B., Birse R. T. & Bodmer R. High fat diet feeding and high throughput triacylglyceride assay in *Drosophila melanogaster*. *JoVE (Journal of Visualized Experiments)*, (127), e56029. 2017.
- [57] Woodcock K. J., Kierdorf K., Pouchelon C. A., Vivancos V., Dionne M. S., Geissmann F. Macrophage-derived upd3 cytokine causes impaired glucose homeostasis and reduced lifespan in *Drosophila* fed a lipid-rich diet. *Immunity* 42, 133-144, 2015.
- [58] Lüersen K., Röder T., & Rimbach G. *Drosophila melanogaster* in nutrition research-the importance of standardizing experimental diets. *Genes & nutrition*, 14, 3, 2019.
- [59] Gálíková M., Diesner M., Klepsatel P., Hehlert P., Xu Y., Bickmeyer I., Predel R., Kühnlein R. P. Energy homeostasis control in *Drosophila* Adipokinetic hormone mutants. *Genetics* 201, 665-683, 2015.
- [60] Sajwan S., Sidorov R., Stašková T., Žaloudíková A., Takasu Y., Kodrík D., Zurovec M. Targeted mutagenesis and functional analysis of adipokinetic hormone-encoding gene in *Drosophila*. *Insect biochemistry and molecular biology*, 61, 79-86, 2015.
- [61] Alfa R. W., Park S., Skelly K. R., Poffenberger G., Jain N., Gu X., Kockel L., Wang J., Liu Y., Powers A. C., Kim S. K. Suppression of insulin production and secretion by a decretin hormone. *Cell Metab.* 21, 323-333, 2015.
- [62] Na J., Sweetwyne M. T., Park A. S. D., Susztak K., Cagan R. L. Diet-induced podocyte dysfunction in *Drosophila* and mammals. *Cell reports*, 12(4), 636-647, 2015.
- [63] van Dam E., van Leeuwen L. A. G., Dos Santos E., James J., Best L., Lennicke C., Vincent A. J., Marinos G., Foley A., Buricova M., Mokochinski J. B., Kramer H. B., Lieb W., Laudes M., Franke A., Kaleta C., Cochemé H. M. Sugar-induced obesity and insulin resistance are uncoupled from shortened survival in *Drosophila*. *Cell metabolism*, 31(4), 710-725, 2020.
- [64] Lubojemska A., Stefana M. I., Sorge S., Bailey A. P., Lampe L., Yoshimura A., Burrell A., Collinson L., Gould, A. P. Adipose triglyceride lipase protects renal cell endocytosis in a *Drosophila* dietary model of chronic kidney disease. *PLoS Biology*, 19(5), e3001230. 2021.
- [65] Rani L., Saini S., Shukla N., Chowdhuri D. K., Gautam N. K. High sucrose diet induces morphological, structural and functional impairments in the renal tubules of *Drosophila melanogaster*: A model for studying type-2 diabetes mediated renal tubular dysfunction. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 103441. 2020.
- [66] Nowak K., Seisenbacher G., Hafen E., Stocker H. Nutrient restriction enhances the proliferative potential of cells lacking the tumor suppressor PTEN in mitotic tissues. *Elife*, 2, e00380. 2013.
- [67] Hirabayashi S., Baranski T.J., Cagan R.L. Transformed *Drosophila* cells evade diet-mediated insulin resistance through wingless signaling. *Cell*, 154(3), 664-675, 2013.
- [68] Billeter J. C., Bailly T. P. M. & Kohlmeier P. The social life of *Drosophila melanogaster*. *Insectes sociaux*, 1-14, 2024.
- [69] Wäng Y. & Jiang Y. *Drosophila melanogaster* as a tractable eco-environmental model to unravel the toxicity of micro-and nanoplastics. *Environment International*, 192, 109012, 2024.
- [70] Güneş E., & Şensoy E. Is Turkish coffee protects *Drosophila melanogaster* on cadmium acetate toxicity by promoting antioxidant enzymes?. *Chemosphere*, 296, 133972, 2022.
- [71] H. N. N. Kumar, M. Raveesh, A. K. Shettar and P. Niranjana. Evaluation of Pesticide Chlorpyrifos Toxicity on *Drosophila Melanogaster*. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 12(4), 2271-2281, 2021.
- [72] Güneş E. & Şensoy E. The effects of chlorpyrifos toxicity on movement physiology investigation in *Drosophila melanogaster*. *Journal of International Environmental Application and Science*, 16(4), 192-197, 2021.
- [73] Jovanović B., Cvetković V. J. & Mitrović T. L. Effects of human food grade titanium dioxide nanoparticle dietary exposure on *Drosophila melanogaster* survival, fecundity, pupation and expression of antioxidant genes. *Chemosphere*, 144, 43-49, 2016.
- [74] Ávalos A., Haza A. I., Drosopoulou E., Mavragani-Tsipidou P. & Morales P. In vivo genotoxicity assesment of silver nanoparticles of different sizes by the Somatic Mutation and Recombination Test (SMART) on *Drosophila*. *Food and Chemical Toxicology*, 85, 114-119, 2015.
- [75] Wang Z., Zhang L., & Wang X. Molecular toxicity and defense mechanisms induced by silver nanoparticles in *Drosophila melanogaster*. *Journal of Environmental Sciences*, 125, 616-629, 2023.
- [76] Vitolins M. Z. & Case T. L. What makes nutrition research so difficult to conduct and interpret?. *Diabetes Spectrum: a Publication of the American Diabetes Association*, 33(2), 113, 2020.

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., 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.
- **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.

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

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>.

Değerlendirme Süreci

- **MAUNFBD'**ye 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'**ye 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 çalışmalarıyla 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