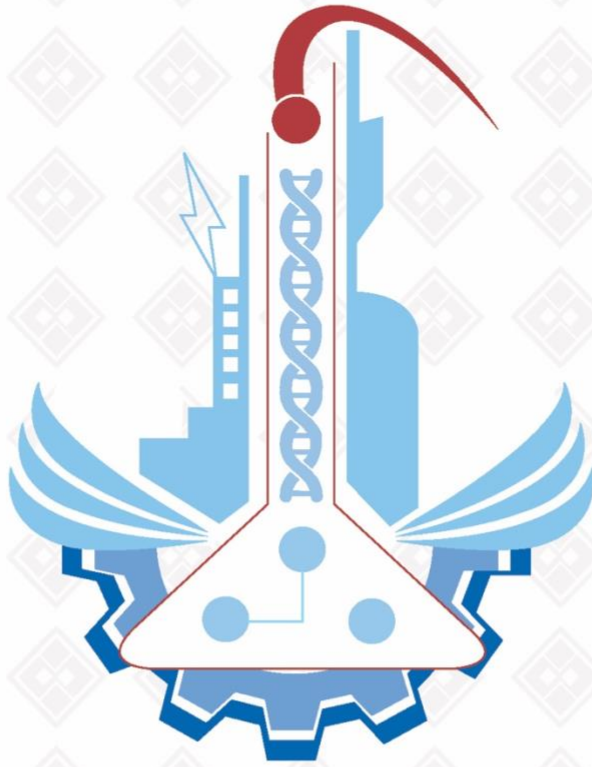


ISSN: 1308-9072

Cilt: 35 / Sayı: 1 / Yıl: 2023

FIRAT ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ



F ı r a t Ü n i v e r s i t e s i
Mühendislik Bilimleri Dergisi (MBD)
Cilt:35, Sayı:1, Yıl: 2023
ISSN: 1308 - 9072

İ l e t i Ő i m

Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
23119, ELAZIĞ

Tel: 0 424 212 27 07
Faks: 0 424 236 99 55
e-posta: fenbilim@firat.edu.tr

Bu dergi yılda 2 kez ve hakemli olarak yayımlanır.

Derginin Eski adı: Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Derginin Eski ISSN numarası: 1300-2708

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/fumbd>

Fırat Üniversitesi
Mühendislik Bilimleri Dergisi (MBD)

Sahibi

Prof Dr. Fahrettin GÖKTAŞ
Fırat Üniversitesi Rektörü

Genel Yayın Yönetmeni

Prof. Dr. Burhan ERGEN
F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Baş Editör

Dr. Öğretim Üyesi Ferhat UÇAR
F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür Yrd.

Editör

Doç. Dr. Mesut TOĞAÇAR
Fırat Üniversitesi İİBF Öğretim Üyesi

DANIŞMA KURULU

Umran S. İNAN	Stanford Ü. Elekt-Elktr. Müh.	Cumali KINACI	İ.T.Ü. Çevre Müh.
Serdar SALMAN	Marmara Ü. Metal. Müh.	Ülkü YETİŞ	O.D.T.Ü. Çevre Müh.
Z. Hakan AKPOLAT	F.S.M.Ü. Elekt-Elktr. Müh.	Eres SÖYLEMEZ	O.D.T.Ü. Makine Müh.
Serkan DAĞ	O.D.T.Ü. Makine Müh.	Ayşe DALOĞLU	K.T.Ü. İnşaat Müh.
Erkan ŞAHİNKAYA	İ.M.Ü. Biyomühendislik	Ali KARCI	İnönü Ü. Bil. Müh.
Temel SAVAŞKAN	K.T.Ü. Makine Müh.	Coskun BAYRAK	Little Rock Ü Bilg. Bil.
İlker B. TOPÇU	Osmangazi Ü. İnş. Müh.	Hükmü ORHAN	Selçuk Ü. Jeoloji. Müh.
Yetkin TATAR	F.Ü. Bil. Müh.	Mehmet CEBECİ	F.Ü. Elekt-Elktr. Müh.
Mehmet ÖZKUL	Pamukkale Ü. Jeoloji. Müh.	Ertan GOKALP	K.T.Ü. Harita. Müh.
Hasan EFEUGLU	A.Ü. Elekt-Elktr. Müh.	Erhan AKIN	F.Ü. Bil. Müh.
Ercan AKSOY	F.Ü. Jeoloji Müh.	Sezgin BAKIRDERE	Y.T.Ü Kimya
Mehmet YILMAZ	F.Ü. İnşaat Müh.	Yusuf CELAYİR	F.Ü. İnşaat Müh.
Nurhan ARSLAN	F.Ü. Kimya Müh.	Cafer BAL	F.Ü. Mekatronik Müh.
Hanifi GULDEMİR	F.Ü.Tek. Elekt-Elktr. Müh.	Nilgün GULEC	O.D.T.Ü. Jeoloji Müh.

Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi (MBD)
35-1, 2023

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

1. **Talaşlı İmalatta Kullanılan Kombine Delik İşleme Takımlarının Tasarımı ve Örnek Bir Uygulama**
Design of Combination Boring Tools Used in Machining and a Sample Application
Ahmet DOĞRUSADIK 1-13
2. **Şeker Pancarı Melasından Escherichia coli KO11 Suşu ile Biyoetanol Üretimi: Enzimatik Hidroliz ve Kesikli Fermantasyon**
Bioethanol Production from Sugar Beet Molasses using E. coli KO11 Strain: Enzymatic Hydrolysis and Batch Fermentation
Nur Kevser DOĞAN, Mehmet KALENDER 15-23
3. **Düşük SUVA Değerlikli Sular için Trihalometan Tahmin Modelinin Geliştirilmesi ve Analitik Hiyerarşi Yöntemi ile En İyi Tahmin Modelinin Belirlenmesi**
Developing a Trihalomethane Prediction Model for Low SUVA Waters and Determining the Best Prediction Model by Analytical Hierarchy Method
Cihan ÖZGÜR, Gökhan CİVELEKOĞLU, Şehnaz Şule KAPLAN BEKAROĞLU..... 25-45
4. **Öğrenci ve Akademisyenlerin E-Öğrenmeye Hazır Bulunuşlarının Daha Az Soru ile Sınıflandırılması**
Classification of E-Learning Readiness of Students and Academics with Fewer Questions
Merter Hami KARACAN, Sait Can YÜCEBAŞ 47-59
5. **Tarımsal Atığın Boyar Madde Giderimindeki Etkisinin İncelenmesi**
Investigation of the Effect of Agricultural Waste on Dye Removal
Muhammed ONAY, Çiğdem SARICI ÖZDEMİR 61-70
6. **Çizgeler Üzerinde Farklı Ağırlıklandırma Yöntemleri Ve Merkezilik Ölçütleri İle Çıkarımsal Metin Özetleme**
Extractive Text Summarization Using Different Weighting Methods And Centrality Measures On Graphs
Abdulsamet AYDIN, Taner UÇKAN..... 71-79
7. **Hidrolojik Sapan Değer Tespitinde Komşu İstasyon Seçimi**
The selection of neighboring station in hydrological outlier detection
Ahu DEDE, Necati AĞIRALIOĞLU 81-99
8. **Y90 Radyoembolizasyon Tedavisinde Makine Öğrenmesi ile Aktivite Tahmini**
Activity Prediction with Machine Learning in Y90 Radioembolization Therapy
Handan TANYILDIZI KÖKKÜLÜNK, Emre ALATAŞ, Hilal TANYILDIZI 101-107
9. **İnsansız Sistemlerde Görsel Eş Zamanlı Haritalama ve Konumlandırma Tekniğinin Simulink Ortamında Uygulanabilirlik Analizi**
Analysis of the Applicability of Visual Simultaneous Localization and Mapping Technique for Unmanned Systems Using Simulink Environment
Celal Çağrı ALTINDAŞ, Hasan Şakir BİLGE..... 109-118

10. Cevher Hazırlama Tesislerinden Çıkan Atıklar ve Yönetimi <i>Wastes from Mineral Processing Plants and Its Management</i> Hasan HACİFAZLIOĞLU, Hilal ŞAHİN.....	119-133
11. Yamadağı Volkanizmasının Kangal-Divriği (Sivas) Arasında Kalan Kuzey Kesimlerinin Petrolojisi <i>Petrology of the North Sections Between the Kangal-Divriği (Sivas) of Yamadağı Volcanism</i> Ahmet MAVİ, Taner EKİCİ.....	135-150
12. Geri Dönüşüm Agregalı Betonların Çökme Değerlerinin Tepki Yüzeyi Metodu ile Tahmini <i>Prediction of Slump Values of Recycled Aggregate Concretes by Response Surface Method</i> Muhammed ULUCAN, Kürşat Esat ALYAMAÇ	151-157
13. Elazığ İli Yağış Verilerinin Trend Analizi <i>Trend Analysis of Elazığ Province Precipitation Data</i> Mahsum AYDIN	159-173
14. Yeni Tip Çentikli Delta Kanat Modelinin Roketin Uçuş Performansına Etkilerinin Araştırılması <i>Investigation of the Effects of the New Type Notched Delta Fin Model on the Flight Performance of the Rocket</i> Cihan ÖZEL, Cevher Kürşat MACİT, Meral ÖZEL	175-193
15. Muharip Hava Aracı Otomatik İniş Koşusu İçin Güdüm Algoritmalarının Karşılaştırılması <i>Comparison of Guidance Algorithms for Autolanding Rollout of a Fighter Aircraft</i> Serdar AVŞAR, Emir KUTLUAY.....	195-206
16. Farklı Güdüm Kurallarının Havadan Atılan Gdümlü Bir Havan Mermisi Üzerinde Karşılaştırılması <i>Comparison of the Noteable Guidance Laws on a Guided Mortar Released from Aerial Platforms</i> Bülent ÖZKAN	207-216
17. SWARA, ARAS ve WASPAS Yöntemleri ile Yeni Şube Yeri Seçimi: Bir Kargo Firması Örneği <i>Selection of new branch location with SWARA, ARAS and WASPAS methods: An example of a cargo company in the logistics sector</i> Emine Elif NEBATİ, Eda VATANSEVER, Gülnihal MAKAS.....	217-237
18. Filtre Tabanlı Öznitelik Seçim Yöntemleri Kullanılarak Metinlerde Duygu Sınıflandırması Üzerine Karşılaştırmalı Bir Çalışma <i>A Comparative Study on Text Sentiment Classification by Using Filter-Based Feature Selection Methods</i> Ensar Arif SAĞBAŞ	239-250
19. Sığır Gübresi ve Üzüm Cibresinden Birlikte Fermantasyon Yoluyla Biyogaz Üretimi <i>Biogas Production by Co-Fermentation from Cattle Manure and Grape Pulp</i> Abdulkadir GÜL, Hamdi Soner ALTUNDOĞAN.....	251-259

20. Parçacık Sürüsü Optimizasyon Algoritması ile Optimize Edilmiş Evrimsel Sinir Ağı Kullanılarak Dermoskopik Görüntülerden Cilt Kanserinin Sınıflandırılması <i>Classification of Skin Cancer from Dermoscopic Images using Convolutional Neural Network Optimized with Particle Swarm Optimization Algorithm</i> Erdal ÖZBAY, Feyza ALTUNBEY ÖZBAY.....	261-273
21. Kontrollü Silisyum Nano-İğnelerin Mikrofabrikasyonu <i>Microfabrication of Controlled Silicon Nanotips</i> Ümit ÇELİK	275-281
22. Açık Kaynaklardan Test Otomasyon Araçlarıyla Siber Tehdit İstihbaratı Çıkarılması <i>Extracting Cyber Threat Intelligence with Test Automation Tools from Open Sources</i> Anil SEZGİN, Aytuğ BOYACI	283-290
23. Alkolik ve Normal EEG Sinyallerinin Zaman-Alan Tanımlayıcı Analizi Tabanlı Otomatik Sınıflandırılması <i>Automatic Classification of Alcoholic and Normal EEG Signals Based on Time-Domain Descriptor Analysis</i> Berna ARI	291-300
24. Nanosilika Modifiyeli Bağlayıcıların Tekerlek İzi Direnci ve Sıcaklık Hassasiyetlerinin Belirlenmesi <i>Determination of Rutting and Temperature Susceptibility of Nanosilica Modified Binders</i> Mustafa AKPOLAT	301-312
25. AISI 5140 Çeliğinin Farklı Soğutma Teknikleri Kullanılarak Frezelenmesinin Güç Tüketimi Üzerine Etkileri <i>Effects of Milling AISI 5140 Steel Using Different Cooling Techniques on Power Consumption</i> Serhat ŞAP	313-320
26. Evrimsel Sinir Ağı Mimarileri ve Öğrenim Aktarma ile Bitki Zararlısı Çekirge Türlerinin Sınıflandırılması <i>Classification of Plant Pest Grasshopper Species by Convolutional Neural Network Architectures and Transfer Learning</i> Nurullah ŞAHİN, Nuh ALPASLAN, Mustafa İLÇİN, Davut HANBAY.....	321-331
27. Ezerek Parlatma Yönteminin Inconel 718 Alaşımının Yüzey Kalitesi Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması <i>Investigation of the Effects of Roller Burnishing on the Surface Quality of Inconel 718 Alloy</i> Mahmut ÇELİK	333-342
28. Çinko İçeren Liç Edilmiş Malahit Cevherinden Çinko İyonlarının D2EHPA Ekstraktantı İle Kazanılmasının İncelenmesi <i>Investigation of Recovery of Zinc Ions from Zinc-Containing Leached Malachite Ore by D2EHPA Extractant</i> Mehmet Kayra KARACAHAH	343-352
29. Önerilen Derin Öğrenme ve Makine Öğrenmesi Tabanlı Hibrit Model ile Çevresel Atıkların Sınıflandırılması <i>Classification of Environmental Waste with Proposed Deep Learning and Machine Learning Based Hybrid Model</i> Elif Nur YILDIZ, Harun BİNGÖL, Muhammed YILDIRIM	353-361
30. Investigation of the Effects of Incorrect Installation of Air Conditioning Systems on Electricity Consumption Cost <i>Klima Sistemlerinin Yanlış Montajının Elektrik Tüketim Maliyetine Olan Etkilerinin İncelenmesi</i> Ruveyda ERGEN, Mert GÜRTÜRK	363-377

- 31. Gauss Süreç Regresyonu ve Destek Vektör Makineleri Kullanılarak Değerlendirilen Kendiliğinden Yerleşen Beton Davranışının Deneysel Veri İle Doğrulanması**
Evaluation of Self-Compacting Concrete Behavior by Using Gaussian Process Regression and Support Vector Machines via Experimental Data Validation
Merve AÇIKGENÇ ULAŞ 379-388
- 32. Hiperspektral Görüntü Sınıflandırma için Hibrit Evrişimsel Sinir Ağı ve Sıkma- Uyarma Bloğu Yöntemi**
Hybrid Convolutional Neural Network and Squeeze-Excitation Block Method for Hyperspectral Image Classification
Mehmet NERGİZ 389-402
- 33. Bir Fazlı Z-Kaynaklı Düşürücü-Yükseltici Matris Çeviricinin MATLAB/Simulink Benzetimi**
MATLAB/Simulink Simulation of Single Phase Z-Source Buck-Boost Matrix Converter
Selda Nur KÖK, Hanifi GÜLDEMİR 403-412
- 34. Farklı Yönlendirmeli Bina Dış Duvarlarında Faz Değiştiren Malzeme Kullanımının Isı Kazancına Etkisinin Araştırılması**
Investigation Of The Effect Of Using Phase Change Materials On Heat Gain At Building Walls With Different Orientations
Meral ÖZEL, Fethi Ahmet ÇAKMAK..... 413-424
- 35. Okuma Anındaki Göz Hareketlerini Görselleştirme ve Analiz Etme**
Visualizing and Analyzing Eye Movements During Reading
Dilber ÇETİNTAŞ, Taner TUNCER 425-432

Talaşlı İmalatta Kullanılan Kombine Delik İşleme Takımlarının Tasarımı ve Örnek Bir Uygulama

Ahmet DOĞRUSADIK^{1*}

¹ Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Doğu Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

*¹ adogrusadik@dogus.edu.tr

(Geliş/Received: 10/06/2022;

Kabul/Accepted: 26/10/2022)

Öz: Talaşlı imalatta üretim verimliliğini arttırmak için çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Bunlardan biri seri imalat parçalarının işlenmesinde tercih edilen kombine delik işleme takımlarının kullanımınıdır. Bu tür takımlar kademeli deliklerin oluşturulmasında önemli bir zaman tasarrufu sağlamaktadır. Ancak kombine delik işleme takımlarının tasarımı uzmanlık gerektiren bir konudur. Bu nedenle sistematik bir yaklaşımın kullanımı tasarım sürecini önemli ölçüde kolaylaştıracaktır. Kademeli delikler için kombine takım tasarımı sistematik bir yaklaşım için oldukça elverişlidir. Çünkü kombine kesici takım tasarımında kullanılan kesici uçlar için oluşturulmuş standartlar mevcuttur. Standartlara uygun olan kesici uçların büyük bir kısmı hazır olarak bulunmaktadır. Bu nedenle tasarımda yapılması gereken şey bu kesici uçların kademeli deliğin uygun kısımlarını işleyecek şekilde takım gövdesine yerleştirilmesidir. Çalışmanın ilk kısmında kesici uçların nasıl seçilmesi ve takım gövdesine nasıl yerleştirilmeleriyle ilgili olarak tasarım ayrıntıları verilmiştir. Sonraki kısımda ise belirtilen tasarım prensiplerine bağlı olarak örnek kademeli delik için kombine delik işleme takım tasarımı gerçekleştirilmiştir. Çalışmada sadece standart kesici uçlar kullanıldığından önerilen yaklaşım ile kademeli deliğe sahip olan parçaların çoğu için kombine delik işleme takım tasarımı gerçekleştirilebilmektedir. Ancak standart kesici uçlar ile elde edilemeyen, kademeler arasında çok az mesafe bulunan ve fazla detay içeren durumlar çalışmanın dışında tutulmuştur. Çünkü bu tür durumlarda tatmin edici bir çözüm daima bulunmayabilmektedir.

Anahtar kelimeler: Talaşlı imalat, delik işleme, kesici uç, takım tasarımı, baralama.

Design of Combination Boring Tools Used in Machining and a Sample Application

Abstract: To increase the production efficiency in machining, various methods are applied. One of them is the utilization of combination boring tools, which is preferred for machining of mass production parts. Such tools provide significant time savings in the production of stepped holes. However, the design of combination boring tools is a subject that requires expertise. Therefore, the use of a systematic approach will significantly facilitate the design process. The design of combination boring tools for stepped holes is highly suitable for a systematic approach. Because there are standards provided for the indexable inserts used in the design of the combination boring tools. Most of the indexable inserts that comply with the standards can be found ready-made. Therefore, what needs to be done in the design is to place these indexable inserts in the tool body to machine the appropriate parts of the stepped hole. In the first part of the study, design details are given about how to select the indexable inserts and how they are placed in the tool body. In the next part, a combination boring tool design is carried out for a sample stepped hole, adhering to the specified design principles. Since only standard indexable inserts were used in the study, combination boring tool design can be realized for most of the parts with stepped holes by using the proposed approach. However, situations that cannot be achieved with standard indexable inserts, or where there is too little distance between the steps or which contain too much detail, are excluded from the study. Because in such cases, a satisfactory solution may not always be found.

Key words: Machining, hole-making, indexable insert, tool design, boring.

1. Giriş

Talaş imalat ile parça şekillendirmede en önemli etkenlerden biri takım seçimidir. Takım seçimi yapılırken işlenecek olan parçanın ölçü ve şekil toleransları, üretim adedi, malzemesi ve sertliği gibi hususlar göz önünde bulundurulur. Bir parçanın belirli bir kısmını oluşturmak için kullanılacak olan takım çeşidi bazı durumlarda çok fazladır [1]. Bu nedenle doğru takımı seçmek zorlaşır. Kesici takımın bir parçanın talaşlı imalatında tek başına değerlendirilmesi yeterli değildir [2]. Kullanılacak tezgâh, takım yolu, aparat gibi diğer etkenleri de göz önünde bulundurmak gerekir. Firmalar kesici takım seçimlerini genellikle tecrübelerine dayanarak yaparlar. Ancak uygun takım seçiminde teknik bir yol izlemek birçok açıdan daha elverişli olacaktır [3].

* Sorumlu yazar: adogrusadik@dogus.edu.tr. Yazarın ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-6643-8115

Delik oluşturmada kullanılan en temel takım matkaptır. Matkaplar ise yapıldıkları malzeme türü, geometrileri, takım kaplamaları gibi çeşitli değişkenlerin yüzlerce farklı kombinasyonlarıyla karşımıza çıkarlar. Ölçü ve şekil toleransı dar olan bir delik oluşturulmak istendiğinde genellikle matkapların kullanımı yeterli değildir [4]. Matkap ile delmenin ardından raybalama veya baralama gibi tamamlayıcı işlemler gerekir. Bu yöntemler ile sadece düz delikler elde edilebilir. Deliğin üst tarafında bir pah mevcut ise havşalama yapmak gerekir. Kombine takımlar ilk olarak burada devreye girer. Pah ayrı bir takım ile yapıldığından, işlem süresi kısa da olsa takım değiştirme süresinden tasarruf etmek için havşalı matkaplar kullanılabilir. Çünkü delik delme ve havşalama işlemlerini tek bir takımda birleştirmek ideal bir çözümdür [5]. Delikte pah yanında kademe de varsa ve parça seri üretim parçası ise kombine takım kullanmak önemli bir zaman tasarrufu sağlayacaktır. Bu basit örneklerin dışında çok daha karmaşık kademeli deliklerin oluşturulmasında kombine takımlar önemli faydalar sağlamaktadır.

Talaşlı imalat, parça işleme süresinin kısaltılması açısından geliştirmeye açık bir imalat yöntemidir. Bunu gerçekleştirmenin çeşitli yolları mevcuttur. Bunlardan bazıları: Takım yolunun kısaltılması, takım ilerleme hızının artırılması, kombine kesici takımların kullanılmasıdır. Bununla birlikte, parça işleme süresinin kısaltılmasını sağlayan her yöntem beraberinde birtakım problemler getirebilmektedir. Örneğin; işleme süresinin kısaltılması için paso miktarı artırıldığında yüzey bütünlüğü bu durumdan genellikle olumsuz olarak etkilenmekte [6], takım ilerleme hızının artırılması yüzey pürüzlülüğü değerini arttırmaktadır [7]. Kombine takımlarda ise ne takım yolu kısaltılmakta ne de ilerleme hızı arttırılmaktadır. Bunların yerine birden fazla takımların ayrı ayrı yaptıkları işlemler aynı anda tek bir kesici takım ile yapılmaktadır. Kombine takımların olumlu ve olumsuz yönleri aşağıda verilmektedir.

Olumlu yönleri:

- Birçok işlem aynı anda gerçekleştiği için parça işleme süresi kısalmaktadır.
- Birden fazla takımların yapacağı işlemler tek takımla yapıldığından takım değiştirme gereksinimi azaltılır. Takım değiştirme süreleri ortadan kaldırılarak toplam parça üretim süresi kısaltılmış olur.
- Bu tür takımların kullanılmasıyla tezgâh magazininde daha az yer tutulmuş olur.
- Kombine takımlarla işlenen parçaların CNC programları çok sade ve basittir.
- Kombine takımlar üzerinde bulunan kesici uçlar arasındaki izafi mesafeler, takım aşınması haricinde sabit kaldığından, ölçü kararlılığı sağlanır. Özellikle, sağlanan eş merkezlik toleransı oldukça iyidir.
- Parça eğer tek bir kombine takım ile üretilebiliyorsa, takımın sağladığı ölçü kararlılığıyla matkap tezgâhı, freze tezgâhı veya torna tezgâhı gibi bir universal tezgâh kullanılarak da işlem yapılabilir.
- Çoklu takımların kullanıldığı duruma kıyasla takım sıfırlama için gerekli süre azaltılmış olur.

Olumsuz yönleri:

- Özel üretim takımlar oldukları için fiyatları standart takımlara kıyasla daha pahalıdır.
- Bir kombine takım işlenmek istenen parçaya özgü olarak üretildiği için kullanımı genellikle bu parçanın işlenmesi ile sınırlıdır. Bu nedenle üretim adedi çok fazla olan parçaların üretiminde kullanılmaktadır.
- Parça üzerinde aynı anda birden fazla kesici takım çalıştığı için oluşan bileşke kesme kuvvetinin karşılanması gerektiğinden parçanın aparatı daha rijit olmalıdır.
- Gerekli iş mili torku ve gücü daha fazladır.
- Kombine delik işleme takımının üzerinde bulunan her bir kesici uç farklı çapta delik işlediğinde, her biri için kesme hızı farklılaşmaktadır. Bu nedenle iş mili hızının belirlenmesinde birtakım sınırlamalar ortaya çıkmaktadır. Örneğin belirli bir malzeme için önerilen kesme hızı aralığında, küçük çap işleyen kesici uç için kesme hızı seçildiğinde büyük çap işleyen kesici uç için kesme hızı aralığı dışına çıkılabilmektedir.
- Kesme hızı farklılığından dolayı büyük çap işleyen kesici uç için daha fazla takım aşınması meydana gelmektedir. Bu durum kesici uç değişim süresinin her bir kesici uç için farklılaşmasına neden olmaktadır.
- Döküm ve dövme gibi yöntemlerle ön şekillendirilmiş olan kademeli deliklerdeki düzlükler işlemin sonuna doğru aynı anda oluşturuldukları için tırlama meydana gelebilir. Bunu engellemenin yollarından biri olan işlemin sonuna doğru ilerleme hızının düşürülmesi ise işlem süresini arttırır.
- Kesme hızı ve ilerleme hızı, kombine takımlarda açıklanan sebeplerden dolayı daha düşüktür.
- Kartuşlu tür olmayan kesici uçlar için çap ayarı mümkün değildir. Eksantrik kovan kullanılarak yapılan çap ayarlamaları tüm çapları etkilediğinden kullanımı kısıtlıdır. Bunun yanında çap ayarı için, eğer köşe yarıçapı için uygun ise, köşe yarıçapı farklı olan uç kullanılarak çap ayarlaması kısıtlı olsa da düşünülebilir.

- Kartuşlu tür olmayan kesici uçlar ile tasarlanan kombine takımlarda, kademeler arasında ölçü farklılığı oluşturmak genellikle mümkün değildir.
- Takımın herhangi bir kısmı hasar gördüğünde tamamı işe yaramaz hale gelir.
- Kombine takımlar genellikle standart takımlara göre daha ağırdır. Bu husus takım tasarımında göz önünde bulundurulmalıdır. Çünkü CNC takım tezgâhlarında magazinlerin ve takım değiştirme kollarının taşıyabilecekleri takım ağırlıkları sınırlıdır.

Yukarıda sayıldığı gibi, kombine kesici takımların birçok olumsuz yönleri olmasına rağmen parça işleme süresini kısalttıklarından dolayı seri imalatta yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Üretim adedi yüksek olan parçaların işlenmesine ilave olarak, Smith [8] bu tür takımların toplam üretim adedinden bağımsız olarak parçanın işleme süresinin önemsendiği durumlarda veya takımın ölçü doğruluğunun parçaya yansıtılmasının istenildiği durumlarda da kullanılabilirliğini belirtmiştir. Kombine delik işleme takımlarının ne kadar zaman tasarrufu sağlayabilecekleri ile ilgili olarak Panickar ve Mate [9]'nin çalışması örnek gösterilebilir. Bu çalışmada kombine delik işleme takımı kullanılarak delik delme, kademe oluşturma ve alında kanal açma işlemleri tek takımda birleştirilmiştir. Aynı takımlar ile işlemeye kıyasla %60 oranında zaman tasarrufu sağlanmıştır. Kombine delik işleme takımları her ne kadar literatürde yaygın olarak yer almasa da aslında bu tür takımların gerçekleştirdikleri işlemler birden fazla baralama işleminin aynı anda gerçekleştirilmesidir. Baralama işlemi temel olarak bir delik genişletme işlemidir [10]. Baralama işleminin mekanığı ve dinamiği çeşitli çalışmalarda incelenmiştir [11–13]. Şenbabaoğlu vd. [14] gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada baralama işleminde iş mili hızının artırılmasıyla daha iyi yüzey pürüzlülüğü değeri elde etmişlerdir. Ayrıca uygun kesme koşullarının seçilmesi ve kesme sıvısının kullanılmasıyla kaba ve yarı hassas baralama işlemlerini birleştiren kombine delik işleme takımı kullanımı ile gerekli ölçü toleranslarını sağlayarak işlem süresinin kısaltılabileceğini göstermişlerdir. Son yıllarda baralama işlemi ile ilgili yapılmış olan çalışmaların çoğu işlem sırasında ortaya çıkan titreşimlerin sönmülmesi için aktif, yarı aktif ve pasif damperlerin kullanılması ile ilgilidir [15]. Bu alanda çok fazla çalışma yapılmasının nedeni baralama işleminde takım uzunluğunun takım çapına oranının genellikle fazla olması nedeniyle tırlamanın oluşmasıdır [16]. Tırlamaya karşı önlem alınmalıdır. Çünkü işlem sırasında oluşan titreşimler sönmülmediğinde parçanın yüzey kalitesi ve kesici takımın aşınması olumsuz yönde etkilenmektedir [17].

Literatürde baralama işlemi ile ilgili çalışmalar mevcut iken kombine delik işleme takımlarının tasarımı ile ilgili yeterli çalışma bulunmamaktadır. Bu tür takımların tasarımı sanayide ihtiyaç duyulan bir konudur. Bu çalışmada kombine delik işleme takımlarının tasarımı için sistematik bir yöntem sunulmaktadır.

2. Kombine Delik İşleme Takımlarının Tasarım Prensipleri





Kombine kesici takımların tasarımında dikkat edilmesi gereken birçok ayrıntı mevcuttur. Bu bölümde bu ayrıntılar hakkında bilgi verilecektir. Kombine delik işleme takımlarının iş parçası ile temas eden ilk kısmının belirlenmesiyle tasarıma başlanabilir. Kademeli deliklerin olduğu kısımlarda kombine takım kullanmadan önce ön deliğin ayrı bir takım ile oluşturulması düşünülebilir. Ancak aynı kombine takımla delik delme işlemi gerçekleştirilmek isteniyorsa kombine takım tasarımına, küçük çaplı delikler için karbür veya HSS matkap, büyük çaplı delikler için ise kesici uçlu matkap eklenmelidir. Karbür ve HSS matkapların kombine takıma bağlanması için genel olarak kullanılan yöntem, matkapın setiskur civata ile sabitlenmesidir. Pens sistemi çok fazla yer kapladığı için tasarımda genellikle düşünülmez. Bu nedenle küçük çaplı deliklerin kombine takımlar kullanılarak oluşturulması rijit bağlamanın yeterli seviyede sağlanamamasından dolayı sorunludur. Bazı durumlarda parça için ön delik oluşturmaya gerek olmayabilir. Özellikle büyük çaplı delikler talaşlı imalat haricinde ekstrüzyon ve döküm gibi diğer imalat yöntemleri ile elde edilmiş olabilir.

Talaşlı imalat alanında çok çeşitli geometrilerde kesici uçlar kullanılmaktadır. Ancak kombine kesici takım tasarımında kullanılan kesici uç geometrileri kısıtlıdır. Bu nedenle bu çalışmada kullanılan kesici uç geometrileri sınırlandırılmıştır. Kesici uçların geometrilerini tanımlamak için kullanılan çeşitli standartlar mevcuttur. Bu çalışmada ISO 1832:2017 standardı kullanılmıştır [18]. Bu standarda göre bir kesici uç tanımlamak için temel olarak 7 sembolden oluşan bir kodlama yapılmaktadır. İlave semboller kesici uç üretimi yapan firma tarafından gerekli görüldüğünde ana kısmın sağ tarafına eklenmektedir. Şekil 1'de örnek bir kodlama gösterilmektedir. Burada 1 numaralı sembol kesici uç formunu, 2 numaralı sembol yan yüzey açısını, 3 numaralı sembol tolerans sınıfını, 4 numaralı sembol bağlama ve talaş kırıcı türünü, 5 numaralı sembol kesici uç boyutunu, 6 numaralı sembol kesici uç kalınlığını ve 7 numaralı sembol kesici uç köşe yarıçapını temsil etmektedir.

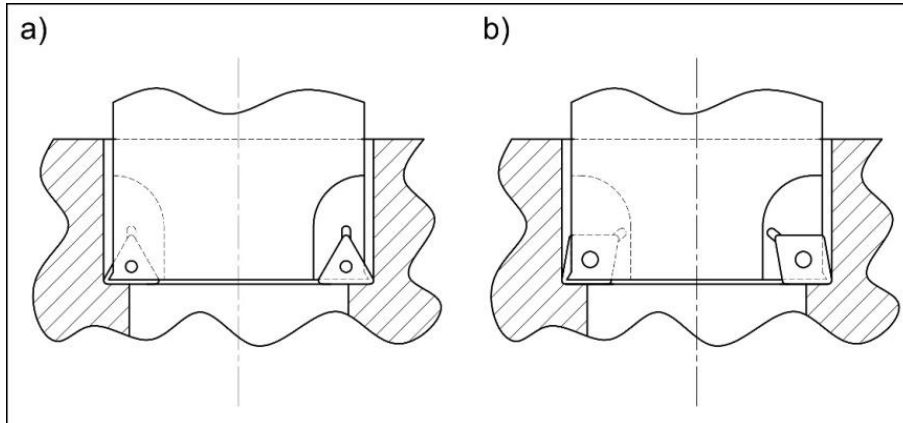
C C M T 09 T3 04
1 2 3 4 5 6 7

Şekil 1. Örnek kesici uç kodu.

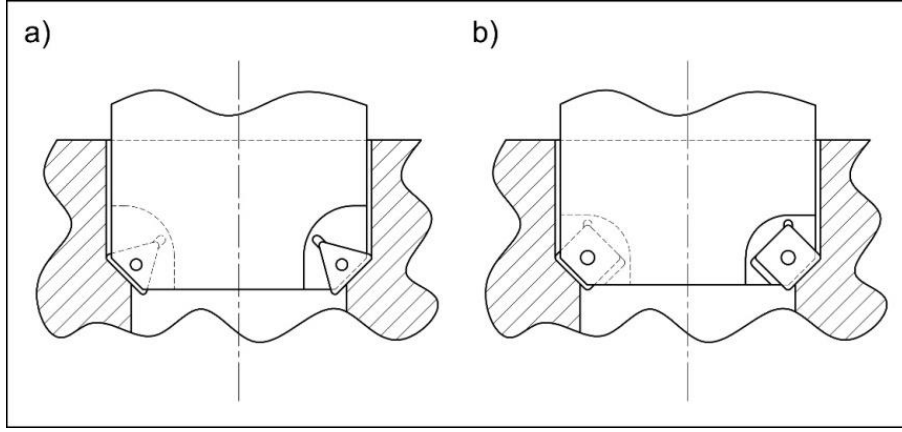
Kombine kesici takım tasarımında en çok kullanılan uç formları T ve C formlarıdır. Bu formların dışında S formundaki uçlar da nadiren kullanılmaktadır. Kesici uçlu matkaplar için kullanılan uç formları W veya özel formlardır. Şekil 2 'de T, C, S ve W uç formları ve sıklıkla kullanılan ölçüleri gösterilmektedir. Düz kademe oluşturmak için S formulu kesici takımların kullanımı, yan yüzeylerde sürtünmeye neden olacağı için düşünülemez. Düz kademeler için tercih edilen uçlar C ve T formulu kesici uçlardır (Şekil 3). C formundaki uçlar, daha kısa tarama alanı oluşturmalarına rağmen daha geniş yuvaya sahiptirler. Bu durum, C formundaki uçların daha yüksek kesme kuvvetlerini karşılayabileceğini göstermektedir. Bunların dışında C formuna kıyasla daha küçük açılara sahip olan D, V ve benzer formlardaki uçlar, çok fazla yer kapladıklarından tercih edilmezler. T formulu uçların bir diğer kullanım nedeni, simetrik ve açılı yan yüzey yapıları nedeniyle parçanın her iki yan yüzeyinde sürtünme meydana getirmemesi nedeniyle parçanın altında kare kesitli kanal oluşturabilmeleridir. Açılı yüzey oluşturmak için T ve S formlarındaki uçlar kullanılabilir (Şekil 4). Pah kırma işlemi için genellikle T formundaki uçlar kullanılır.

Uç formu (1)				İç teğet çemberi çapı (mm)
T	C	S	W	
				
Kesici uç boyutu (5)				
06	03	03	02	3.97
09	05	05	03	5.56
11	06	06	04	6.35
16	09	09	06	9.525
22	12	12	08	12.70

Şekil 2. Bazı kesici uç formları ve sıklıkla kullanılan ölçüleri.

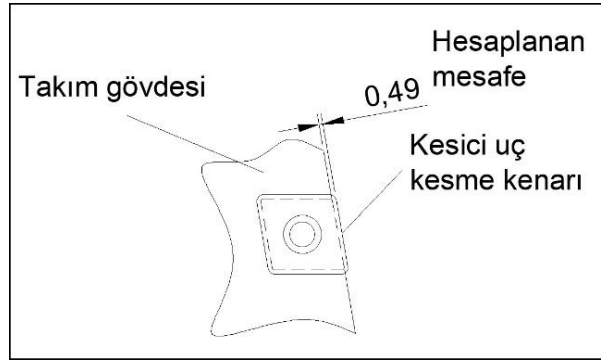


Şekil 3. Ön delik oluşturulduktan sonra düz kademe oluşturma: (a) T formulu kesici uç, (b) C formulu kesici uç.



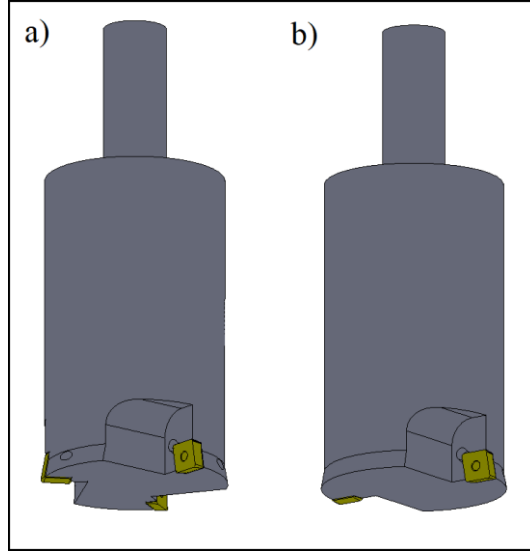
Şekil 4. Ön delik oluşturulduktan sonra açılı yüzey oluşturma: (a) T formlu kesici uç, (b) S formlu kesici uç.

Kombine takım tasarımında kullanılan kesici uçların yan yüzey açıları genellikle C ve P sembolleriyle belirtilen 7° ve 11° 'dir. Bunların dışında pozitif açılı diğer kesici uçlar da kullanılabilir. Ancak daha büyük yan yüzey açıları kama açısını azalttığından dolayı kesici ucun dayanımı azalmaktadır. Yan yüzey açıları takım gövdesinin de ölçülerini etkilemektedir. Yan yüzey açısından dolayı kesici ucun form boyutu arka tarafta küçülmektedir. Kesici uç takım gövdesine arka tarafından yerleştirildiğinden kesici uç kalınlığı (6 numaralı sembol) ve yan yüzey açısı (2 numaralı sembol) kullanılarak ofset miktarı hesaplanmalı ve takım gövdesi ile kesme kenarı arasındaki mesafe en az bu ölçüde olmalıdır. Bu ölçü yan yüzey açısının sinüsü ile kesici uç kalınlığının çarpılmasıyla elde edilir. Şekil 5'te bu ölçü CCMT09T308 kodlu kesici uç için 0,49 mm olarak hesaplanmıştır.

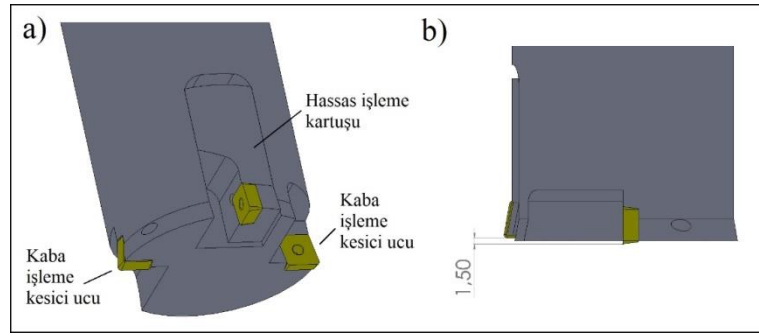


Şekil 5. Takım gövdesi ile kesme kenarı arasındaki mesafe.

Aynı kısmı işlemek için takım çevresine eşit açılarla yerleştirilmiş olan kesici uçlar birtakım faydalar sağlamaktadır (Şekil 6). Böyle bir tasarım ile radyal yöndeki kesme kuvvetleri dengelenebilmekte ve daha büyük ilerleme hızları kullanılabilir [12]. Kaba işlemede bu nedenle birden fazla kesici uç tercih edilmektedir. Hassas işlemede ise paso daha az olacağı için radyal kesme kuvveti düşük seviyede olmaktadır. Bu nedenle radyal kesme kuvvetinin dengelenmesi gerekmediğinden tek kesici uç kullanılabilir. Ayrıca hassas işlemede parçanın çap toleransı dar ise ayar için kartuş sistemi tercih edilmelidir (Şekil 7a). Kartuş sistemi ile hem çap ayarı hem de yükseklik ayarı yapılabilir. Olumsuz yönü ise takım gövdesinde daha fazla yer kaplamasıdır. Kaba işleme gerçekleştiren kesici uç hassas işleme yapan kesici ucun önünde olmalıdır. Bu nedenle kör deliklerde kaba işleme yapan kesici uç ile hassas işleme yapan kesici uç arasındaki mesafe kadar kısım son çap ölçüsüne getirilememektedir (Şekil 7b).



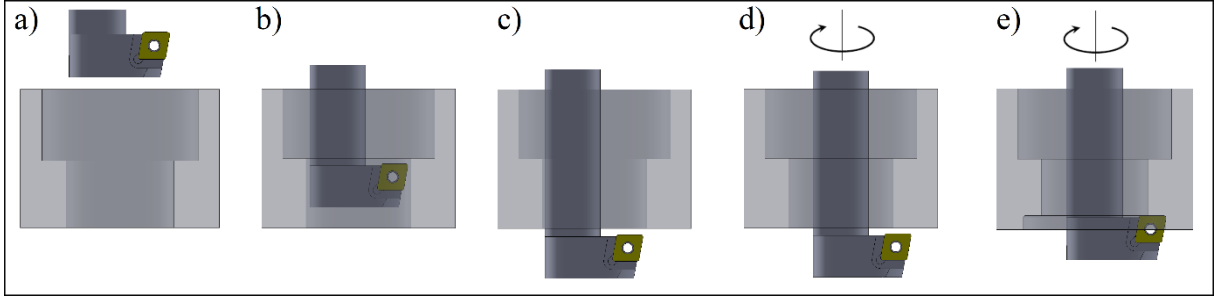
Şekil 6. Çoklu kesici uçlu kaba işleme delik baraları: (a) Üç kesici uçlu. (b) İki kesici uçlu.



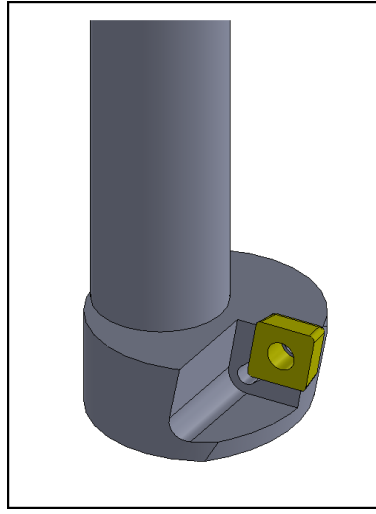
Şekil 7. (a) Hem kaba işleme hem de hassas işleme yapabilen kombine takım. (b) Kaba işleme kesici ucu ile hassas işleme kesici ucu arasındaki mesafe.

Kesici uçların köşe yarıçapları işlenen kısımların köşe yarıçapına uygun olarak seçilir. Yaygın olarak kullanılan köşe yarıçapı değerleri 0,2, 0,4, 0,8, 1,2, 1,6, 2 mm ve üzeri olduğu için istenen köşe yarıçap değerini elde etmek her zaman mümkün olmayabilir. Bu durumda öncelikle yapılması gereken şey istenen köşe yarıçap toleranslarının değerlendirilmesidir. Bu da mümkün değilse özel olarak taşlanmış kesici uçlar kullanılmalıdır. Eğer kesici uç bir kademe veya açılı yüzey oluşturmayı sadece çap işliyor ise kesici uç yarıçapı bağımsız olarak seçilebilir. Bu tür durumlarda köşe yarıçapının seçiminde yüzey pürüzlülüğü değeri dikkate alınmalıdır. Çünkü köşe yarıçapı arttıkça yüzey pürüzlülüğü azalmaktadır [19]. Delik açık delik olduğunda sondaki kesici ucun deliğin bir miktar dışına çıkması gerekir. Bu değer kesici uç yarıçapından bir miktar daha fazla olmalıdır. Böylece delik çıkışında oluşan çapaklar dışarıya doğru çıkarılmış olur.

Bir deliğin arka yüzeyinde pah veya işlenmesi gereken yüzeyler olduğunda kombine delik işleme takımları kullanılabilir. Bu tür işlemler normalde parçanın sökülüp ters bağlanmasını gerektirir. Ancak bu durum ilave bir bağlama gerektirdiğinden zaman kaybına neden olur. Bazı durumlarda bu tür işlemler kombine delik işleme takımlarıyla aynı bağlamada gerçekleştirilebilir. Bu tür işlemler için gerekli olan kombine delik işleme takım tasarımı daha zordur. Çünkü takımın bir önceki işlemde oluşturulmuş olan en küçük delik çapından geçebilecek ve tüm yüzeyi işleyebilecek yapıda olması gerekir. İşlem takımının durdurulup delik içinden geçirilerek deliğin alt tarafında konumlandırılmasıyla başlar. Takıma kesme hızı kazandırılır ve takım yukarıya doğru hareket ettirilir. Yüzeyin işlenmesinden sonra takım aşağıya doğru hareket ettirilir, durdurulur ve tekrar konumlandırılarak geri çekilir. Örnek bir delik için işlem Şekil 8’de gösterilmektedir. Kullanılan takım ise Şekil 9’da gösterilmektedir. Örnekteki uygulamanın dışında çoklu kesici uçlara sahip olan aynı anda farklı işlemler gerçekleştiren kombine delik işleme takımları da kullanılabilir.



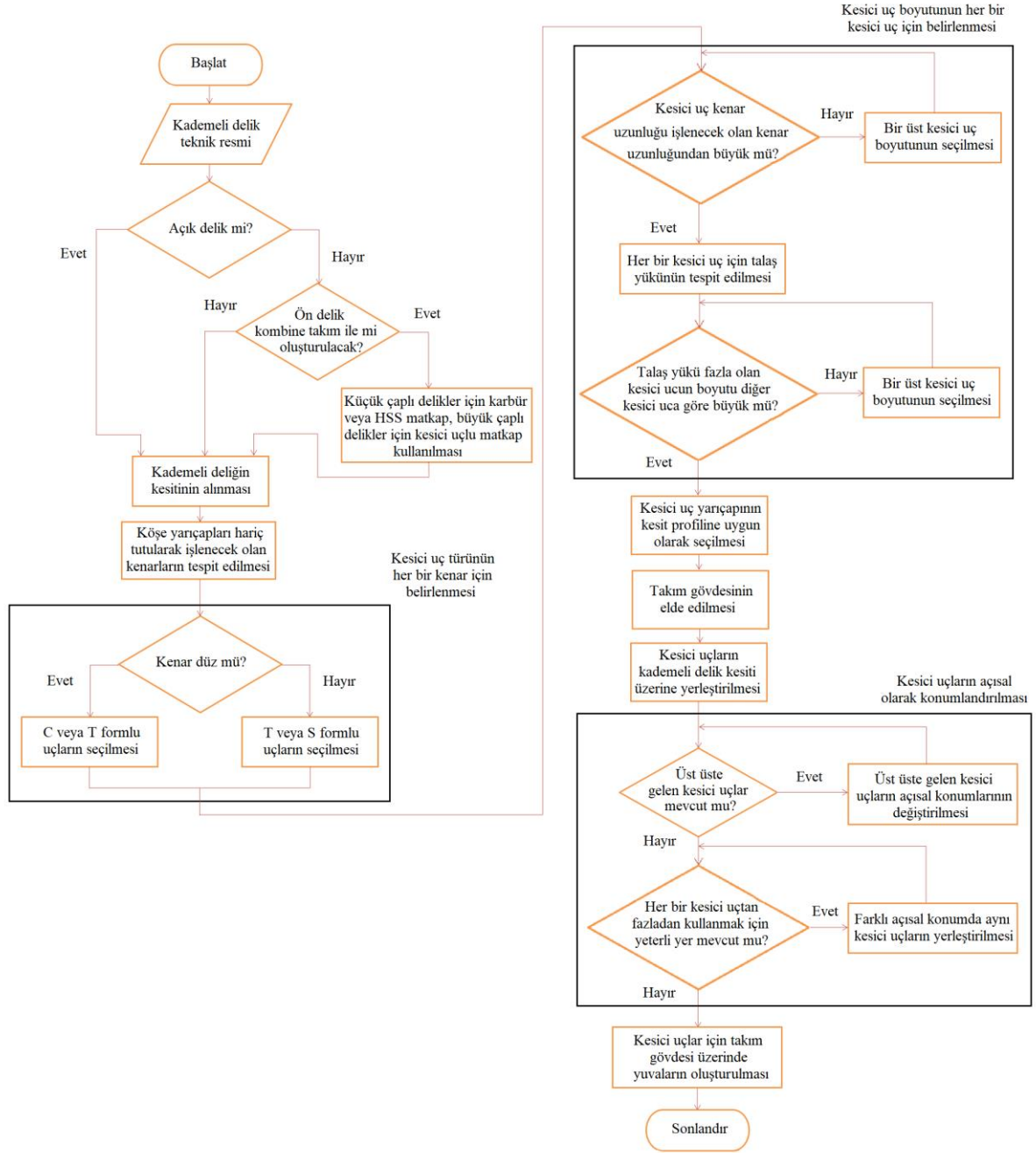
Şekil 8. (a) Takımın delik üzerinde konumlanması. (b) Takım parçanın en küçük çaplı deliğinden geçerken. (c) Takım deliğin alt kısmında. (d) Takımın dönme eksenini ile deliğin ekseninin çakışması ve takıma kesme hızının verilmesi. (e) Takımın yukarıya doğru hareketi ile kesme işleminin gerçekleşmesi.



Şekil 9. Arka yüzeyden delik baralama takımı.

3. Önerilen Yaklaşım

Bu bölümde kombine takım tasarım prensiplerine bağlı kalarak sistematik bir yaklaşım sunulmaktadır. Şekil 10'da tasarım akış şeması gösterilmektedir. Bu şemada izlenen sıra şu şekildedir. Öncelikle işlenecek olan kademeli deliğin türü tespit edilir. Delik açık delik değil ise ilave olarak bir matkap kullanılması gerekir. Bu delik delme işlemi kombine takım ile veya ilave bir operasyon ile gerçekleştirilebilir. Bu kararın verilmesinden sonra kademeli deliğin kesiti alınır. Ölçü toleransları göz önünde bulundurularak ortalama ölçüler hesaplanır. Elde edilen kesitteki kenarlar tespit edilir. Bu yapılırken köşe yarıçapları dikkate alınmaz. Çünkü köşe yarıçapları bitişik oldukları kenarlar ile aynı kesici uç tarafından oluşturulurlar. Bu işlemden sonra her bir kenar için kullanılacak olan kesici uç formu tespit edilir. Önceki bölümde belirtildiği gibi düz kademeler için C veya T formundaki kesici uçlar, açılı yüzeyler için T veya S formundaki kesici uçlar kullanılır. Bir sonraki adımda kesici uç boyutu belirlenir. Bunun için öncelikle seçilen kesici ucun kenar uzunluğunun işlenecek olan kenar uzunluğundan daha büyük olması gerekir. Kesici uç boyutu belirlenirken aynı zamanda talaş yükü de göz önünde bulundurulur. Talaş yükü fazla olan kesici uçlara daha büyük bileşke kesme kuvvetleri etki etmektedir. Bu nedenle talaş yükü büyük olan kesici ucun boyutu artırılabilir. Kesici uçların formları ve boyutları belirlendikten sonra köşe yarıçapları kademeli delik kesitindeki köşe yarıçaplarına uygun olarak seçilir. Her bir kenar için gerekli olan kesici uç belirlendikten sonra takım gövdesi elde edilebilir. Bunun için kesici uç kesme kenarından kesici ucun iç kısmında doğru ofset işlemi yapılır. Daha sonra kesici uçlar açılmal olarak konumlandırılır. Burada iki şeyin sağlanması amaçlanır. Bunlardan biri üst üste gelen kesici uçların konumlarının değiştirilmesidir. Diğeri ise aynı işlemi yapan kesici uç sayısı artırılarak radyal yöndeki kuvvetlerin dengelenmesidir. Ayrıca bu sayede aynı kesme hızı için kesilmemiş talaş kalınlığı azaltılabilir. Son olarak takım gövdesi üzerinde kesici uçların yuvaları oluşturulur.

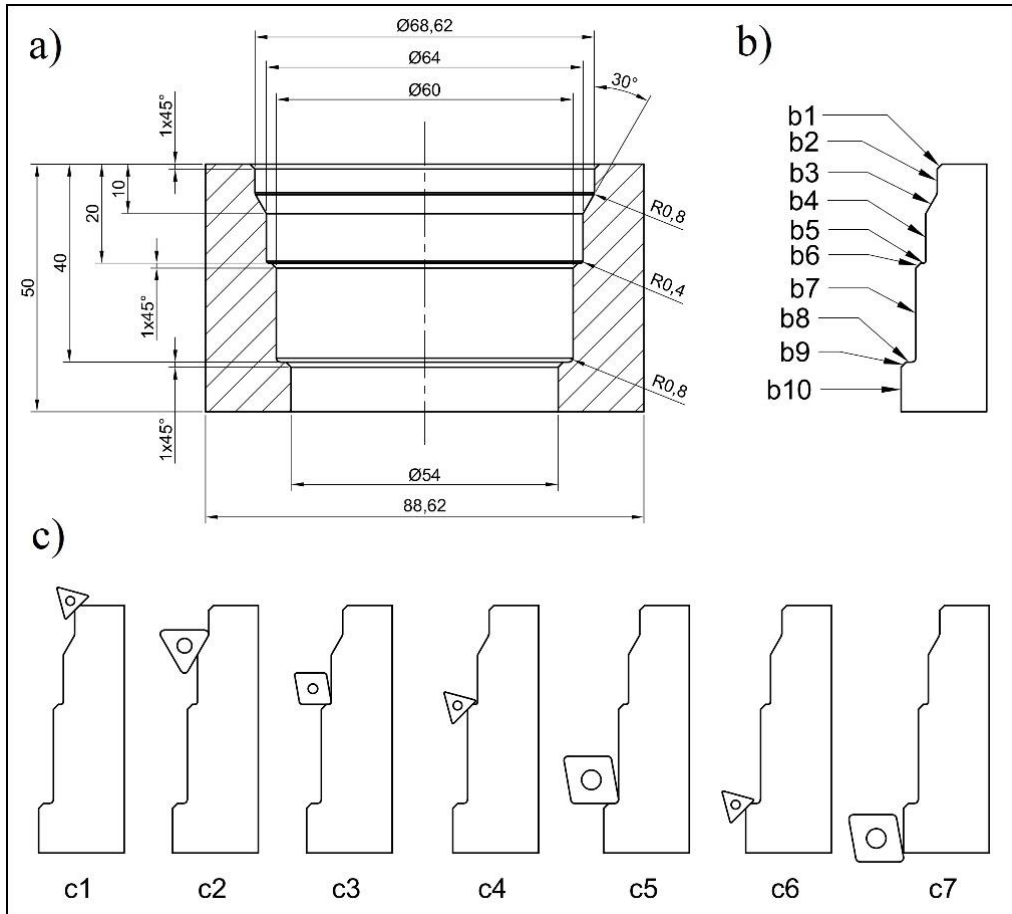


Şekil 10. Tasarım akış şeması.

4. Örnek Uygulama

Kesici uçların yerleşimi için öncelikle kademeli deliğin kesiti alınmalı ve kesit profili elde edilmelidir. Kesit profili oluşturulurken ölçü toleransları göz önünde bulundurularak her bir ölçünün ortalama değeri alınmalıdır. Dar toleranslı ölçüler için kartuşlu kesici uçlar seçilmeli ve mümkünse kaba işleme için kesici uçlar tasarıma dahil edilmelidir. Şekil 11a'da ön delik oluşturulmuş örnek bir kademeli deliğin kesiti gösterilmektedir. Ön delik çapının 50 mm olduğu ve tüm ölçülerin genel toleranslara göre verildiği varsayılmıştır. Bu nedenle kartuş sistemi kullanılmamıştır. Şekil 11b'de ise elde edilen profilin kenarlardan ve köşe yarıçaplarından oluştuğu görülmektedir. Toplam kenar sayısı 10'dur. Köşe yarıçaplarını oluşturmak için ayrıca bir kesici uç

kullanılmamalı ve ilgili kenarı oluşturan kesici uç köşe yarıçapını da oluşturmalıdır. Köşeleri oluşturan kesici uçların yarıçapları istenen ölçülere uygun olarak seçilmelidir. Sadece pah oluşturan kesici uçlar talaş yükü az olduğu için tek olarak yerleştirilebilir. Ancak sadece delik işleyen veya hem delik işleyip hem açılı yüzey oluşturan kesici uçların talaş yükünü de dikkate alarak çift olarak yerleştirilmesi uygun olacaktır. Şekil 11c'de parçanın her bir kısmı işleyecek olan kesici uçların yerleşimi gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi kesici uçlar erişebilecekleri en alt kısımlara yerleştirilmiştir. Tüm kesici uçlar için 7° 'lik yan yüzey açısı seçilmiştir. b1 numaralı kenar pah olduğu için T formulu kesici uç kesit profiline yerleştirilmiştir. Yerleşim c1 ile gösterilmiştir. Boyut seçimi için pah ölçüsü $1 \times 45^\circ$ dikkate alınarak kesme kenarı uzunluğu daha uzun olacak şekilde en küçük boyut olan 06 seçilmiştir. Kesici uç paha göre merkezlenmiştir. Köşe yarıçapı herhangi bir yüzeye temas etmediğinden değerinin bir önemi yoktur. Seçilen kesici ucun kodu TCMT06T102'dir. b6 ve b9 kenarları için aynı kesici uç kullanılmıştır. Yerleşim sırasıyla c4 ve c6'da verilmiştir. Farklı olarak kesici uçların yan kenarlara temasını engellemek için kesici uçlar takım gövdesine doğru bir miktar taşınmıştır.

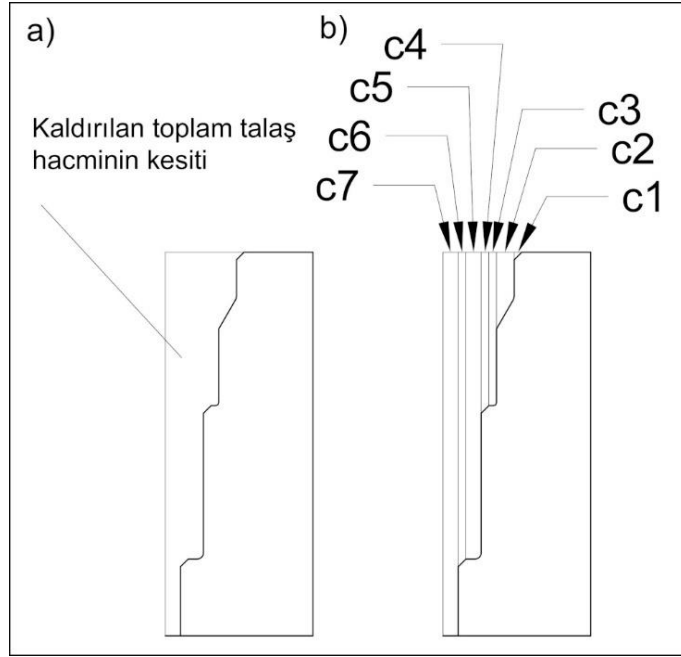


Şekil 11. (a) Örnek kademeli delik. (b) Kesit profilindeki kenarların tanımlanması. (c) Kesici uç yerleşimi.

b2 ve b3 ile gösterilen kenarların aynı kesici uç ile elde edilmesi uygun olacaktır. Çünkü farklı kesici uçlar ile oluşturulduklarında yüzeyde birleşme izi oluşabilir. Bu kısım için T veya S formundaki kesici uçlar kullanılabilir. T formundaki kesici uç için yerleşim c2'de gösterilmektedir. Kesici uç yarıçapı kesit profiline uygun olarak 0.8 mm olarak seçilmiştir. Seçilen kesici ucun kodu TCMT110308'dir. b4 ve b5 ile gösterilen kenarlar aynı şekilde tek kesici uç kullanarak elde edilebilir. Bu kısım için C formundaki kesici uç kullanılmıştır. Kesici uç yerleşimi c3'te gösterilmiştir. Kesici uç yarıçapı kesit profiline uygun olarak 0.4 mm olarak seçilmiştir. Seçilen kesici ucun kodu CCMT060204'tür.

Kesici uç boyutu seçiminde göz önünde bulundurulması gereken tek şey kesme kenarı uzunluğunun yeterli olması değildir. Kesici ucun takım gövdesine mukavim bir şekilde bağlanması da önemlidir. Genel olarak kesici uç boyutu arttıkça bağlantı mukavemeti artmaktadır. Bu durumda kesici uç daha büyük bileşke kesme

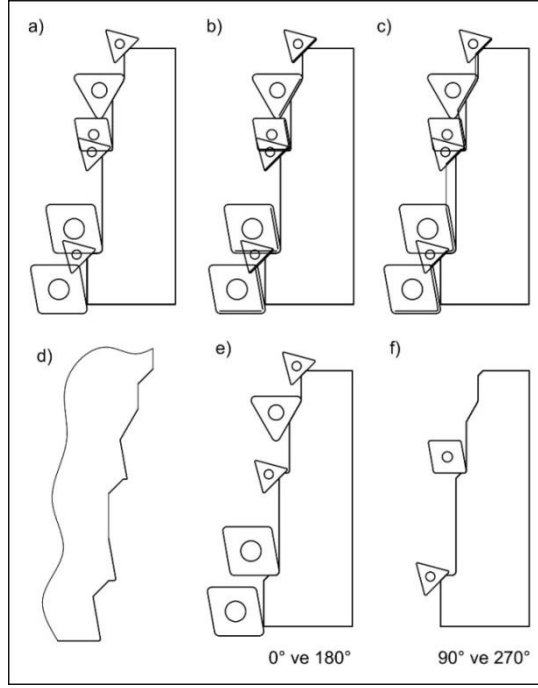
kuvvetlerini karşılayabilmektedir. Hangi kesici ucun daha büyük bileşke kesme kuvvetine maruz kaldığını tespit etmek için paso miktarları göz önüne alınabilir. Şekil 12a'da kaldırılması gereken toplam talaş hacim kesiti verilmektedir. Her bir kesici ucun talaş yükleri Şekil 12b'de verilmektedir. Buna göre c5 ve c7 kısımlarını işleyen kesici uçların paso değerlerinin c3 kısmını işleyen kesici ucun paso değerine kıyasla daha fazla olduğu görülmektedir. Bu nedenle c5 ve c7 kısımlarını işleyen kesici uçların boyutlarının daha büyük seçilmesi uygun olacaktır. b7 ve b8 kenarlarını işleyen kesici ucun yerleşimi c5'te gösterilmiştir. b10 kenarını işleyen kesici uç ise c7'de gösterilmiştir. Her iki yerleşim için seçilen kesici uçlar CCMT 09T308'dir. Burada dikkat edilmesi gereken husus benzer kesici uçların kıyaslanmış olmasıdır. Köşe yarıçapları hariç c3, c5 ve c7 kısımlarını işleyen kesici uçlar dik kesme gerçekleştirmektedir. Ayrıca burada kesme kuvvetini etkileyen tek değişken paso miktarı değildir. Kesici uçların işledikleri çaplar farklı olduğu için kesme hızları değişmektedir. Kesme hızı kesme kuvvet katsayılarını etkilemektedir [20]. Bu örnekte ise delik çapları birbirine yakın olduğundan kesme hızının her bir kesici uç için çok fazla değişmediği kabul edilmiştir.



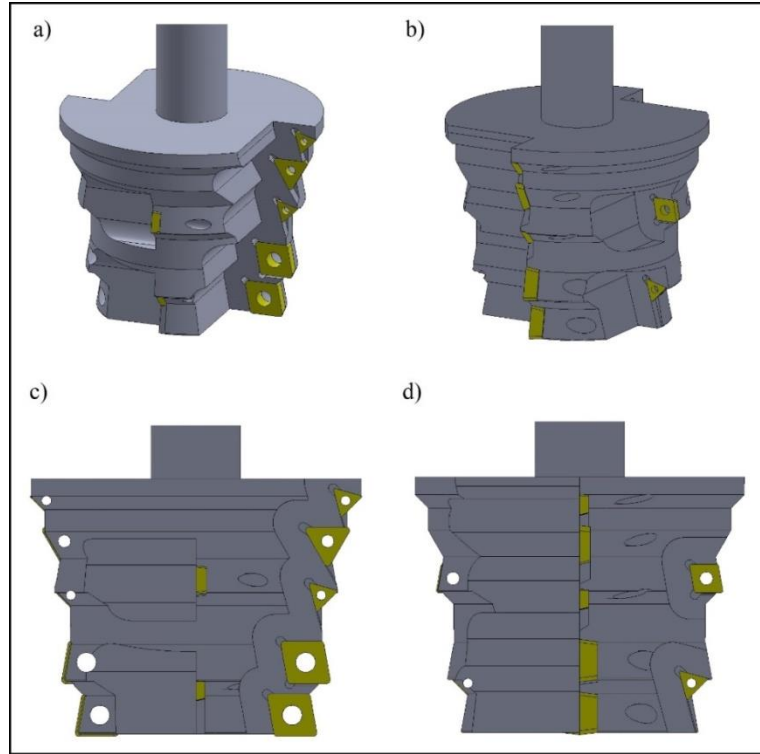
Şekil 12. Kesici uçların talaş yükleri.

Her bir kısım için kesici uç seçildikten sonra kesici uçların takım gövdesine yerleştirilmeleri gerekir. Bunun için öncelikle kesici uçlar tek kesitte incelenir (Şekil 13a). Takım gövdesini elde etmek için ofset değerleri daha önce belirtildiği gibi kesici uç kalınlığı ve yan yüzey açısı kullanılarak hesaplanır. Kesme kenarlarına paralel şekilde ofset ölçüleri girilir (Şekil 13b). Çizgiler birleştirilir ve gereksiz kısımlar kırılır (Şekil 13c). Elde edilen takım gövdesinin kesitinin profili Şekil 13d'de gösterilmektedir. Bu profil delik eksenini etrafında döndürülerek takım geometrisi elde edilir. Eğer üst üste gelen veya birbirlerine çok yakın olan kesici uçlar var ise bunlardan bazılarının açısal konumlarının değiştirilmesi gerekir. İncelenen örnekte bu durum söz konusudur (Şekil 13a). Üst üste gelen kesici uçların açısal konumları değiştirildikten sonra elde edilen son yerleşim Şekil 13e ve f'de gösterilmektedir.

Üst üste gelen kesici uçların yeniden konumlandırılmasından sonra iki açısal konumun yeterli olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle her bir kesici uçtan takım gövdesine 180° açı farkı ile ikişer adet yerleştirilmiştir. Elde edilen son yerleşim Şekil 14a ve b'de gösterilmektedir. Takım çapı arttıkça kesici uçların yerleştirilmesi için gerekli olan yerlerin işlenmesi zorlaşmaktadır. Bunun nedeni kesici uçların takımın dönme ekseninden geçen düzlem üzerinde konumlandırılması gerekliliğidir. Bu nedenle kesici takımların takım gövdesine çarpmamaları için boşluklar gerekmektedir. Bu boşluklar takım tasarımı için gerekli değilken takım imalatı için gereklidir. Şekil 14c ve d'de takım gövdesinde kesici uçların etrafında oluşturulmuş olan boşluklar gösterilmektedir.

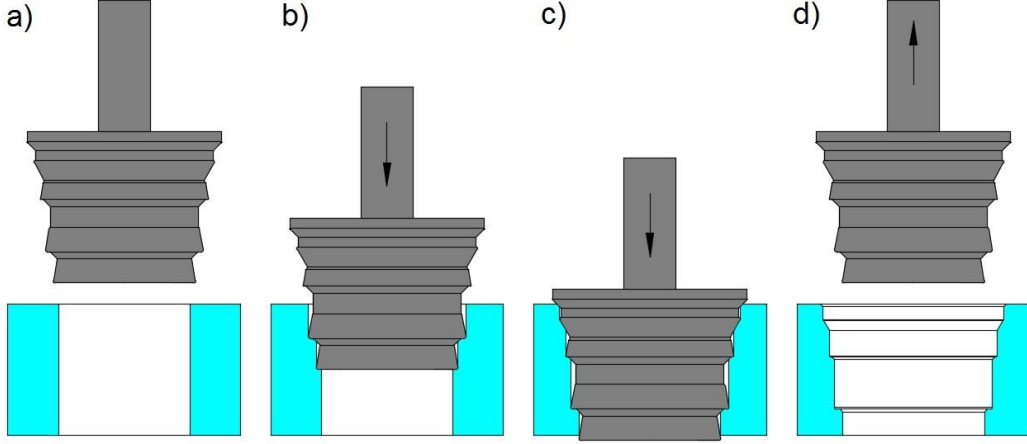


Şekil 13. Takım gövdesinin elde edilmesi. (a) Kesici uçların aynı kesitte gösterimi. (b) Ofset değerlerinin girilmesi. (c) Ofset çizgilerinin birleştirilmesi ve kırılması. (d) Takım kesiti profilinin elde edilmesi. (e,f) Üst üste gelen kesici uçların açılma konumlarının değiştirilmesi.



Şekil 14. (a) ve (b) Kombine kesici takımın tasarım sonrası son hali. (c) ve (d) Kesici uçların yuvalarının oluşturulması için gerekli olan boşluklar.

Elde edilen takımın işlenecek olan parçanın ölçüleri üzerindeki etkisini göstermek için Şekil 15 kullanılmıştır. Şekillerde, kesici takımın herhangi bir açısız konumundaki görüntüsü değil, kesici takımın döndürülmesiyle ortaya çıkan süpürme hacmi gösterilmektedir. Bunun nedeni bazı kesici uçların farklı açısız konumlarda olmalarıdır. Dolayısıyla bir kesit üzerinde işlemi gösterebilmek için takımın süpürme hacmi kullanılmıştır. Şekil 15d’de işlem sonrası parça kesiti gösterilmektedir. Bu kesit elde edilmek istenen parça kesitinin aynısıdır.



Şekil 15. Kademeli deliğin kombine takım ile işlenmesi. (a) Takım başlangıç konumunda, (b) takım işleme sırasında, (c) takım ulaşması gereken son noktada, (d) takım işlem sonrası parçasından uzaklaşıyor.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, kademeli delik teknik resminden başlanarak, kombine delik işleme takımının tasarlanması için sistematik bir yaklaşım sunulmuştur. Kesici uçların seçiminin ve yerleşiminin gerçekleştirilmesi için tasarım ayrıntıları açıklanmıştır. Özellikle kesici uç boyutunun seçilmesinde her bir kesici uca denk gelen talaş yükünün hesaba katılması, takım gövdesi üzerinde bulunan kesici uçların kullanım ömürlerinin kesme hızı farklılığı nedeniyle değişiklik göstermesinin dikkate alınması, kesici uç yarıçapının seçiminde elde edilmesi gereken yüzey pürüzlülüğü değerinin hesaba katılması ve kesici uçlara gelen radyal yöndeki kuvvetlerin dengelenmesi için kesici uçların takım gövdesine eşit açısız aralıklarla yerleştirilmesi bunlardan bazılarıdır. Tüm tasarım süreçleri bir bütün halinde akış şeması üzerinde gösterilmiştir. Örnek bir kademeli delik için kombine delik işleme takım tasarımı yapılmıştır. Buna göre tasarımda aşağıda belirtilen sıranın izlenmesinin uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

- Kademeli delik profilinin ortalama ölçüler alınarak elde edilmesi.
- Kesit profilindeki kenarların ve köşe yarıçaplarının tanımlanması.
- Her bir kenarı işleyecek olan kesici ucun belirlenmesi.
- Kesici uçların kesit profiline yerleştirilmesi.
- Kesici uçların yan yüzey açıları ve kalınlıklarının kullanılmasıyla ofset ölçülerinin bulunması.
- Takım gövdesinin elde edilmesi.
- Üst üste gelen kesici uçların açısız konumlarının değiştirilerek takım gövdesine yerleştirilmesi.
- Kesici uçlar için takım gövdesi üzerinde yuvaların oluşturulması.

Kaynaklar

- [1] Kayır Y, Demirel E, Güneş S. Takma uçlu matkap ve kesme parametrelerinin seçimi için bir uzman sistem. El-Cezeri Journal of Science and Engineering 2018; 5: 797–806.
- [2] Karagöz İ. Kesici takım malzemesi seçiminin kesici takım kaynaklı hatalar üzerindeki etkisinin incelenmesi. Kalıp Dünyası Dergisi 2012; 76: 118–23.
- [3] Pamukoğlu U, Göloğlu C. Delik işlemleri için maliyet merkezli bir sistem. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 2004; 10: 31–9.

- [4] Yağmur S, Adem A, Şeker U. AISI 1050 çeliğinin delinmesinde kesme parametrelerinin ve kaplama uygulamasının dairesellikten sapma (ovalite) üzerindeki etkilerinin araştırılması. *Politeknik Dergisi* 2013; 16: 105–9.
- [5] Kim KH, Cho CH, Jeon SY, Lee K, Dornfeld DA. Drilling and deburring in a single process. *Proc. Inst. Mech. Eng., Part B: J. Eng. Manuf.* 2003; 217: 1327–31.
- [6] Gürbüz H, Şeker U, Kafkas F. AISI 316L çeliğinin tornalanmasında kesici takım formlarının yüzey bütünlüğü üzerine etkisi. *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.* 2020; 35: 225–40.
- [7] Çaydaş U, Çelik M. AA 7075-T6 alaşımının delinmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, takım sıcaklığı ve ilerleme kuvvetine etkilerinin araştırılması. *Politeknik Dergisi* 2017; 20: 419–25.
- [8] Smith GT. *Cutting tool technology: industrial handbook*. Springer Science & Business Media; 2008.
- [9] Panickar M, Mate DM. Design & analysis of multiple operational tool holder with considering the plain drilling & boring operation under maximum torque conditions. *Mater. Today: Proc.* 2021; 43: 2397–403.
- [10] Song Q, Shi J, Zhanqiang L, Wan Y, Xia F. Boring bar with constrained layer damper for improving process stability. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2015; 83. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7670-5>.
- [11] Atabey F, Lazoglu I, Altintas Y. Mechanics of boring processes—Part I. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2003; 43: 463–76. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00276-6](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00276-6).
- [12] Atabey F, Lazoglu I, Altintas Y. Mechanics of boring processes—Part II—multi-insert boring heads. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2003; 43: 477–84.
- [13] Lazoglu I, Atabey F, Altintas Y. Dynamics of boring processes: Part III-time domain modeling. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2002; 42: 1567–76. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00067-6](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00067-6).
- [14] Senbabaoglu F, Lazoglu I, Ozkeser SO. Experimental analysis of boring process on automotive engine cylinders. *The Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2010; 48: 11–21.
- [15] Lawrance G, Paul PS, Varadarajan AS, Vasanth XA, Raj SB. Suppression of tool vibration in boring process: a review. *J. Inst. Eng. (India): Series C* 2019; 100: 1053–69.
- [16] Vieira JT, Pereira RBD, Freitas SA, Lauro CH, Brandão LC. Multi-objective robust evolutionary optimization of the boring process of AISI 4130 steel. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2021; 112: 1745–65.
- [17] Lawrance G, Paul PS, Varadarajan AS, Praveen AP, Vasanth XA. Attenuation of vibration in boring tool using spring controlled impact damper. *Int. J. Interact. Des. Manuf. (IJIDeM)* 2017; 11: 903–15.
- [18] ISO 1832:2017. Indexable inserts for cutting tools - Designation n.d.
- [19] Singh D, Rao PV. A surface roughness prediction model for hard turning process. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2007; 32: 1115–24.
- [20] Grossi N, Sallese L, Scippa A, Campatelli G. Speed-varying cutting force coefficient identification in milling. *Precis. Eng.* 2015; 42: 321–34. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2015.04.006>.

Şeker Pancarı Melasından Escherichia coli KO11 Suşu ile Biyoetanol Üretimi: Enzimatik Hidroliz ve Kesikli Fermantasyon

Nur Kevser DOĞAN¹, Mehmet KALENDER^{2*}

^{1,2} Biyomühendislik, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

¹ nurkevserd@gmail.com, ^{2*} mkalender@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 12/08/2022;

Kabul/Accepted: 08/11/2022)

Öz: Bu çalışmada, şeker pancarı melasından fermantasyonla biyoetanol üretimi incelenmiştir. Bu amaçla, iki aşamalı deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir: Melasın enzimatik hidrolizi ile basit şekerlerin üretilmesi ve hidrolizattan E.coli KO11 ile biyoetanol üretilmesi. Enzimatik hidroliz deney parametreleri (melas konsantrasyonu, enzim konsantrasyonu ve süre) cevap yüzey metodu (RSM) ile optimize edilmiştir. Cevap değişkeni olarak indirgen şeker konsantrasyonu seçilmiştir. Fermantasyon deneyleri aneorobik kesikli sistemde yürütülmüştür. RSM-ANOVA testleri ile enzimatik hidroliz için kuadratik modelin en uygun model olduğu belirlenmiştir. İncelenen tüm bağımsız değişkenlerin model üzerinde etkili olduğu, ikili etkileşimlerden sadece konsantrasyon-süre ikili etkileşiminin model üzerinde etkili olmadığı ve süre kuadratik etkisinin önemli olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır. Enzimatik hidroliz için optimum deneysel parametre değerleri 87,7 g/L melas konsantrasyonu, %0,45 (v/v) enzim konsantrasyonu ve 15,93 saat olarak belirlenmiştir. Optimum şartlarda melastaki sakarozun yaklaşık %96'sı enzimatik hidrolizle basit şekerlere dönüştürülmüştür. Fermantasyon deneyleri sonucunda, 24. Saat sonunda maksimum biyoetanolün 0,489 g/g verimle üretildiği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Biyoetanol, şeker pancarı melası, enzimatik hidroliz, optimizasyon, kesikli fermantasyon.

Bioethanol Production from Sugar Beet Molasses using *E. coli* KO11 Strain: Enzymatic Hydrolysis and Batch Fermentation

Abstract: In this study, bioethanol production from sugar beet molasses was investigated. For this purpose, Experiments consisting of two stages were carried out: Production of simple sugars by enzymatic hydrolysis of molasses and production of bioethanol from the hydrolysate with E.coli KO11. The enzymatic hydrolysis experimental parameters (molasses concentration, enzyme concentration, and time) were optimized using response surface method (RSM). The response variable was reducing sugar concentration. The fermentation experiments were conducted in anaerobic batch system. RSM-ANOVA tests showed that the quadratic model is the best model. It was concluded that all the independent variables examined were effective on the model, only the concentration-time binary interaction was not effective on the model, and the time quadratic effect was important. Optimum experimental parameter values for enzymatic hydrolysis were determined as 87,7 g/L molasses concentration, %0,45 (v/v) enzyme concentration, and 15,93 hours. At optimum conditions, sucrose in the molasses was converted to simple sugars with yield as approximately 96%. As a result of the fermentation experiments, it was determined that the maximum bioethanol was produced with a yield of 0.489 g/g at the end of the 24th hour.

Key words: Bioethanol, sugar beet molasses, enzymatic hydrolysis, optimization, batch fermentation.

1. Giriş

Son yıllarda küresel ısınma ve iklim değişikliği dünyada yoğun olarak tartışılmaktadır. Araç ve fabrikalardan salınan gazlardan dolayı hava kirliliği bu tür problemlere yol açan nedenlerdendir. Fosil yakıt kullanarak çalışan araçlar ve sanayi faaliyetlerindeki artış hava kirliliğine doğrudan katkıda bulunmaktadır. Önemli oranda nüfus artışı ile birlikte kentsel hareketliliği artacağından dolayı ulaşım araçlarının sayısında bir azalış zor gözükmemektedir. Fosil yakıtların bu zararlı etkilerinin yanında, kullanım sonucu kaynak tükenmesi ve fiyat dalgalanmaları da karşılaşılan önemli başka sorunlardır [1]. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde, küresel ısınma ve iklim değişikliği ile mücadelede çeşitli protokollere katılma ve uygulama zorunlulukları getirilmiş ve getirilmeye devam etmektedir. Bu tür bir uygulamaya son zamanlarda verilebilecek bir örneği, Avrupa Yeşil Mutabakatına göre 2050 yılına kadar sera gazı salınımının sıfıra indirgenmesidir [2]. Çevre açısından fosil yakıtlara alternatif yeni enerji kaynağı geliştirme zorunluluğunun, farkındalık oluşması seviyesinde olduğu düşünülmektedir. Yenilenebilir olarak da adlandırılan bu tür enerji türleri başlıca biyokütle, güneş, rüzgâr, jeotermal ve hidroelektrik olmak üzere sınıflandırılabilir. Dünyada mevcut yenilenebilir enerji kaynaklarının yaklaşık %73'lük gibi büyük bir kısmını

* Sorumlu yazar: mkalender@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0003-0155-207X, ² 0000-0002-8932-8840

biyoyakıtlar oluşturmaktadır [3]. İktisadi İşbirliği ve Gelişme Teşkilatı (OECD) raporuna göre, 2050'ye kadar, küresel taşımacılıkta biyoyakıtların kullanım payının %15-23 arasında olacağı öngörülmektedir [4]. Biyoyakıtlar son ürünün özelliğine göre katı, sıvı ve gaz halde bulunabilir.

Günümüzde, petrol ürünlerine alternatif olabilecek biyoyakıtlar çoğunlukla biyoetanol, biyodizel ve biyohidrojen [4]. Biyoetanol basit şeker ya da belirli yöntemlerle basit şeker elde edilebilecek hammaddeden mikrobiyal fermantasyon ile üretilen etil alkol olarak tanımlanabilir. Kimyasal yöntemlerle elde edilen etil alkolden farkı olmayan biyoetanolün kimyasal formülü de aynıdır [5]. Benzinde sınırsız çözünürlük, oksijenli yakıt, yüksek oktan, düşük setan sayıları ve elverişli otomatik ateşleme sıcaklığı gibi birçok avantajıyla biyoetanol, benzinli ve dizel araçlarda kullanılabilir [1, 6]. Bu özellikleri ile gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde, yasal düzenlemelerle, biyoetanolün petrol türevli yakıtlara belirli oranlarda karıştırılarak kullanılması gün geçtikçe artmaktadır [7]. Elektrikli araçlar da dahil yakıt performanslarının karşılaştırıldığı bir çalışmada en avantajlı aracın biyoetanol kullanılan araç olduğu sonucuna ulaşılmıştır [8]. Amerika Birleşik Devletleri (ABD), Brezilya, Çin ve Avrupa Birliği (AB) gibi ana üretici ülkeleri tarafından küresel biyoetanol üretiminin 2019 yılında yaklaşık 30 milyar galona ulaştığı rapor edilmiştir [9].

Öte taraftan, etil alkol sağlık başta olmak üzere birçok alanda dezenfektan olarak geniş bir kullanım alanına sahiptir [10]. Dünyada olduğu gibi ülkemizde de, 2019 yılındaki COVID-19 pandemik şartlarda sterilizasyon ve dezenfeksiyonda kullanılan en önemli ajanlardan bir olan etil alkol tedarik zincirinde büyük problemler ortaya çıkmıştır. Bu kapsamda, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK)'nın 13 Mart 2020'de alınan kararı gereği benzine %3 oranında Biyoetanol Harmanlanması Düzenlemesi 3 aylığına askıya alınmıştır [11]. Görüldüğü üzere biyoetanol birçok alanda kullanımı olan değerli bir maddedir.

Biyoetanol, hammadde kaynağına bağlı olarak 4 kategoride üretilmektedir: birinci nesil (şeker kamışı, şeker pancarı, mısır, pirinç, buğday gibi yenilebilir materyaller), ikinci nesil (lignoselülozik materyaller) ve üçüncü nesil (algal biyokütle) [12, 13]. Şeker pancarı melası yaklaşık olarak %50 oranında sakaroz içerir ve ikinci ve üçüncü nesil biyoetanol üretim kaynaklarına göre ön işlem aşamalarına gerek duyulmadan direkt olarak fermantasyonda kullanılabilir. Fakat, sakarozu direkt olarak fermente edemeyen mikroorganizmalar için sakarozu glikoz ve früktoza dönüştüren bir hidroliz işlemine ihtiyaç duyulabilir [14]. Hidroliz işlemine yaygın olan yöntemler asidik ve enzimatik hidrolizlerdir [1, 15].

Biyoetanol üretiminde hidroliz sonrası gerçekleştirilen fermantasyon aşamasında en çok kullanılan mikroorganizmalar *Saccharomyces cerevisiae*, *Zymomonas mobilis*, ve rekombinant *Escherichia coli* dir. Maya sadece 6 karbonlu şekerleri fermente edebilir. *Z. mobilis* ise fermantasyon ortamlarında çok dayanıklı bir mikroorganizma değildir. Rekombinant *E. coli* KO11 hem ortam dayanıklılığı hem de 5 ve 6 karbonlu şekerleri aynı anda metabolize edebilme özellikleri ile biyoetanol üretiminde tercih edilebilecek bir suştur [16, 17].

Bu çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, şeker pancarı melasının enzimatik hidroliz şartları Cevap Yüzey Yöntemi (RSM) ile optimize edilmiştir. İkinci aşamada optimum şartlardaki hidrolizattan rekombinant *E. coli* KO11 kullanarak kesikli sistemde biyoetanol üretimi incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Deneyel çalışmalarda kullanılan *E. coli* KO11 suşu Bölümümüzde mevcut olup American Type Culture Collection ATCC hücre kültür koleksiyonundan satın alınmıştır. Fermantasyon çalışmalarında kullanılan şeker pancarı melası Elazığ Şeker fabrikasından temin edilmiştir. Optimizasyon çalışmalarında 2000 U/g aktiviteye sahip invertaz enzimi (Tito NT91) 20 kat seyreltilerek kullanılmıştır.

2.2. Mikroorganizma suşunun canlandırılması ve saklanması

Deneyel çalışmalarda kullanılan suşun canlandırılması ve muhafazasında, satın alımın yapıldığı ATCC şirketinin web sayfasında tavsiye edilen ortamlardan yararlanılmıştır [18]. Liyofilize haldeki suş aseptik koşullarda %0,9'luk NaCl çözeltisi içerisine alınmıştır. Suş ortamı 20 g/L glikoz, 5 g/L maya ekstraktı, 10 g/L pepton, 5 g/L NaCl, 15 g/L agar ve 40 mg/L kloramfenikol içeriğindeki modifiye katı Luria-Berttani (LB) bulunduran petri kaplarına ekilmiştir. Çoğalan rekombinant bakteri, 250 ml'lik erlen de 50 ml çalışma hacminde olan sıvı LB ortamına aktarılmıştır. 37 °C'de 100 rpm ve 16 saat süreyle İnkübasyon işlemi sonrasında çoğalan mikroorganizmalar %60'lık gliserol içeren mikrosantrifüj tüplerine alınarak -80 °C'de stok olarak muhafaza edilmiştir.

2.3. Enzimatik hidroliz ve optimizasyon çalışmaları

Enzimatik hidrolizle şeker pancarı melasındaki sakarozun glikoz ve früktoza parçalanması deneysel şartları RSM ile merkezi kompozit dizayn (MKD) kullanılarak optimize edilmiştir. Bu amaçla, melas konsantrasyonu, enzim konsantrasyonu ve hidroliz süresi bağımsız değişkenler; hidrolizattaki indirgen şeker ve dönüşmeyen sakaroz konsantrasyonları ise cevap değişkeni olarak kullanılmıştır. RSM ile oluşturulan kodlu değerler tablosu Tablo 1’de, MKD ile tasarlanan deneysel parametreler ve deney şartları ise Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 1. Şeker pancarı melasının enzimatik hidrolizi için RSM ile oluşturulan bağımsız değişkenlere ait kodlu değerler tablosu

Faktör	Değişkenler	- α	-1	0	+1	+ α
A	Melas konsantrasyonu (g/L)	50	70,27	100	129,73	150
B	Enzim konsantrasyonu (% v/v)	0,1	0,282	0,55	0,817	1
C	Süre (saat)	2	4,46	13	19,54	24

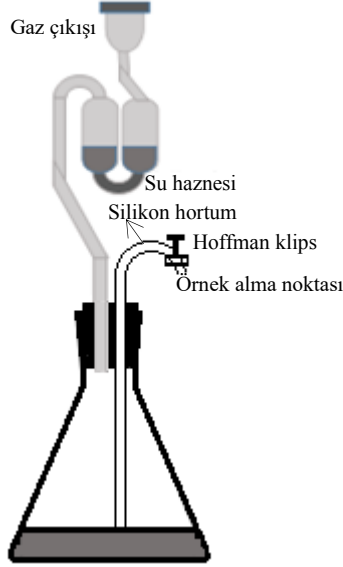
Tablo 2. MKD ile tasarlanan deney tablosu

Deney No	A: Melas Konsantrasyonu (g/L)	B: Enzim Konsantrasyonu (% v/v)	C: Süre (saat)
1	70,27	0,28	6,46
2	129,73	0,28	6,46
3	70,27	0,82	6,46
4	129,73	0,82	6,46
5	70,27	0,28	19,54
6	129,73	0,28	19,54
7	70,27	0,82	19,54
8	129,73	0,82	19,54
9	50,00	0,55	13,00
10	150,00	0,55	13,00
11	100,00	0,10	13,00
12	100,00	1,00	13,00
13	100,00	0,55	2,00
14	100,00	0,55	24,00
15	100,00	0,55	13,00
16	100,00	0,55	13,00
17	100,00	0,55	13,00
18	100,00	0,55	13,00
19	100,00	0,55	13,00
20	100,00	0,55	13,00

2.4. Fermantasyon deneyleri

Enzimatik hidrolizle optimum şartlarda elde edilen hidrolizat 20,24 g/L indirgen şeker içerecek şekilde seyreltilmiştir. Seyreltilen hidrolizat ortamı steril edilmek üzere 121 °C’de 15 dak. otoklavlanmıştır. Hidrolizatların pH’ı 5 M NaOH çözeltisi ile 6’ya ayarlanmıştır. Rekombinant suşun uygun şartlarının sağlanması için hidrolizatlara antibiyotik olarak kloramfenikol, 5 g/L maya ekstraktı, 10 g/L pepton ve 5 g/L NaCl ilave edilmiştir. Fermantasyon çalışmalarında bakteri gelişim ortamı için de suşun satın alındığı şirketin web sayfasında tavsiye edilen şartlardan yararlanılmıştır [18]. Steril hidrolizat kullanarak rekombinant E. Coli KO11 ile fermantasyonla biyoetanol üretim çalışmaları kesikli sistemde anaerobik şartlarda yürütülmüştür. Kesikli fermantasyon deneyleri

temsili bir şekli Şekil 1’de gösterilen deney setinde, CO₂ çıkışına izin veren ağızı kapalı anaerobik şartların sağlandığı 250 ml’lik erlenlerde 50 ml’lik çalışma hacminde, 37°C’de çalkalamalı inkübatörde 100 rpm karıştırma hızında gerçekleştirilmiştir. Fermantasyon deneylerinde, belirli sürelerde, steril şartlar sağlanarak alınan örneklerde GC ile alkol analizleri yapılmıştır.



Şekil 1. Fermantasyon çalışmalarının gerçekleştirildiği temsili bir şekil.

2.5. Şeker analizleri

Şeker analizleri yüksek basınçlı sıvı kromatografisi (HPLC) tekniği ile gerçekleştirilmiştir. HPLC kolonu ICE-COREGEL-87H3 (300 mm uzunluk, 7.8 mm çap, 20.0 ul hacim) idi. Kolon sıcaklığı 45 °C olup, kolonda taşıyıcı sıvı olarak 0,6 mL/dak. akış hızındaki 5 mM’lık H₂SO₄ çözeltisi kullanılmıştır. Şeker analizi yapılacak olan hidrolizat ve fermantasyon ortamları, analizlerden önce 0,45 µm’lik filtrelerden geçirilmiştir. Analizlerde örnek hacmi 1 µL’dir.

2.6. Alkol analizleri

Alkol analizleri gaz kromatografisinde (GC) BP20 kolon (25 m uzunluk, 0,32 mm çap, 0,25 µm film kalınlığı) kullanılarak, kolon sıcaklığı 140 °C ‘de 6 mL/dak. taşıyıcı gaz (azot) akış hızıyla gerçekleştirilmiştir. Enjeksiyon hacmi 1 µL’dir. Alkol analizi yapılacak örnekler de 0,45 µm’lik filtrelerden geçirilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Enzimatik hidroliz için optimizasyon sonuçları

Design Expert ile lineer, iki faktöriyel etkileşim, kuadratik ve kübik eşitlikleri kullanılarak gerçekleştirilen analizler sonucu, program tarafından cevap değişkenlerini incelenen bağımsız değişkenlere bağlayan bir model eşitliği önerilmiştir. En önemli modelin kuadratik etkileşim eşitliği olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Kuadratik etkileşim için ANOVA test sonucu Tablo 3’te verilmiştir. Tablo 3’ten görüldüğü gibi önerilen model için p değeri (<0,0001) 0,05’ten küçüktür. Bu, program tarafından önerilen modelin önemli olduğunun göstergesidir. RSM ile gürültü nedeniyle 96,70 kadar büyük bir F değerinin ortaya çıkma olasılığının yalnızca %0.01 olduğu sonucu da elde edilmiştir. Tablo 3’ten model üzerinde etkili olan parametre ve etkileşimlerin p-değeri 0,05’ten küçük olan A, B, C, AB, AC ve C² olduğu anlaşılmaktadır. Görüldüğü gibi incelenen tüm bağımsız değişkenler model üzerinde etkilidir. İkili etkileşimlerden ise enzim konsantrasyonu-süre etkileşimi hariç diğer ikili etkileşimin model üzerinde etkili olduğu Tablo 3’ten açıkça görülmektedir. Ayrıca, kuadratik etkinin model denkleminde önemli

olduğu tek parametre süredir. Modelde önemi olmayan parametreler çıkarılarak yapılan RSM-MKD analizi sonucu elde edilen model uyumluluğuna ait istatistiksel parametreler Tablo 4'te verilmiştir. Tablo 3.2'den görüldüğü üzere R^2 değeri 0,9859 olup, bu model uyumluluğunun iyi olduğunu gösterir. Adj R^2 ve Pred R^2 arasındaki fark (0,028) 0,2'den küçük olduğundan, bu iki parametre uyumludur. Kesinlik oranı değeri sinyal-gürültü oranını ölçer ve bu değer 4'ten büyük olması istenir. Tablo 4'ten görüldüğü üzere bu oran 41,531 dir ve 4'ten büyüktür. Bu ise, RSM ile önerilen modelin tasarım alanında gezinmek için kullanılabilir olduğunun göstergesidir [19]. Tablo 4'te 4,42 olarak elde edilen CV% değeri %10'dan düşük olduğundan, önerilen model tekrarlanabilirliğinin yüksek olduğu söylenebilir [20].

Tablo 3. RSM ile elde edilen ANOVA test sonuçları

Kaynak	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-değeri	p-değeri	
Model	3820,13	424,46	96,70	<0,0001	<u>Önemli</u>
A- Melas Kons.	2856,90	2856,90	650,86	<0,0001	
B-Enzim Kons.	97,54	97,54	22,22	0,0008	
C-Süre	347,28	347,28	79,12	<0,0001	
AB	149,45	149,45	34,05	0,0002	
AC	108,34	108,34	24,68	0,0006	
BC	9,93	9,93	2,26	0,1635	
A ²	0,81	0,81	0,18	0,6769	
B ²	0,0045	0,0045	0,00102	0,9751	
C ²	247,74	247,74	96,70	<0,0001	

Tablo 4. RSM ile uygunluk testine ait istatistiksel parametre değerleri

Standart Sapma	2,05	R^2	0,9859
Ortalama	46,34	Adj R^2	0,9793
Varyans Katsayısı (C.V) %	4,42	Pred R^2	0,9512
PRESS	188,46	Kesinlik oranı	41,531

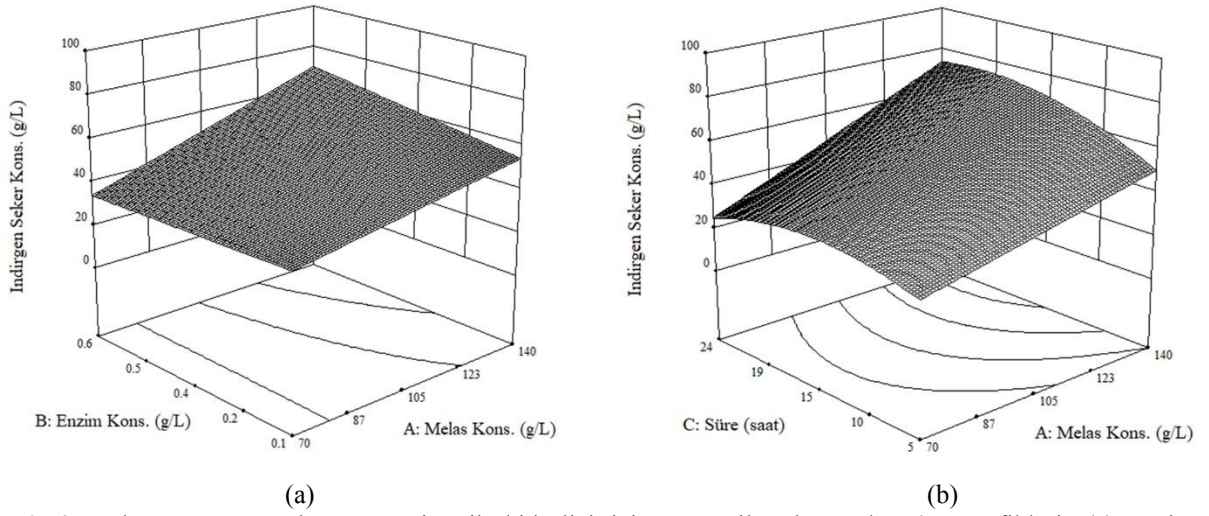
RSM-MKD analizleri sonucunda cevap değişkeninin bağımsız değişkenlerle değişimini gösteren eşitlik gerçek değerler cinsinden aşağıda verilmiştir:

$$\text{İŞK} = 23,173 - 0,0583c_M - 44,344c_E + 1,386t + 0,543c_Mc_E + 0,019c_Mt - 0,096t^2 \quad (1)$$

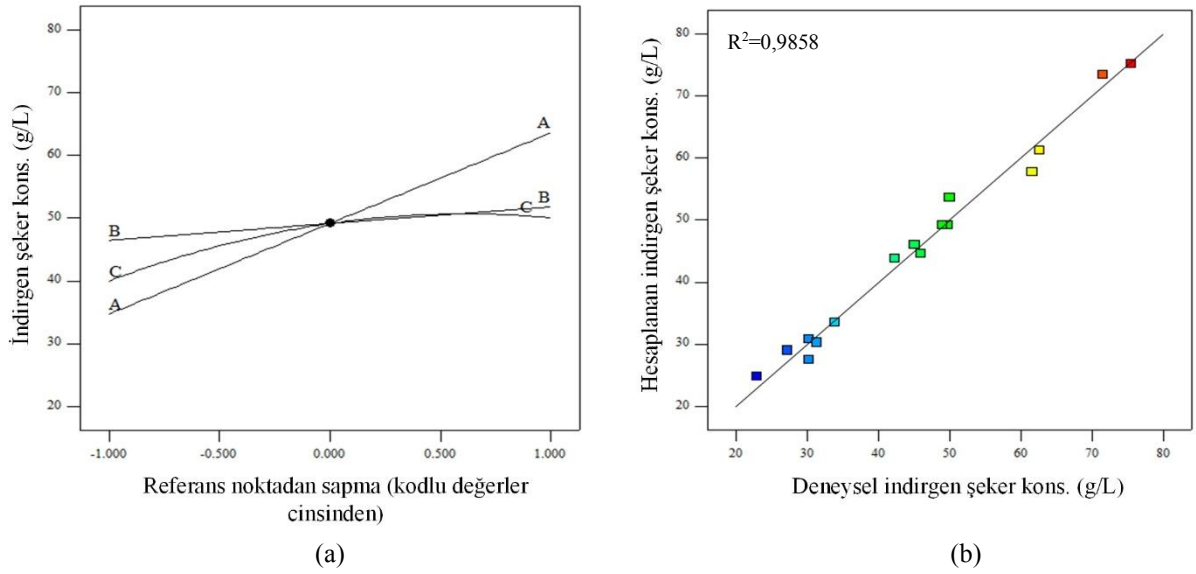
Burada, İŞK indirgen şeker konsantrasyonu (g/L), c_M melas konsantrasyonu (g/L), c_E enzim konsantrasyonu (%v/v) ve t süre (saat) dir.

Desing Expert programı ile bağımsız değişkenlerin cevap değişkeni üzerindeki etkilerini gösteren 3D grafikler de oluşturulabilir. Bu şekilde model üzerinde önemli olan parametreler için oluşturulan 3D grafikleri Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekil 2a'da gösterilen enzim konsantrasyonu-melas konsantrasyonu ikili etkileşim grafiğinden görüldüğü gibi, indirgen şeker konsantrasyonu melas konsantrasyonu arttıkça belirgin bir şekilde artmaktadır. Ayrıca, düşük melas konsantrasyonu değerlerinde ortamda bulunan sakarozun indirgen şekerlere dönüşümü içi en düşük enzim konsantrasyonun dahi yeterli olduğu, buna karşılık yüksek melas konsantrasyonlarında indirgen şekerlere dönüşümün enzim konsantrasyonu artışıyla arttığı gözlenmiştir. Tablo 3'te verildiği gibi, melas konsantrasyonu ve süre için <0,0001 gibi düşük p-değerleri elde edilirken, enzim konsantrasyonu için p-değerinin 0,0008 olması bu sonucu desteklemektedir. Süre-melas konsantrasyonu ikili etkileşiminin indirgen şeker üretimi üzerine etkisinin gösterildiği Şekil 2b'de melas konsantrasyonu artışının indirgen şeker verimini belirgin olarak arttırdığı burada da gözlenmektedir. Düşük melas konsantrasyonu değerlerinde, artan süre ile indirgen şeker konsantrasyonunun yaklaşık 18. saate kadar arttığı, bu süreden sonra sabit kaldığı Şekil 2b'den gözlenen bir diğer sonuçtur. Benzer bir değişimin, daha belirgin bir şekilde, yüksek melas konsantrasyonları için de elde edildiği söylenebilir. RSM ile oluşturulan pertürbasyon grafiği ve cevap

değişkeninin deneysel değerlerine karşılık model denkleminde hesaplanmış değer değişimini gösteren grafik Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekil 3a'da gösterilen pertürbasyon grafiğinden, melasın enzimatik hidrolizi ile elde edilen indirgen şeker konsantrasyonunun, bağımsız değişkenlerin çalışılan aralıklarında, melas konsantrasyonu ile lineer olarak arttığı anlaşılmaktadır. Benzer bir değişim enzim konsantrasyonu için çok daha düşük bir artış oranıyla gerçekleşmektedir. Sürenin indirgen şeker üretimi üzerindeki etkisini gösteren pertürbasyon eğrisinden yüksek enzimatik muamele sürelerinde indirgen şeker konsantrasyonunun sabit değer aldığı görülmektedir. Kuadratik etkinin sadece süre (C) parametresinde önemli olduğu belirlenen ANOVA tablosu (bkz. Tablo 3 p değerleri) bu sonucu desteklemektedir. Deneysel indirgen şeker konsantrasyonu ile model kullanılarak hesaplanan indirgen şeker konsantrasyonu değişimi, Şekil 3b'de gösterildiği gibi, diagonal üzerindedir. Bu durum, deneysel ve hesaplanmış cevap değişkeni değerlerinin uyumlu olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 2. Şeker pancarı melasının enzimatik hidrolizi için RSM ile oluşturulan 3D grafikleri: (a) enzim konsantrasyonu-melas konsantrasyonu, (b) süre-melas konsantrasyonu etkileşimleri



Şekil 3. Şeker pancarı melasının enzimatik hidrolizi için RSM ile oluşturulan pertürbasyon (a) ve deneysel-hesaplanan indirgen şeker konsantrasyonu (b) grafikleri

RSM analizleri sonucu program tarafından önerilen deneysel çalışma şartları 87,7 g/L melas konsantrasyonu, %0,45 (v/v) enzim konsantrasyonu ve 15,93 saattir. Bu şartlarda elde edilen indirgen şeker konsantrasyonu 43,936 g/L ve sakaroz konsantrasyonu 1,879 g/L'dir. Önerilen şartlarda gerçekleştirilen doğrulama deneyi ile elde edilen sonuçlar ise 41,88 g/L indirgen şeker ve yaklaşık 2 g/L sakarozdur. Görüldüğü gibi doğrulama deneyi ile model sonucu oldukça uyumludur. Enzimatik hidroliz ile melas içeriğindeki sakarozu enzimatik hidrolizle basit şekerlere dönüştürülmesine yönelik yapılan bir çalışmada elde edilen sonuçlarla, bu çalışmadaki sonuçlar uyum içerisindedir [21].

3.2. Biyoetanol üretim sonuçları

Şeker pancarı melasının enzimatik hidrolizi sonrası, aneorobik ortamda rekombinant *E. Coli* KO11 ile yürütülen fermentasyon deneyleri ile biyoetanol üretilmiştir. Zamanla üretilen alkol konsantrasyonu ölçüm deneylerinden maksimum biyoetanol konsantrasyonuna (9,9 g/L) 24. Saatte ulaşılmıştır. Bu süreden sonra biyoetanol üretiminde az da olsa bir düşüş meydana gelmiştir. Bu düşüşün sebebinin, fermentasyon sonucunda şekerin glukonik asit gibi asit yan ürünlere dönüşmesi olduğu düşünülmektedir [22]. Biyoetanol üretim verimi g/g olarak aşağıdaki formülle hesaplanabilir [23, 24]:

$$\text{Biyoetanol üretim verimi} = \frac{\text{Maksimum üretilen biyoetanol konsantrasyonu} \left(\frac{g}{L}\right)}{\text{Tüketilen şeker konsantrasyonu} \left(\frac{g}{L}\right)} \quad (2)$$

Denklem (2) kullanılarak hesaplanan biyoetanol üretim verimi 0,489 (g/g) olarak hesaplanmıştır. Tablo 5'te *E.coli* KO11 ile daha önce yapılan bazı çalışmalarda farklı karbon kaynaklarından üretilen ve bu çalışmada üretilen biyoetanol verim değerleri verilmiştir. Tablo 5 incelendiğinde, *E. coli* KO11 kullanılarak farklı karbon kaynaklarından üretilen biyoetanol verimleri içerisinde bu çalışmadaki değer en yüksek olduğu açıkça görülmektedir.

Tablo 5. Daha önce yapılmış bazı çalışmalarda ve bu çalışmada *E. coli* KO11 kullanılarak farklı karbon kaynaklarından elde edilen biyoetanol verim değerleri

Karbon kaynağı	Hidroliz türü	Optimum fermentasyon süresi (saat)	Verim (g EtOH/g indirgen şeker)	Referans
Pirinç kabuğu ve pamuk	Asidik	72	0,413-0,440	[23]
LB besi yeri (glikoz ve ksiloz)	-	Glikoz için 48 Ksiloz için 72	0,372-0,425	[25]
Atık evsel ahşap	Buhar patlatma ve asidik	40	0,420	[26]
Arabinoz, glikoz ve ksiloz	-	57	0,46-0,47	[27]
Şeker pancarı küspesi	Asidik+Enzimatik	48	0,4	[28]
Sükroz ilave edilen şeker kamışı melası	-	96	Çok düşük*	[29]
Şeker pancarı melası	Enzimatik	24	0,489	Bu çalışma

* Bu çalışmada elde edilen sonuç alkol konsantrasyonu olarak verilmiştir. Tüketilen şeker konsantrasyonu bilinmediğinden g/g olarak verim hesaplanamamıştır. Fakat, etanol üretiminin çok düşük olduğu ve daha çok laktik asit üretildiği bildirilmiştir.

4. Genel Sonuçlar ve Öneriler

Şeker pancarı melasının enzimatik hidrolizi ile elde edilen hidrolizattan rekombinant *E. coli* KO11 kullanılarak biyoetanol üretiminin incelendiği bu çalışmada, enzimatik hidroliz için optimum deneysel çalışma şartları 87,7 g/L melas konsantrasyonu, %0,45 (v/v) enzim konsantrasyonu ve 15,93 saat olarak belirlenmiştir. Bu şartlarda, melastaki sakaroz ağırlıkça yaklaşık %96'lık bir verim değeri ile fermente edilebilir şekerlere dönüştürülmüştür. Hidrolizattan çalışılan suş ile 0,489 g/g verim değeri ile maksimum biyoetanol üretilmiştir. Bu

konuda çalışan araştırmacılara bundan sonraki süreçlerde, biyoetanol üretim deneyleri için şeker konsantrasyonu, fermantasyon süresi, pH, sıcaklık vb. parametrelerin optimizasyonunu incelemeleri önerilmektedir.

Teşekkür

Yazaralar bu çalışmaya MF.17.13 proje numarası ile maddi desteğinden dolayı Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FÜBAP) birimine teşekkür eder.

Kaynaklar

- [1] Balat M, Balat H, Öz C. Progress in bioethanol processing. Progress in energy and combustion science 2008; 34(5): 551-573.
- [2] Anonim-1,A European Green Deal. 2019-2024; https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en; Erişim Tarihi: 10.10.2021.
- [3] Celebi A, Alparslan U. Biyoyakıtlara Yönelik Mali Teşvikler: Türkiye Açısından Bir değerlendirme. Hacettepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi 2015; 33(2): 24-45.
- [4] Piwowar A, Dzikúć M. Bioethanol Production in Poland in the Context of Sustainable Development- Current Status and Future Prospects. Energies 2022; 15(7): 2582.
- [5] Walker G M, Bioethanol: Science and technology of fuel alcohol, Bookboon, 2010.
- [6] Slathia P S, Raina N, Kiran A, Kour R, Bhagat D, Sharma P. Dilute acid pretreatment of pine needles of *Pinus roxburghii* by response surface methodology for bioethanol production by separate hydrolysis and fermentation. Biomass Conversion and Biorefinery 2020; 10(1): 95-106.
- [7] Rodríguez-Antón L M, Legrand M, Gutiérrez-Martín F, Serrano-Corroto Á. Theoretical determination of distillation curves of gasoline, ethanol and ethyl tert-butyl ether ternary blends from the experimental distillation curve of gasoline. Fuel 2022; 308(122030).
- [8] Verger T, Azimov U, Adeniyi O. Biomass-based fuel blends as an alternative for the future heavy-duty transport: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2022; 161(112391).
- [9] Letti L A J, Sydney E B, de Carvalho J C, de Souza Vandenberghe L P, Karp S G, Woiciechowski A L, ve diğerleri Burgos W J M, Roles and impacts of bioethanol and biodiesel on climate change mitigation, in: Biomass, Biofuels, Biochemicals, Elsevier, 2022, pp. 373-400.
- [10] Reynolds K A, Sexton J D, Pivo T, Humphrey K, Leslie R A, Gerba C P. Microbial transmission in an outpatient clinic and impact of an intervention with an ethanol-based disinfectant. American journal of infection control 2019; 47(2): 128-132.
- [11] Anonim-2,COVID-19 ile Mücadele Kapsamında Atılan Adımlar. 2022; <https://sanayi.gov.tr/covid-19/etil-alkol-maske-kolonya#etil-alkol-kullanimi>; Erişim tarihi: 27.06.2022
- [12] Tavva S M D, Deshpande A, Durbha S R, Palakollu V A R, Goparaju A U, Yechuri V R, ve diğerleri Muktinutalapati V S R. Bioethanol production through separate hydrolysis and fermentation of *Parthenium hysterophorus* biomass. Renewable Energy 2016; 86(1317-1323).
- [13] Zhu Z S, Zhu M J, Xu W X, Liang L. Production of bioethanol from sugarcane bagasse using NH_4OH - H_2O_2 pretreatment and simultaneous saccharification and co-fermentation. Biotechnology and bioprocess engineering 2012; 17(2): 316-325.
- [14] Ghorbani F, Younesi H, Sari A E, Najafpour G. Cane molasses fermentation for continuous ethanol production in an immobilized cells reactor by *Saccharomyces cerevisiae*. Renewable Energy 2011; 36(2): 503-509.
- [15] Sindhu R, Binod P, Gnansounou E, Prabisha T P, Thomas L, Mathew A K, ve diğerleri Faraco V. Enzymatic hydrolysis of microwave assisted acid pretreated chili postharvest residue for production of value added products. 2018; 56(479-483).
- [16] Nigam J. Ethanol production from wheat straw hemicellulose hydrolysate by *Pichia stipitis*. Journal of biotechnology 2001; 87(1): 17-27.
- [17] Jarboe L, Grabar T, Yomano L, Shanmugan K, Ingram L, Development of ethanologenic bacteria, in: In: Biofuels, Olsson, L. (Series Editor), Scheper, T. (Volume Editor), Springer, New York, 2007, pp. 237-261.
- [18] Anonim-3,ATCC: *Escherichia coli* (Migula) Castellani and Chalmers (*Escherichia coli* strain K011). 2022; <https://www.atcc.org/products/55124>; Erişim tarihi: 11.10.2022
- [19] Erkan Türkmen K. Bakteriyorodopsin Üretimi, Saflaştırılması ve Biyo optoelektronik Cihazlarda Kullanım Potansiyelinin Araştırılması. 2020.

- [20] Alslaibi T M, Abustan I, Ahmad M A, Foul A A. Cadmium removal from aqueous solution using microwaved olive stone activated carbon. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 2013; 1(3): 589-599.
- [21] Najafpour G D, Shan C P. Enzymatic hydrolysis of molasses. *Bioresource Technology* 2003; 86(1): 91-94.
- [22] Obeta J C, Ossai E C, Njoku O U. Optimization and characterization of bioethanol production from Abrus seed flour. *International Journal of Energy Research* 2021; 45(3883-3898).
- [23] Imamoglu E, Sukan F V. The effects of single and combined cellulosic agrowaste substrates on bioethanol production. *Fuel* 2014; 134(477-484).
- [24] Li X, Kim T H, Nghiem N P. Bioethanol production from corn stover using aqueous ammonia pretreatment and two-phase simultaneous saccharification and fermentation (TPSSF). *Bioresource technology* 2010; 101(15): 5910-5916.
- [25] Yomano L, York S, Ingram L. Isolation and characterization of ethanol-tolerant mutants of *Escherichia coli* KO11 for fuel ethanol production. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* 1998; 20(2): 132-138.
- [26] Okuda N, Ninomiya K, Takao M, Katakura Y, Shioya S. Microaeration enhances productivity of bioethanol from hydrolysate of waste house wood using ethanologenic *Escherichia coli* KO11. *Journal of bioscience and bioengineering* 2007; 103(4): 350-357.
- [27] Dien B S, Hespell R B, Wyckoff H A, Bothast R J. Fermentation of hexose and pentose sugars using a novel ethanologenic *Escherichia coli* strain. *Enzyme and microbial technology* 1998; 23(6): 366-371.
- [28] Zheng Y, Lee C, Yu C, Cheng Y-S, Zhang R, Jenkins B M, VanderGheynst J S. Dilute acid pretreatment and fermentation of sugar beet pulp to ethanol. *Applied Energy* 2013; 105(1-7).
- [29] Silva G P d, Araújo E F d, Silva D O, Guimarães W V. Ethanolic fermentation of sucrose, sugarcane juice and molasses by *Escherichia coli* strain KO11 and *Klebsiella oxytoca* strain P2. *Brazilian Journal of Microbiology* 2005; 36(395-404).

Düşük SUVA Değerlikli Sular için Trihalometan Tahmin Modelinin Geliştirilmesi ve Analitik Hiyerarşi Yöntemi ile En İyi Tahmin Modelinin Belirlenmesi

Cihan ÖZGÜR^{1*}, Gökhan CİVELEKOĞLU², Şehnaz Şule KAPLAN BEKAROĞLU³

¹ Sütçüler Prof. Dr. Hasan Gürbüz Meslek Yüksekokulu, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Isparta, Türkiye

² Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, Türkiye

³ Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye

*¹ cihanozgur@isparta.edu.tr, ² gcivelekoğlu@akdeniz.edu.tr, ³ sulebekaroglu@sdu.edu.tr

(Geliş/Received: 26/07/2022;

Kabul/Accepted: 26/10/2022)

Öz: Bu çalışmanın temel amacı genotoksik, sitotoksik ve kanserojenik olduğu bilinen dezenfeksiyon yan ürünlerinden trihalometanların miktarının belirlenmesi için çoklu lineer regresyon analizi kullanılarak tahmin modelinin oluşturulması ve literatürde mevcut modelleme çalışmaları ile karşılaştırılarak en iyi tahmin modelinin belirlenmesidir. Tahmin modelinde kullanılan bağımsız değişkenler Isparta şebekesinde ölçülen serbest klor konsantrasyonu, UV₂₅₄ absorbansı, sıcaklık ve pH, bağımlı değişken ise trihalometan konsantrasyonudur. Çoklu lineer regresyon analizi neticesinde ölçülen trihalometan değerleri ile hesaplanan trihalometan değerleri arasındaki R²: 0,51; kök-ortalama-kare hata: 0,16 µg/L; ortalama mutlak yüzde hata: %3; hassasiyet analizi ise %51 oranla sıcaklık olarak bulunmuştur. Çalışma sonucu elde edilen tahmin modeli sonucu ile literatürdeki 10 farklı tahmin modelinin karşılaştırılması analitik hiyerarşi süreci aracılığıyla yapılmıştır. Analitik hiyerarşi sürecinde kullanılan kriterler: “Kısa Analiz Süresi”, “Düşük Maliyet”, “Az Analitik Cihaz Gereksinimi”, “Az Parametre Sayısı” ve “Yüksek R²” şeklinde belirlenmiştir. Analitik hiyerarşi sürecine göre en önemli kriter “Kısa Analiz Süresi (0.40/1)” olarak tespit edilmiştir. Analitik hiyerarşi prosesinin alternatifleri ise literatürden seçilmiş 10 model çalışması ve bu makaleden elde edilen model çalışmasının sonuçlarıdır. Bu çalışmanın sonuçlarına göre alternatif modeller arasından A4 (0.20/1) numaralı model kısa zamanda, az analitik cihaz kullanarak, en yüksek verim elde edilebilecek model olarak tercih edilebilir.

Anahtar kelimeler: Analitik hiyerarşi prosesi, çoklu lineer regresyon, super decision, tahmin modeli, trihalometan

Developing a Trihalomethane Prediction Model for Low SUVA Waters and Determining the Best Prediction Model by Analytical Hierarchy Method

Abstract: Trihalomethanes are known to be genotoxic, cytotoxic, and carcinogenic disinfection by-products. The research is based on the development of a prediction model employing multiple linear regression analysis of trihalomethanes and comparison with other modeling studies. The independent variables used in the estimation model are free chlorine, UV₂₅₄ absorbance, temperature and pH, and the dependent variable is trihalomethane concentration. R² between the measured trihalomethane values and the calculated trihalomethane values as a result of multiple linear regression analysis: 0.51, root-mean-square error: 0.16 µg/L, mean absolute percent error: 3% sensitivity analysis was found to be temperature with a rate of 51%. The prediction model results of our study are compared with 10 different prediction models in the literature through the analytical hierarchy process. Criteria used in the analytical hierarchy processes are: “Short Analysis Time”, “Low Cost”, “Low Instrumental Equipment Requirement”, “Low Parameter Count” and “High R²”. According to the analytical hierarchy process, the most important criterion was determined as “Short Analysis Time (0.40/1)”. Alternatives to the analytical hierarchy process are the results of 11 scientifically accepted model studies. In light of this study's findings, the model numbered A4 (0.20/1) among the alternative models can be preferred as the model with the highest efficiency by using fewer instrumental devices in a short time.

Key words: Analytical hierarchy process, multiple linear regression, super decision, prediction model, trihalomethane

1. Giriş

Kolera, tifo ve dizanteri gibi su kaynaklı hastalıkları önlemek amacıyla kimyasal dezenfeksiyon prosesi kullanılmaktadır [1-3]. Dezenfeksiyon içme suyu arıtımının tamamlayıcı bileşenidir [1, 4]. Ancak dezenfeksiyon prosesinde suyun mikrobiyolojik kalitesi iyileştirilirken, klor gibi dezenfektanlar doğal organik maddelerle (DOM) reaksiyona girerek sularda dezenfeksiyon yan ürünlerini (DYÜ) oluşturmaktadır [5-6]. Muhtemel kanserojen ve

* Sorumlu yazar: cihanozgur@isparta.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0001-6085-1585, ² 0000-0001-5508-1918, ³ 0000-0003-0917-7219

mutajenik olmalarının tespit edilmesinden bugüne, içme suyu temininde ve artırımında, DYÜ konusunda araştırmalara hız verilmiştir [6-8].

Dünya genelinde 11 DYÜ türü (4 trihalometan (THM), 5 haloasetik asit (HAA), bromat, klorit) mevzuatlara girmiştir [7]. DYÜ'lerin kontrolü için Amerika Birleşik Devletleri Çevre Koruma Teşkilatı (USEPA) tarafından 1998 yılı Aralık ayında iki aşamalı Dezenfektan/Dezenfeksiyon Yan Ürünleri (D/DYÜ) mevzuatı yürürlüğe konulmuştur [9]. Birinci aşamada, içme suyu şebekesinde farklı noktalarda ölçülen değerlerin ortalaması, toplam THM (kloroform (CF), bromodiklorometan (BDCM), klorodibromometan (CDBM), bromoform (BF)) için 80 µg/L ve toplam HAA için (kloroasetik asit (CAA), dikloroasetik asit (DCAA), trikloroasetik asit (TCAA), bromoasetik asit (BAA), dibromoasetik asit (DBAA)) 60 µg/L olarak belirlenmiştir. 2006 yılının Ocak ayında yayınlanan ikinci aşamada ise THM ve HAA için belirlenen üst limitler değiştirilmemiş ancak belirlenen bu limitlerin şebekedeki her bir numune alma noktasında THM ve HAA için sırasıyla 80 ve 60 µg/L'den düşük olması gerektiği öngörülmüştür [10-11]. Ayrıca, USEPA tarafından gelecekteki yürürlüğe girmesi muhtemel mevzuatlar için tür bazında DYÜ'ler için yeni limit değerler belirlenmektedir. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından içme suyunda THM, HAA, HAN, klorür, kloralhidrat (CH), formaldehit ve siyanojen klorür için yönetmelikler yayınlanmıştır. Haloasetonitril (HAN) grubundan dikloroasetonitril (DCAN) için 70 µg/L ve dibromoasetonitril (DBAN) için 20 µg/L geçici sınır değeri getirmiştir [12]. Bununla birlikte, içme suyu dağıtım sistemindeki toplam THM konsantrasyonu, Avrupa Birliği'nde 100 µg/L'lik bir sınır değerine tabidir [13]. DYÜ'lerin çoklu lineer regresyon analizi yoluyla tahmini, DYÜ analizleri için birçok kimyasal ve gelişmiş analitik cihazlara gereksinim duyulmasının yanı sıra aynı zamanda uzun analiz süreleri gereksinimi neticesinde ortaya çıkmıştır. THM analizinin dezavantajlarından dolayı DYÜ modelleme araştırmaları önem kazanmaktadır. Bugüne kadar birçok farklı DYÜ türleri için modelleme senaryoları gerçekleştirilmiştir [14-20]. Bu model senaryolarının tamamında bir su kaynağından alınan numunelerde suyun fiziko-kimyasal özellikleri ile THM oluşumu arasında bir korelasyon elde edilmiştir. Bu korelasyon neticesinde de THM konsantrasyonu tahminleri yapılmıştır. Bu çalışmanın ilk kısmı da diğer modelleme çalışmalarına benzer şekilde çoklu lineer regresyon tahmin modelleri kullanılarak THM tahmin amacı gütmektedir. Diğer çalışmalardan temel farkı, özellikle düşük SUVA'lı sular için THM oluşumunun modellenmesidir. Ayrıca mevcut tahmin modelleri ile kıyaslanarak analitik hiyerarşi süreci kuramlarına göre bir sıralama yapılarak en iyi modelin belirlenmesi ilk defa bu çalışma kapsamında yapılmıştır. Çoklu lineer regresyon tahmin modelleri de karar verme aracı olarak kullanılmada iyi birer araçtır [7].

X ve Y veri kümeleri arasındaki bağlantıyı açıklamak için çoklu lineer regresyon analizi adı verilen istatistiksel bir teknik kullanılır. Benzer matematiksel teknikler, birçok bağımsız değişken (X_1, \dots, X_n) ve tek bir bağımsız değişken (Y) arasında doğrusal bağlantıyı kurmak için çoklu lineer regresyon analizinde de kullanılabilir. Denklem 1, çoklu lineer regresyon analizi için genel matematiksel denklemi göstermektedir.

$$y = m_1x_1 + m_2x_2 + m_3x_3 + \dots + m_nx_n + b \quad (1)$$

Çoklu doğrusal regresyon denklemindeki her bağımsız değişken (X_i), bağımlı değişken (Y) ile belirli bir doğrusal korelasyona sahiptir. Bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasındaki bağlantı, regresyon denklemlerinde değişkenlerin katsayılarının (x_1, \dots, x_n) pozitif ve negatif değerleri ile ifade edilir. Çoklu doğrusal regresyon tahmin modeli için denklemdaki herhangi bir değişkenin katsayısı negatifse, bağımlı değişken ile bağımsız değişkenler arasında negatif bir bağlantı belirtilebilir. Değişkenler, güç fonksiyonları olarak ve bu denklemleri daha mekanik olarak türetmek için logaritmik dönüşümle yazılmalıdır. Bu durumda, Denklem 1 yerine Denklem 2 ifadesi kullanılmalıdır:

$$y = X_1^{m1} \times X_2^{m2} \times X_3^{m3} \times \dots \times X_n^{mn} \times e^b \quad (2)$$

Yukarıdaki eşitliğin elde edilebilmesi için ilk olarak bağımsız değişkenlerin logaritmik değerleri alınmalıdır. Daha sonra değişkenlere ait katsayılar üstel olarak ifade edilmekte ve değişkenler birbirleri ile çarpılmaktadır. THM konsantrasyonu tahmin modellerinin kıyaslanmasına yönelik en iyi tahmin modelinin çeşitli kriterlere göre seçilmesinin amaçlandığı bu çalışmada, çok kriterli karar verme metodlarından yararlanılarak yenilikçi bir değerlendirme araştırması yürütülmüştür. En iyi tahmin modelinin seçilmesinde yalnızca determinasyon katsayısının (R^2) değerlendirilmesi karar vermeyi güçleştirmektedir. Bu çalışma kapsamında kısa analiz süresi, düşük maliyet, az analitik cihaz gereksinimi, az parametre sayısı, yüksek determinasyon katsayısı (R^2) gibi değişken kriterler de göz önüne alınmaktadır. Birden fazla kriterin olduğu durumlarda çok kriterli karar verme metodları oldukça faydalı ve karşılaştırılabilir sonuçlar türetebilmektedir [21]. Çok kriterli karar verme metodlarını, kalıcı organiklerin artırımında kullanılan ozonlama, membran filtrasyon ve aktif karbon gibi metodların maliyet analizlerinin sıralanmasında kullanılan modelleme senaryoları literatürde mevcuttur [22]. Güncel bir araştırmada yapılarına göre farklı 78 mikrokirleticinin ters ozmos membran prosesleri ile gideriminde çok kriterli karar verme

yöntemleri kullanılarak mikrokirleticileri eleme yoluna gidilmiştir [23]. İleri içme suyu arıtımında öncelikli kirleticilerin değerlendirilmesinde çok kriterli karar verme yöntemlerine de başvurulmuştur [24]. Literatürde THM tahmini için birçok makale mevcuttur ancak bu modellerin karşılaştırılması ile ilgili bir bilimsel yayına rastlanmamıştır. Araştırmamızın ana amacı en kısa sürede, en düşük maliyet ile en yüksek doğruluğu olan modellerin belirlenebilmesidir. Çalışmada her bir kriter için alternatiflerin ikili karşılaştırma matrisi uygulanmıştır. Böylelikle kriterlerin önemi değiştiğinde uygun alternatifin sıralaması da değişecektir. Tüm kriterlere göre ağırlıklandırılan alternatiflerin sıralaması araştırma sonunda belirlenmiş ve her bir kriter için hassasiyet analizi gerçekleştirilmiştir. Tanımlanan beş değerlendirme kriteri analitik hiyerarşi sürecinin (AHS) ikili karşılaştırma matrisi oluşturularak ağırlıklandırılmıştır. Ağırlıklandırma aşamasında literatürdeki kabul görmüş veri setlerinden ve içme suyu arıtımı ve modellemesi çalışmaları gerçekleştiren bilim insanlarının görüşlerinden yararlanılmıştır. Araştırmanın sınırlarını netleştirmek için literatürden elde edilen modellerde ilk eleme prosedürü uygulanmıştır. Eleme yönteminde hedef çalışma amacı doğrultusunda maliyet oluşturan unsurları ortadan kaldırmaktır. Bu nedenle girdilerinde beşten fazla su analizi parametresi ve ikiden fazla analitik cihazın kullanıldığı model kurguları kapsam dışı bırakılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Su Analizleri

Su numunelerinin pH'ı, VWR marka pH metre kullanılarak (Standart Yöntem 4500-H⁺) [25] ölçülmüştür. Numunelerin iletkenliği Standart Metot 2510'a göre iletkenlik ölçer (VWR marka) kullanılarak analiz edilmiştir. Sıcaklık değerleri, sıcaklık probu (VWR marka) ile Standart Yöntem 2510'a göre ölçülmüştür. Isparta şebekesindeki tüm noktalarda serbest ve toplam klor analizinin anlık ölçümü HACH/Pocket Colorimeter II kullanılarak gerçekleştirilmiştir. UV-visible spektrofotometre (UV-1700, Shimadzu) kullanarak UV₂₅₄ absorbansı tespit edilmiştir. Tüm analizler üç tekrarlı yapıldıktan sonra ortalama değerler hesaplanmıştır.

THM analizinde, USEPA 551.1 sıvı-sıvı ekstraksiyonu ile önderiştirilen numuneler gaz kromatografisi cihazı ile analiz edilmiştir [26-27]. Ekstraksiyon için 20 ml klorsuzlaştırılmış su numunesi 40 ml politetrafloroetilen (PTFE) kapaklı cam şişelere aktarılmıştır. 8 ml %99,8 HPLC saflıktaki metil tert-bütül eter (MtBE) organik çözücü fazı olarak hızla ilave edilmiştir. Daha sonra sulu fazdaki iyonik gücü arttırmak ve THM'leri kolayca ayırmak ve MtBE'nin sudaki çözünürlüğünü azaltmak için 8,5 g sodyum sülfat (Na₂SO₄) ilave edilmiştir. Ekstraksiyon şişesi kapatıldıktan sonra yatay olarak 300 rpm'de 15 dakika karıştırılmıştır. 15 dakika karıştırdıktan sonra, fazları ayırmak için 15 dakika beklenmiş ve 2 ml MtBE fazı bir cam pipet kullanarak gaz kromatografisi (GC) şişesine aktarılmıştır. Numuneler ve standartlar aynı yönteme (USEPA 551.1) göre hazırlandıktan sonra bir elektron yakalama detektörü (ECD) ve Agilent ChemStation yazılımı ile donatılmış bir Agilent 6890 GC ile analiz edilmiştir. Çalışmada kullanılan analitik yöntemler Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. Analitik Yöntemler

Parametre	Birim	Ölçüm yöntemi	Ekipman	Minimum ölçüm limiti
pH	---	SM 4500 H ⁺	WTW Multi 340i/Set	
İletkenlik	µS/cm	SM 2510B	WTW Multi 340i/Set	
Sıcaklık	°C	SM 2550	WTW Multi 340i/Set	
Serbest klor, toplam klor	mg/L	Colorimeter /DPD	Pocket Colorimeter™ II	0,1
Toplam organik karbon	mg/L	SM* 5310B	TOC-L CPH Shimadzu	0,1
UV absorbansı	cm ⁻¹	SM 5910	Shimadzu	±0,005
SUVA	L/mg.m	Hesaplama	---	
THM	µg/L	USEPA 551.1	Agilent 6890 GC+ECD	

2.2. Çoklu Regresyon Analizi

Microsoft tabanlı Excel uygulamasındaki regresyon analizi özelliği kullanılarak çoklu regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Çoklu regresyon analizinde serbest klor konsantrasyonu, UV₂₅₄ absorbanı, sıcaklık ve pH parametreleri bağımsız değişkenler olarak seçilmiş ve THM konsantrasyonu tahmin edilmeye çalışılmıştır. İstatistiksel analiz matrisi tek set olarak kurgulanmış olup, toplam 60 ardışık veri içermektedir. Çoklu regresyon analizinin değerlendirilebilmesi için R² (regresyon katsayısı) ve α (anlamlılık) istatistik parametreleri göz önüne alınmıştır. Denklem 3'teki eşitliğin elde edilmesi için ilk olarak bağımsız değişkenlerin doğal logaritmik dönüşümleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra çoklu regresyon analizi sonucu elde edilen değişkenlere ait katsayılar üstel olarak ifade edilmiş ve değişkenler denklemde çarpım durumuna getirilmiştir. Ayrıca ölçülen hedef değişkene ait değer ile çoklu regresyon analizi modeli sonucu elde edilen değer arasındaki hata miktarı ortalama karesel hata kökü (root mean square error – RMSE) ile istatistiksel olarak hesaplanmıştır (Denklem 4). Ortalama mutlak yüzde hata (mean absolute percentage error – MAPE) yöntemi ile ölçülen ve tahmin edilen değerler arasındaki ilişkinin tanımlanması tespit edilmiştir (Denklem 5). RMSE metodunun seçilmesinin nedeni, hata miktarının parametrenin birimi cinsinden (bu çalışmada µg/L) belirlenebilmesidir [28]. Ayrıca THM modeli çıktılarını hassasiyet analizi ile de yorumlanmıştır. Hassasiyet analizleri model parametrelerinin tanımlanması ve hangi parametrenin model içerisinde daha etkili olduğunun belirlenmesi aşamasında kullanılmıştır.

$$Y = (X_1)^{m_1} \times (X_2)^{m_2} \times \dots \times (X_n)^{m_n} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^N (x_i - y_i)^2}{N}} \quad (4)$$

$$MAPE (\%) = \frac{1}{N} \times \left\{ \sum_1^N \left| \frac{x_i - y_i}{x_i} \right| \right\} \times 10 \quad (5)$$

2.3. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS)

AHS, hiyerarşik bir sistem içinde birden çok kriterlere dayalı subjektif bir karar verme sürecidir [29]. AHS yöntemi üç temel ilkedden oluşmaktadır. Birincisi modelin yapısı, ikincisi kriterlerin ve alternatiflerin karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi ve sonuncusu ise önceliklerin belirlenmesidir [30]. Bir dizi n kriteri göreceli önem ağırlıklarına göre ikili olarak karşılaştırmak için ikili karşılaştırma matrisi kullanılır ve temsili gösterimi Denklem 6'da gösterilmektedir. Kısa analiz süresi (K1), düşük maliyet (K2), az analitik cihaz gereksinimi (K3), az parametre sayısı (K4), yüksek determinasyon katsayısı (R²) (K5) kriterleri ikili karşılaştırma matrisi kullanılarak her bir kriterin bir diğer kriter ile karşılaştırılması ve ağırlıklandırılması yapılmıştır.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1j} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{i1} & \dots & a_{ij} & \dots & a_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nj} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}, a_{ij} = 1, a_{ij} = 1/a_{ji}, a_{ji} \neq 0 \quad (6)$$

Burada ölçütler a₁, a₂, ..., a_n ile gösterilir. İki kriterin göreceli önemi 1 ile 9 arasında değişen bir ölçek kullanılarak belirlenmiştir. Bu durumda 1 puan “düşük önemli” ve 9 puan “kesinlikle daha önemli” anlamına gelmektedir. Karşılaştırmalı ağırlıklar, A_w = λ_{max} w'yi sağlayan ilgili λ_{max} ile w özvektörünün bulunmasıyla türetilir; burada λ_{max}, A matrisinin en büyük öz değeridir. Burada, -(A - λ_{max}) w = 0 koşulu için ilgili λ_{max} ile özvektör w bulunur. Özel algının tutarlılığını ve karşılaştırmalı ağırlıkların doğruluğunu sağlamak için tutarlılık indeksi (T.I.) ve tutarlılık oranı (T.O.) hesaplanır [29].

$$TI = (\lambda_{max} - n)/(n - 1) \quad (7)$$

Burada n kriter sayısıdır. Tutarlılık oranı (TO) şu şekilde hesaplanabilir:

$$TO = TI/RI \quad (8)$$

R.I., farklı boyutlu matrisler için belirlenir ve değeri 5 × 5 matris için 1,12'dir. Güvenilir bir sonuç için TO değeri 0,1'in altında olmalıdır.

AHS, Microsoft tabanlı Excel programı üzerinden yapılabileceği gibi AHS'yi uygulamak amacıyla geliştirilen yazılımlar da mevcuttur. Super Decision yazılımı AHS'yi uygulamak için geliştirilen ve geniş kullanım alanı olan bir yazılımdır. Super Decision yazılımına kriterler ve alternatifler tanıtılarak çok kısa sürede sonuç almak mümkündür. Super Decision yazılımının ilk aşaması Şekil 3'te, kriterlerin kıyaslandığı aşama Şekil 4'te gösterilmektedir. Alternatiflerin kriterlere göre değerlendirilmesi ise Ek A – Ek B – Ek C – Ek D – Ek E'de gösterilmektedir. Super Decision formül yazma gereksinimi ortadan kaldırdığı ve kontrol adımlarını algoritmalar ile tamamladığı için sadece istatistiksel olarak anlamlı sonuçları göstermektedir. Bu durum AHS sıralamalarının daha kısa sürede yorumlanabilmesine neden olmaktadır.

3. Bulgular

3.1. Su Analizleri Sonuçları

Isparta şebekesi serbest klor konsantrasyonu, UV_{254} absorbansı, sıcaklık, pH ve THM konsantrasyonu sonuçlarının logaritmik dönüşümleri Tablo 2'de verilmiştir. [31]. Isparta şebekesinde 2016-2017 yılları aralığında 12 ay boyunca alınan su numunelerinin ortalama SUVA değerleri <2 L/mg.m olarak hesaplandığı için düşük SUVA değerli sular olarak kabul edilmektedir. Isparta şebekesinde akış boyunca hesaplanan ortalama SUVA değerleri Isparta numune alma noktaları için sırasıyla 1,28 L/mg.m; 1,21 L/mg.m; 1,15 L/mg.m; 1,15 L/mg.m; 1,25 L/mg.m olarak hesaplanmıştır. Farklı mevsimlerde hesaplanan ortalama SUVA değerleri ise ilkbahar mevsiminde 0,99 L/mg.m, yaz mevsiminde 1,15 L/mg.m, sonbahar mevsiminde 1,05 L/mg.m, kış mevsiminde 1,63 L/mg.m olarak hesaplanmıştır. SUVA hesabı UV_{254} absorbansının TOK konsantrasyonuna bölünmesiyle elde edilebilmektedir. Isparta şebekesinde ölçülen ortalama TOK konsantrasyonları sırasıyla Isparta numune alma noktaları için sırasıyla 2,25-2,25-2,13-2,11-2,18 mg/L olarak ölçülmüştür. Mevsimsel olarak bakıldığında, ortalama TOK konsantrasyonu sonbahar mevsiminde 2,73 mg/L ile en yüksek değere ulaşmıştır. En düşük ortalama TOK konsantrasyonu ise kış mevsiminde 1,88 mg/L, ilkbahar ve sonbahar mevsimlerinde ise ortalama TOK konsantrasyonları 2,08-2,04 mg/L olarak tespit edilmiştir.

Tablo 2. Isparta şebekesi su kalite sonuçları

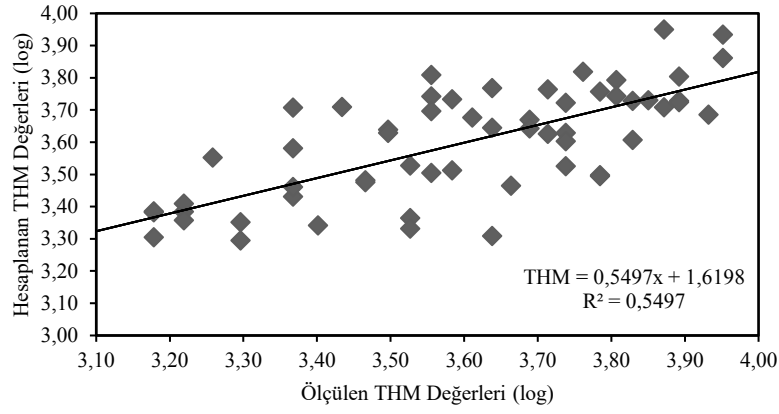
		Serbest Klor (mg/L) (ln)	UV (cm ⁻¹) (ln)	Sıcaklık (°C) (ln)	pH (ln)	THM (µg/L) (ln)
Kasım	1	-0,25	-3,47	2,68	2,11	3,69
	2	-0,09	-3,38	2,67	2,11	3,61
	3	-1,71	-3,41	2,80	2,13	3,56
	4	-1,61	-3,35	2,75	2,12	3,47
	5	-2,12	-3,24	2,75	2,11	3,22
Aralık	6	-0,43	-3,02	2,48	2,11	3,78
	7	-0,51	-3,24	2,50	2,12	3,74
	8	-1,24	-3,47	2,56	2,11	3,66
	9	-1,56	-3,65	2,47	2,07	3,53
	10	-1,71	-3,58	2,42	2,13	3,30
Ocak	11	-0,36	-3,61	1,92	2,08	3,64
	12	-0,48	-3,58	2,25	2,08	3,37
	13	-0,71	-3,58	2,12	2,15	3,18
	14	-0,78	-3,77	2,15	2,15	3,22
	15	-0,63	-3,61	1,84	2,11	3,09
Şubat	16	-0,73	-3,24	2,15	2,11	3,53
	17	-0,40	-3,35	2,08	2,10	3,22
	18	-0,76	-3,38	2,09	2,09	3,18
	19	-0,48	-3,38	2,55	2,09	3,26

Düşük SUVA Değerlikli Sular için Trihalometan Tahmin Modelinin Geliştirilmesi ve Analitik Hiyerarşi Yöntemi ile En İyi Tahmin Modelinin Belirlenmesi

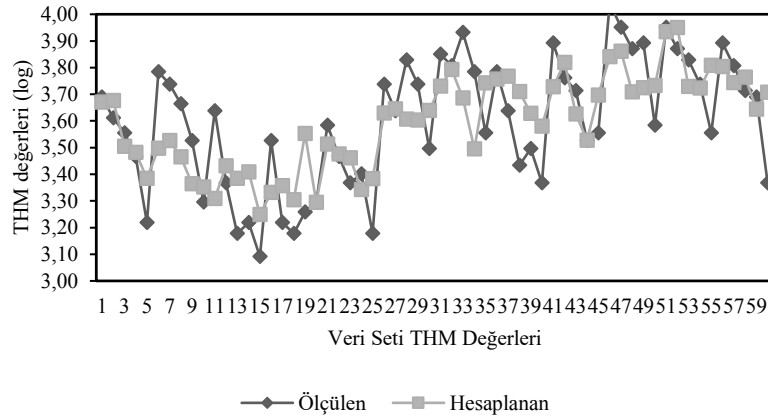
	20	-0,73	-3,35	2,05	2,10	3,30
Mart	21	-0,39	-3,51	2,34	2,13	3,58
	22	-0,65	-3,58	2,35	2,12	3,47
	23	-1,08	-3,51	2,47	2,13	3,37
	24	-2,30	-3,47	2,60	2,15	3,40
	26	-0,24	-4,14	2,39	2,13	3,18
Nisan	27	-0,33	-4,20	2,45	2,12	3,74
	28	-0,94	-4,42	2,56	2,09	3,64
	29	-1,71	-5,12	2,62	2,11	3,83
	30	-0,87	-4,51	2,55	2,12	3,74
	31	-0,22	-3,91	2,76	2,07	3,50
Mayıs	32	-0,60	-3,96	2,95	2,12	3,85
	33	-0,84	-4,02	2,80	2,10	3,81
	34	-2,21	-4,02	2,88	2,07	3,93
	35	-0,49	-3,91	2,82	2,11	3,78
	36	-0,25	-4,02	2,80	2,07	3,56
Haziran	37	-0,45	-3,96	2,95	2,04	3,78
	38	-0,80	-4,14	2,91	2,03	3,64
	39	-1,66	-4,14	2,98	2,07	3,43
	40	-1,08	-4,07	2,78	2,00	3,50
	41	-0,30	-2,98	3,10	2,02	3,37
Temmuz	42	-0,69	-3,73	3,17	2,07	3,89
	43	-1,90	-3,86	3,12	2,07	3,76
	44	-2,21	-3,61	3,09	2,06	3,71
	45	-0,80	-3,19	3,10	2,05	3,53
	46	-0,13	-3,65	3,01	2,10	3,56
Ağustos	47	-0,08	-3,35	3,08	2,12	4,04
	48	-1,90	-3,96	3,19	2,13	3,95
	49	-1,51	-3,91	3,13	2,11	3,87
	50	-1,47	-3,91	3,13	2,12	3,89
	51	-0,21	-3,41	3,26	2,13	3,58
Eylül	52	-0,17	-3,51	3,25	2,14	3,95
	53	-1,47	-3,51	3,21	2,13	3,87
	54	-1,35	-3,58	3,11	2,14	3,83
	55	-1,24	-3,54	3,29	2,14	3,74
	56	0,22	-3,83	2,72	2,12	3,56
Ekim	57	-0,39	-3,95	2,74	2,14	3,89
	58	-1,24	-3,95	3,09	2,13	3,81
	59	-1,61	-3,73	3,01	2,13	3,71
	60	-1,24	-3,83	2,99	2,13	3,69

3.2. Çoklu Lineer Regresyon Analizi Sonuçları

Çoklu lineer regresyon analizlerinde elde edilen veriler istatistiksel olarak anlamlıdır ($\alpha < 0.05$). Ölçülen ve hesaplanan THM değerleri arasındaki R^2 değeri 0,51; RMSE 0,16 $\mu\text{g/L}$; MAPE %3 olup; hassasiyet analizinde sıcaklık parametresinin %51 oranla en etkin değişken olduğu bulunmuştur. R^2 değeri, çoklu lineer regresyon analizinin doğrusallığını temsil etmektedir. Bu değer 1 olduğu zaman ölçülen değerler ve hesaplanan değerler arasında tam bir doğrusallık var demektir ve bu durum çoklu lineer regresyon analizi için önemlidir. Isparta şebekesinde THM tahmini için R^2 değeri çok yüksek değildir. Bunun sebebi Isparta şebekesinde THM oluşumunun su kalite parametrelerinden bağımsız bir şekilde gerçekleşmesi ile ilgili olabilir. Sadiq vd. [32] sularda DYÜ oluşumunu ve modelleme çalışmalarını kapsayan bir derleme makalesi sunmuşlar ve saha ölçekli yapılan çalışmaların R^2 değerlerinin laboratuvar ölçekli çalışmalarda elde edilen R^2 değerlerinden çok daha düşük olduğunu vurgulamışlardır. Laboratuvar ölçekli araştırmalarda elde edilen R^2 değerleri genellikle $>0,9$ iken saha ölçekli araştırmalarda R^2 değerleri 0,3'lere kadar düşebilmektedir. Araştırmamızın MAPE değeri %3'tür ve bu değer oldukça tatmin edicidir. Aynı şekilde RMSE değerinin oldukça düşük çıkması (0,16 $\mu\text{g/L}$) model çalışmasını olumlu yönde destekler niteliktedir. Isparta şebekesinde ölçülen ve istatistiksel olarak hesaplanan THM değerlerine ait model performansı Şekil 1'de, ardışık veri seti bazı karşılaştırma Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 1. Hesaplanan ve ölçülen THM değerlerine ait model performansı



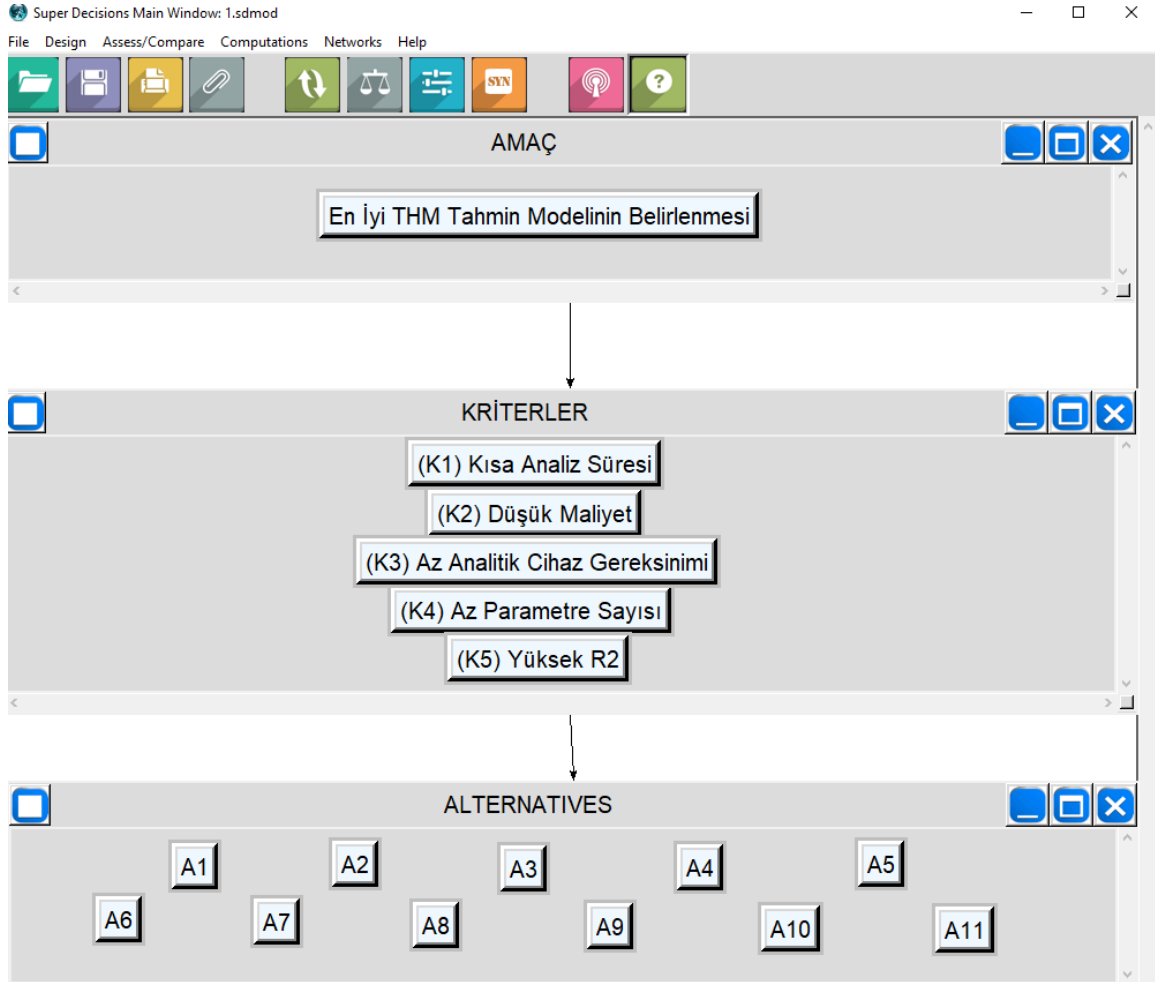
Şekil 2. Hesaplanan ve ölçülen THM değerinin ardışık veri seti bazında kıyaslanması

Çoklu lineer regresyon analizi sonucu Isparta şebekesi için THM tahminini ifade eden matematiksel eşitlik Denklem 9'da gösterilmektedir. Denklemdeki katsayıların pozitif ya da negatif olması tahmin parametresinin tahmin değerini doğrusal olarak (negatif/pozitif) etkilemektedir. Tahmin denkleminde THM değerini pozitif ve negatif anlamda en çok etkileyen parametrelerin sırasıyla pH ve UV_{254} olduğu görülmektedir

$$THM = 0,85 + (0,15 \times \text{Serbest Klor}) - (0,11 \times UV_{254}) + (0,43 \times T) + (0,60 \times \text{pH}) \quad (9)$$

3.3. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHS) Sonuçları

AHS üç temel aşamadan oluşmaktadır. AHS'nin birinci aşaması amacın belirlenmesidir. AHS'nin amacı literatürde yapılan THM tahmin modellerini seçilen bazı kriterlere göre karşılaştırılarak sıralanmasıdır. Bu araştırma için 5 kriter belirlenmiştir. Bu kriterler; kısa analiz süresi (K1), düşük maliyet (K2), az analitik cihaz gereksinimi (K3), az parametre sayısı (K4) ve yüksek R² (K5)'dir. Çalışmada kullanılan alternatiflerin belirlenmesinde ön eleme kriterleri kullanılmıştır. Ön eleme kriterleri belirlenirken özellikle kullanılan analitik cihazların 2'den fazla olmamasına, ölçülen su kalite parametre sayısının 5'ten fazla olmamasına dikkat edilmiştir. Super Decision yazılımı kullanılarak oluşturulan AHS kurulumu Şekil 3'te, ön eleme sonucu bu çalışmada kullanılmasına karar verilen ampirik modeller ise Tablo 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Analitik hiyerarşi süreci kurulumu

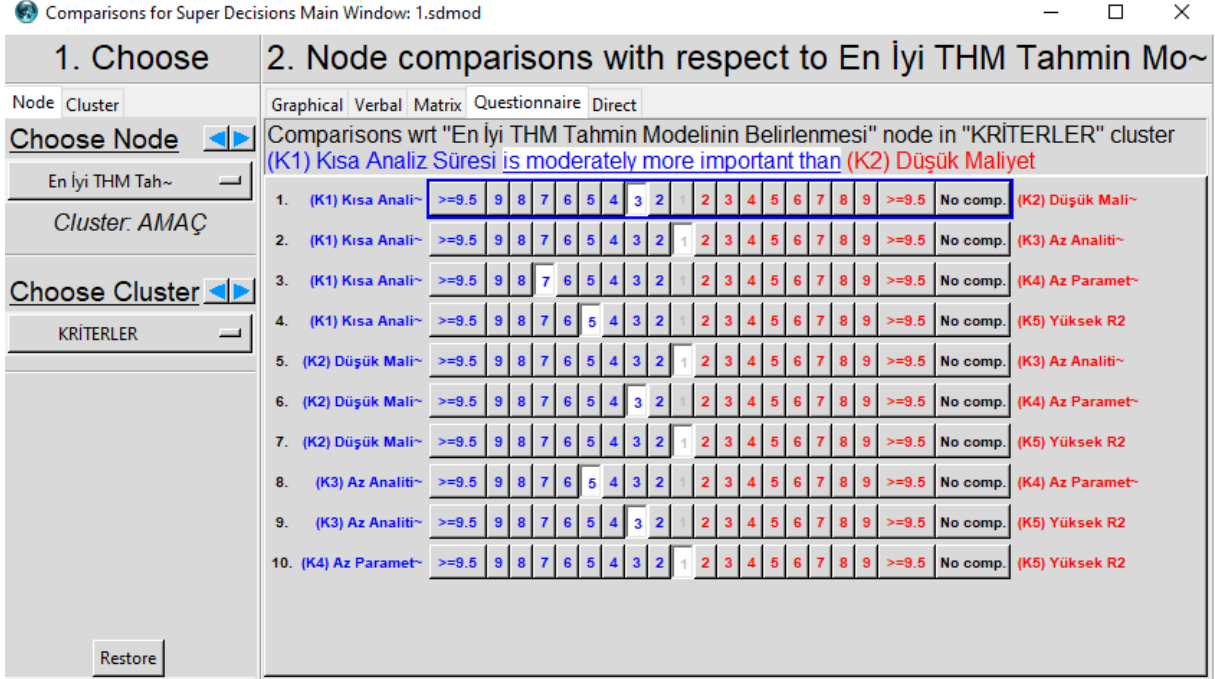
Tablo 3. Analitik hiyerarşi süreci alternatifleri

	Tahmin Modelleri	R ²	Referans
A1	$THM = 6,18 \times (UV_{254} + 1)^{3,64} \times TOK^{0,462} \times \text{Klor Dozu}^{0,420} \times (Br + 1)^{0,471} \times T^{0,169} \times pH^{0,048}$	0,88	[33]
A2	$THM = -15,0 + 0,235 \times T + 1,73 \times pH - 9,42 \times \text{Bulanıklık} - 0,729 \times TOK + 3,67 \times \text{Klor Dozu} + 0,18 \times \text{Bekleme Süresi}$	0,46	[34]
A3	$THM = -150,833 + 40,948 \times pH + 6,153 \times T - 13,876 \times \text{Bakiye Klor} + 8,100 \times \text{Bekleme Süresi} + 6,221 \times TOK + 292,308 \times UV_{254}$	0,87	[35]
A4	$THM = 10^{-1,53} \times T^{0,47} \times pH^{4,55} \times UV_{254}^{1,02}$	0,72	[36]
A5	$THM = 4,01 + 319,88 \times UV_{254} + 2,42 \times Cl_2$	0,23	[37]
A6	$THM = 10^{0,715} \times TOK_{giris}^{0,322} \times TOK_{çiktis}^{0,761} \times Cl_{2ön}^{0,206} \times Cl_{2son}^{0,184} \times T^{0,204}$	0,73	[38]
A7	$THM = 10^{-0,038} \times Cl_2^{0,654} \times pH^{1,322} \times \text{Bekleme Süresi}^{0,174} \times SUVA^{0,712}$	0,88	[39]
A8	$THM = 4,527T^{0,127} \times Cl_2^{0,595} \times TOK^{0,596} \times Br^{0,103} \times pH^{0,66}$	0,94	[40]
A9	$THM = 93,52 + 9,726 \times \text{Toplam } Cl_2 - 22,08 \times \text{Bakiye } Cl_2 - 13,79 \times pH + 4,019 \times 10^4 \times \text{Boru Uzunluğu} + 1,333 \times T + 2,302 \times TOK$	0,54	[41]
A10	$THM = 675,962 - 77,715 \times pH + 20,731 \times T - 509,779 \times \text{Bakiye } Cl_2 - 426,395 \times TOK + 382,669 \times \text{ÇOK} + 948,684 \times UV_{254}$	0,98	[42]
A11	$THM = 0,85 + (0,15 \times \text{Serbest Klor}) - (0,11 \times UV_{254}) + (0,43 \times T) + (0,60 \times pH)$	0,54	Bu çalışmanın modeli

UV₂₅₄: 254 nm UV absorpsansı; TOK: Toplam Organik Karbon; Br: Brom; T: Sıcaklık; Cl₂: Klor; SUVA: Spesifik UV Absorpsansı; ÇOK: Çözülmüş Organik Karbon

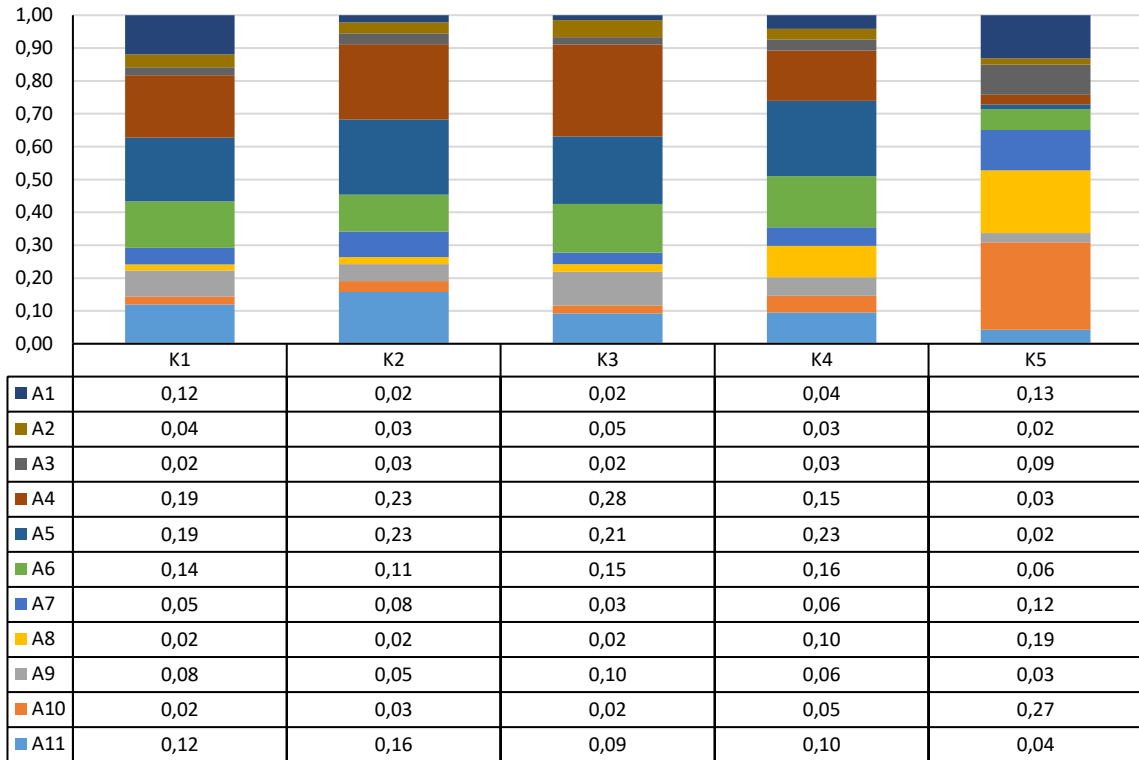
Kriterlerin ağırlıklandırılması Super Decision yazılımı içerisinde bulunan ikili karşılaştırma matrisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında seçilen 5 kriter birbirleri ile 9'lu puan sistemi ile değerlendirilmiştir. 9 puan bir kriterin diğerine kıyasla mutlak şekilde güçlü öneme sahip olduğunu, 7 puan bir kriterin diğerinden çok güçlü bir şekilde daha önemli olduğunu, 5 puan bir kriterin diğerinden çok daha önemli olduğunu, 3 puan bir kriterin diğerinden daha önemli olduğunu, 1 puan iki kriterin eşit önemde olduğunu göstermektedir. 2-4-6-8 puanlar ara değerleri göstermektedir.

Çalışma kriterlerinin ikili karşılaştırmada kullanılan puanları Şekil 4'te gösterilmektedir. Az analitik cihaz gereksinimi temsil eden K3 kriteri, az parametre sayısını temsil eden K4 kriteri ile kıyaslandığında bu çalışma kapsamında K3'ün çok daha önemli bir kriter olduğu düşünülmektedir ve bundan dolayı 5 puan almıştır. K3 kriteri K2 kriteri ile kıyaslandığında bu araştırma için eşit önemde olduğu düşünülmektedir ve bundan dolayı 1 puan almıştır. K4 kriteri K2 kriteri ile kıyaslandığında bu çalışma kapsamında K2 kriteri eşit önem ile daha önemli arasında bir yerde olduğu için 2 puan almıştır. Genel olarak ikili karşılaştırma matrisi bu şekilde yorumlanabilmektedir. Matrislerin ikili karşılaştırması için tutarlılık oranı 0,04 < 0,1 olduğu için istatistiksel olarak tutarlıdır. Kullanılan kriterlerin önem derecesi K1=0,4 > K3=0,27 > K2=0,16 > K5=0,09 > K4=0,06 olarak bulunmuştur.



Şekil 4. Kriterlerin ikili karşılaştırılması

Kriterlerin ağırlıkları belirlendikten sonra bir sonraki aşamada her bir kritere göre alternatiflerin ikili karşılaştırılması yapılmalıdır. K1 kriterine göre en iyi alternatif A5, K2 kriterine göre en iyi alternatif A4 ve A5, K3 kriterine göre en iyi alternatif A4, K4 kriterine göre en iyi alternatif A5, K5 kriterine göre en iyi alternatif A10 olarak belirlenmiştir. Alternatiflerin kriterlere puanlandırılması Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5. Alternatiflerin kriterlere puanlandırılması

K1 kriteri kısa analiz süresini temsil etmekte olup, tutarlılık oranı 0,02 ve istatistik olarak anlamlıdır. K1 kriterine göre alternatiflerin ikili karşılaştırma matrisi Ek A'da verilmektedir. DYÜ analizleri sıvı-sıvı ekstraksiyon metoduna göre yapılmakta ve GC ile ölçülmektedir. Numunelerin sahadan toplanması, laboratuvar ön hazırlık işlemleri ve analitik analiz aşaması, verilerin alınması ve yorumlanabilir versiyonun elde edilmesi uzun saatler almaktadır. Bu yüzden DYÜ'ler analiz edilmeden saha çalışmalarından elde edilebilmesi oldukça önemlidir. K1 kriterine göre alternatif ağırlık puanı sıralamasında en önemli alternatifin A5 (0,19) olduğu görülmektedir. A5 numaralı model UV absorbanı ve klor ölçümüne dayanmaktadır. A5 modelinde analitik cihaz kullanımı gerekmediği için analiz süresi oldukça kısadır.

K2 kriteri düşük maliyet süresini temsil etmektedir, tutarlılık oranı 0,01 ve istatistik olarak anlamlıdır. K2 kriterine göre alternatiflerin ikili karşılaştırma matrisi Ek B'de verilmektedir. DYÜ'lerin oluşumunu ve türleşmesini değerlendirebilmek için DYÜ'lerin oluşmasına neden olan organik maddelerin, su sıcaklığının, su pH'sının vb. parametrelerin ölçülmesi gerekebilmektedir. Bu yüzden DYÜ'leri tam anlamıyla anlayabilmek için çok kapsamlı bir süreç gerekmektedir bu durum da maliyetin artmasına neden olabilir. K2 kriterine göre alternatif ağırlık puanı sıralamasında en önemli alternatifin A4 (0,22) ve A5 (0,22) olduğu görülmektedir. A4 numaralı model sıcaklık, pH ve UV ölçümüne dayanmaktadır. Sıcaklık ve pH parametreleri sahadan anlık olarak, UV parametresi de hem laboratuvar ortamında hem de sahadan ölçülebilmektedir. A5 numaralı model UV ve klor parametrelerinin ölçümüne dayanmaktadır. Klor ölçümü de hem laboratuvar ortamında hem de sahadan çok düşük maliyetlerle ölçülebilmektedir. A4 ve A5 modelleri diğer modellere kıyasla daha düşük maliyetle gerçekleştirilebildikleri için K2 kriterinde üst sıralarda yer almaktadırlar.

K3 kriteri az analitik cihaz gereksinimini temsil etmektedir, tutarlılık oranı 0,04 ve istatistik olarak anlamlıdır. K3 kriterine göre alternatiflerin ikili karşılaştırma matrisi Ek C'de verilmektedir. DYÜ'lerin ölçümünde analitik cihaz kullanımı mecburidir. Ancak analitik hiyerarşi prosesinde seçilen alternatifler arasında, birçok farklı su kalite parametreleri kullanılarak, dezenfeksiyon yan ürünü tahminleri yapılabilmektedir. Bu kriter mümkün olduğunca az analitik cihaz kullanarak DYÜ'leri tahmin edebilme kapasitesini değerlendirmek üzere seçilmiştir. (K3) kriterine göre alternatif ağırlık puanı sıralamasında en önemli alternatifin A4 (0,27) olduğu görülmektedir. A4 numaralı model sıcaklık, pH ve UV ölçümüne dayalıdır. Sıcaklık ve pH taşınabilir cihazlarla çok hızlı bir şekilde ölçülebilmektedir. UV ölçümü spektrofotometre ölçümüne dayanmaktadır ancak yine de A4 numaralı model üst sıralarda yer almıştır.

K4 kriteri az parametre sayısını temsil etmektedir, tutarlılık oranı 0,01 ve istatistik olarak anlamlıdır. K4 kriterine göre alternatiflerin ikili karşılaştırma matrisi Ek D'de verilmektedir. Bu kriter özellikle DYÜ'lerin davranışını, oluşumunu ve türleşmesini değerlendirebilmek adına oldukça önemlidir. Bu kriter DYÜ'lerin oluşumuna katkı sağlayan su kalite parametrelerinin sayısını temsil etmektedir. Model çalışmalarının temel amacı mümkün olduğunca az su kalite parametresi kullanarak, oldukça hızlı ölçüm yöntemleri ile ve düşük maliyetle olabildiğince yüksek doğruluğu yakalamaya çalışmaktır. Bu yüzden bu kriterde az su kalite parametresi kullanımı önemlidir. K4 kriterine göre alternatif ağırlık puanı sıralamasında en önemli alternatifin A5 (0,22) olduğu görülmektedir. A5 numaralı model sadece iki su kalite parametresi kullanarak model kurulumu yapabildiği için en üst sırada yer almaktadır.

K5 kriteri R^2 'yi temsil etmektedir, tutarlılık oranı 0,02 ve istatistik olarak anlamlıdır. K5 kriterine göre alternatiflerin ikili karşılaştırma matrisi Ek E'de verilmektedir. R^2 modelleme çalışmalarında determinasyon katsayısını temsil etmektedir. Deneysel veriler ile gerçek veriler arasındaki uyumu göstermektedir. Model çalışmalarında R^2 değerinin 1'e yakın olması halinde deneysel verilerin gerçek verilerle tam olarak örtüştüğünü göstermektedir. K5 kriterine göre alternatif ağırlık puanı sıralamasında en önemli alternatifin A10 (0,26) olduğu görülmektedir. A10 numaralı modelin R^2 değeri 0,98 olduğu için en üst sırada yer almaktadır.

K1, K2, K3, K4 ve K5 kriterleri kendi aralarında değerlendirildiğinde en kayda değer kriterin 0,40 puan ile K1 olduğu tespit edilmiştir. Bütün kriterlerin genel skoruna göre de tüm alternatifler arasında en yüksek skor alan alternatif 0,20 puan ile A4 olarak tespit edilmiştir. Tüm kriterlerin ve tüm alternatiflerin önceliklerini ve puanlamasını gösteren sonuçlar Şekil 6'da gösterilmektedir.

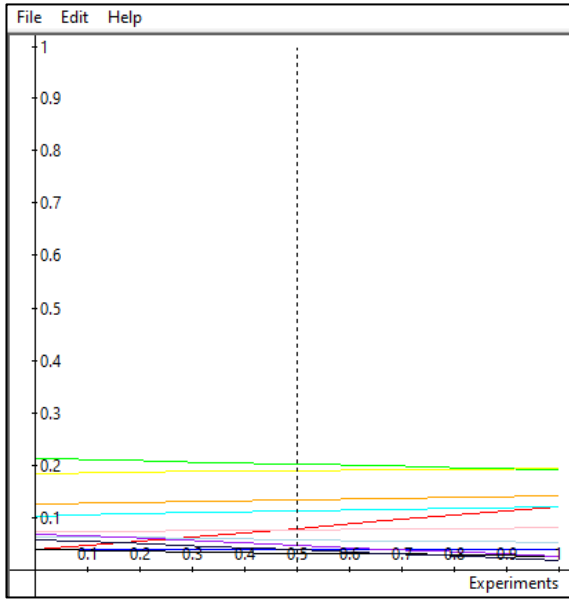
Super Decisions Main Window: 1.sdmod: Priorities

Here are the priorities.

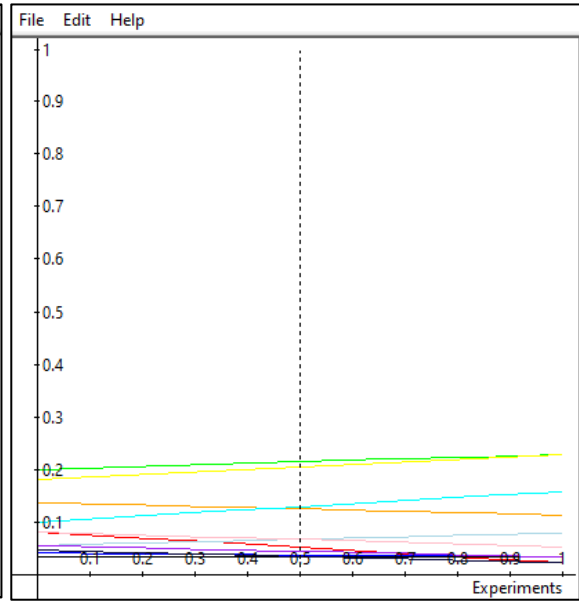
Icon	Name	Normalized by Cluster	Limiting
No Icon	A1	0.07054	0.035272
No Icon	A2	0.03920	0.019602
No Icon	A3	0.03259	0.016297
No Icon	A4	0.20352	0.101762
No Icon	A5	0.18791	0.093956
No Icon	A6	0.13195	0.065975
No Icon	A7	0.05820	0.029101
No Icon	A8	0.04109	0.020543
No Icon	A9	0.07521	0.037605
No Icon	A10	0.05056	0.025282
No Icon	A11	0.10921	0.054605
No Icon	En İyi THM Tahmin Modelinin Belirlenmesi	0.00000	0.000000
No Icon	(K1) Kısa Analiz Süresi	0.40074	0.200370
No Icon	(K2) Düşük Maliyet	0.16487	0.082433
No Icon	(K3) Az Analitik Cihaz Gerekisini	0.27679	0.138395
No Icon	(K4) Az Parametre Sayısı	0.06249	0.031247
No Icon	(K5) Yüksek R2	0.09511	0.047555

Şekil 6. Tüm kriterlerin ve tüm alternatiflerin öncelikleri

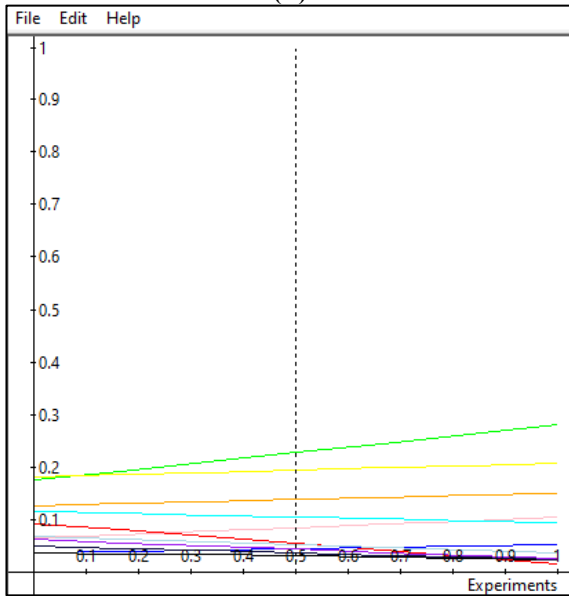
Kısa analiz süresi kriterine göre alternatiflerin hassasiyet analizi Şekil 7A'da gösterilmektedir. Hassasiyet oranı %50 olduğunda A4 alternatifinin en önemli alternatif olduğu görülmektedir. Hassasiyet oranı arttırıldığında A4 alternatifinin önemi azalırken, A1 alternatifinin önemi kayda değer şekilde artmaktadır. Düşük maliyet kriterine göre alternatiflerin hassasiyet analizi Şekil 7B'de gösterilmektedir. Hassasiyet analizi %50 olduğunda A4 alternatifi A5 alternatifine neredeyse eşit önemli olmaktadır. Hassasiyet oranı %90'ın üzerine çıktığında A4 alternatifinin önemi A5 alternatifine kayda değer şekilde yaklaşmakta ve artmaktadır. Az analitik cihaz gereksinimi kriterine göre alternatiflerin hassasiyet analizi Şekil 7C'de gösterilmektedir. %50'lik hassasiyet oranı göz önüne alındığında en önemli alternatifin A4 olduğu görülmektedir. Hassasiyet oranı %10'un altına düştüğünde A5 no'lu alternatifin daha önemli olduğu söylenebilir. Hassasiyet oranı %50'nin üzerine çıktığında ise A4 alternatifinin önemi artmaktadır. Az parametre sayısı kriterine göre alternatiflerin hassasiyet analizi Şekil 7D'de gösterilmektedir. %50'lik hassasiyet oranı göz önüne alındığında en önemli alternatifin A5 olduğu görülmektedir. Hassasiyet oranı %20'nin altına düştüğünde A4 no'lu alternatifin daha önemli olduğu görülmektedir. Hassasiyet oranı %50'nin üstüne çıktığında A5 alternatifinin önemi de artmaktadır. R² kriterine göre alternatiflerin hassasiyet analizi Şekil 7E'de gösterilmektedir. Hassasiyet oranı %50 olduğunda A10 alternatifinin en önemli alternatif olduğu görülmektedir. Hassasiyet oranı %50'den %0'a yaklaştığında A4 alternatifinin önem derecesi kayda değer şekilde artmaktadır. Hassasiyet oranı %50'den %100'e yükseltildiğinde A10 alternatifi net bir şekilde artmaktadır.



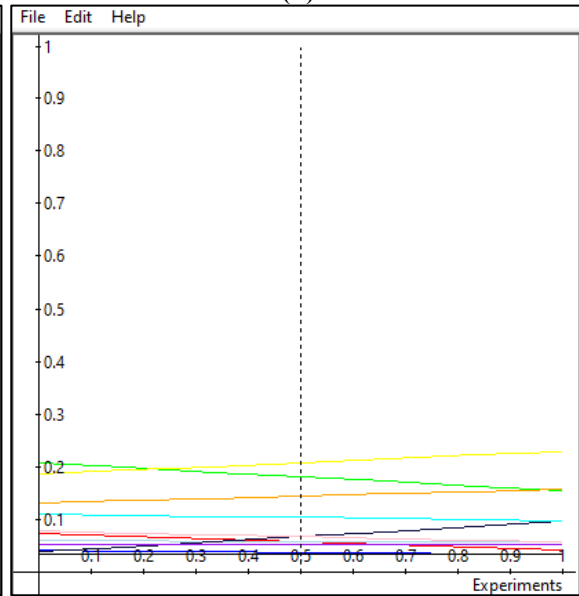
(A)



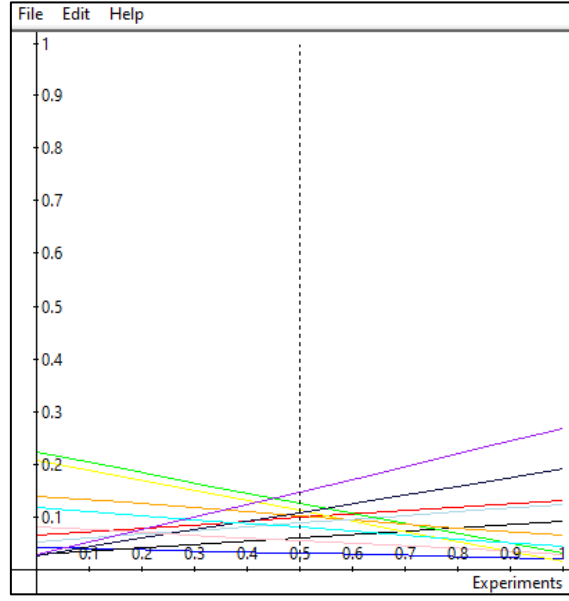
(B)



(C)



(D)



(E)

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11
----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----

Şekil 7. Kriterlere göre alternatiflerin hassasiyet analizi (A: K1 kriterine göre alternatiflerin hassasiyeti, B: K2 kriterine göre alternatiflerin hassasiyeti, C: K3 kriterine göre alternatiflerin hassasiyeti, D: K4 kriterine göre alternatiflerin hassasiyeti, E: K5 kriterine göre alternatiflerin hassasiyeti)

4. Tartışma ve Sonuç

İçme suyu endüstrisinde dezenfeksiyon süreci mikrobiyal kaliteyi sağlamak adına vazgeçilmez bir aşamadır. Sularda doğal olarak bulunan organik ve/veya inorganik maddeler, dezenfeksiyon sürecinde kullanılan dezenfektanlar ile kasıtsız bir şekilde tepkime verme eğilimindedir. DYÜ'ler içme suyu şebekelerinde dezenfeksiyon sürecinden sonra dezenfektanlar ile öncül maddeler arasındaki tepkime sonucu oluşan genotoksik, sitotoksik ve karsinojenik olan yan ürünlerdir. THM, sularda tespit edilebilen 800'den fazla DYÜ'leri arasında en fazla tespit edilebilen türdür. THM Amerika Birleşik Devletleri'nde, Avrupa'nın neredeyse tüm ülkelerinde ve Türkiye'de mevzuatlarda yer almakta ve sulardaki konsantrasyonunun tespit edilmesi gerekmektedir. Ancak DYÜ'lerin ve hassas analitik cihazlarla ölçülmesi tespitlerini zorlaştırabilmektedir. Bundan dolayı birçok araştırmacı THM konsantrasyonunu tespit edebilmek için ampirik modelleri kullanma yoluna gitmişlerdir. Birçok araştırmacı ampirik modelleri kullanırken farklı su kalite parametrelerinden yararlanmaktadırlar. Farklı araştırmacılar farklı su kaynaklarından elde ettikleri veri setleri ile farklı THM tahmin modelleri geliştirmeye çalışmışlardır. İdeal tahmin modelini seçmek oldukça karmaşık bir sürecin sonunda belirlenebilmektedir. Bu yüzden karar verme uygulaması olan analitik hiyerarşi prosesini kullanmak oldukça yararlı ve süreci hızlandıran bir istatistiksel yaklaşım sergilemektedir.

Bu çalışmanın birinci aşaması Isparta şebekesinden bir yıl boyunca toplanan su numunelerinin su kalite parametrelerinin ve THM konsantrasyonunun belirlenmesidir. Isparta şebekesinde analizi yapılan su kalite parametreleri serbest klor, UV, sıcaklık ve pH'tır. Çalışmanın ikinci aşaması su kalite parametreleri ile THM konsantrasyonu arasında çoklu lineer regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analizde bağımsız değişkenler serbest klor, UV, sıcaklık ve pH, bağımlı değişken ise THM'dir. Isparta şebekesinde THM tahmin modeli istatistiksel olarak anlamlıdır ($\alpha < 0,05$). Elde edilen sonuçlar ile literatürde yer alan 10 farklı THM tahmin modeli sonucu analitik hiyerarşi prosesi ile değerlendirilmiştir. Analitik hiyerarşi sürecinde 11 farklı tahmin modeli çalışmasını değerlendirmek için 5 farklı kriter seçilmiştir. Bu kriterler analitik hiyerarşi sürecindeki ikili karşılaştırma matrisi kullanılarak ağırlıklandırılmıştır. Ağırlıklandırma aşaması sonucunda K1 kriteri 0,40, K3 kriteri 0,27, K2 kriteri 0,16, K5 kriteri 0,09, K4 kriteri ise 0,06 puan almıştır. Kriterlerin bütünlük etkisi dikkate alınarak son aşamada alternatiflerin ikili karşılaştırılması yapılmıştır. Bu çalışmanın sonucu olarak ortaya çıkan A11 alternatifi AHP sıralamasına göre en ideal 4. model olarak belirlenmiştir. A11 modelinde A4 modeline ek olarak serbest klor ölçümlerinin modele dahil edilmesi ve yıl boyunca su kalite parametrelerinin mevsimsel değişiminin oldukça az değişimler göstermesi ve su kaynağının düşük SUVA'lı karakterde olması dolayısıyla model korelasyon katsayısının daha düşük olması A11 modelinin 4. sırada yer almasına neden olmuştur. Çalışma sonunda A4

alternatifi “ $THM=10^{-1.53} \times T^{0.47} \times pH^{4.55} \times UV_{254}^{1.02}$ ” 0,20 puan alarak kriterler bağlamında en iyi alternatif olarak belirlenmiştir. Seçilecek olan farklı kriterler ve alternatifler ile bu çalışmaların çeşitlendirilebileceği ve farklı araştırmacılara da yol gösterebilecektir.

Teşekkür

"İçme Suyu Kaynakları ve Şebekelerinde Azot Bazlı Dezenfeksiyon Yan Ürünleri ve Öncülerinin Mevsimsel Değişimlerinin İncelenmesi" başlıklı TÜBİTAK projesi (Proje No: 113Y416), bu çalışmanın modelleme kısmı için finansman sağlamıştır. C.Ö., deneyleri gerçekleştirdi ve makaleyi yazdı, G.C., sonuçları yorumladı, Ş.Ş.K.B., fikir sahibi ve sonuçları yorumladı.

Kaynaklar

- [1] Cortes C, Marcos R. Genotoxicity of disinfection byproducts and disinfected waters: A review of recent literature. *Mutat Res Gen Tox En* 2018; 831: 1–12.
- [2] Hu J, Chu W, Sui M, Xu B, Gao N, Ding S. Comparison of drinking water treatment processes combinations for the minimization of subsequent disinfection by-products formation during chlorination and chloramination. *Chemical Engineering Journal* 2018; 335: 352–361.
- [3] Roth D, Cornwell DA. DBP Impacts from Increased Chlorine Residual Requirements. *Journal AWWA* 2018; 110: 2.
- [4] Alexandrou L, Meehan BJ, Jones OAH. Regulated and emerging disinfection by-products in recycled waters. *Science of the Total Environment* 2018; 637–638: 1607–1616.
- [5] Chhipi-Shrestha G, Rodriguez M, Sadiq R. Unregulated disinfection Byproducts in drinking water in Quebec: A meta analysis. *Journal of Environmental Management* 2018; 223: 984–1000.
- [6] Ersan MS, Liu C, Amy G, Karanfil T. The interplay between natural organic matter and bromide on bromine substitution. *Science of the Total Environment* 2019; 646: 1172–1181.
- [7] Lin J, Chen X, Zhu A, Hong H, Liang Y, Sun H, Lin H, Chen J. Regression models evaluating THMs, HAAs and HANs formation upon chloramination of source water collected from Yangtze River Delta Region, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 2018; 160: 249–256.
- [8] Avsar E, Toröz İ, Hanedar A, Yılmaz M. Chemical Characterization of Natural Organic Matter and Determination of Disinfection By-Product Formation Potentials in Surface Waters of Istanbul (Omerli and Buyukcekmece Water Dam), Turkey. *Fresenius Environmental Bulletin* 2014; 23(2a): 494-502.
- [9] U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) 1998. National Primary Drinking Water Regulations: Disinfectants and Disinfection Byproducts Notice of Data Availability, Proposed Rule. *Federal Register* 61, 62:15677.
- [10] U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) 2006. National Primary Drinking Water Regulations: Stage 2 Disinfectants and Disinfection Byproducts Rule, Final Rule, *Federal Register* 71:2.
- [11] Avsar E, Toröz İ. Seasonal Determination and Investigation of Disinfection By Product Formation Potentials (DBPFPS) of Surface Waters, Istanbul Omerli and Buyukcekmece Case Study. *Anadolu University Journal of Science and Technology B- Theoretical Sciences* 2018; 6(1): 22-35.
- [12] World Health Organization (WHO) 2004. Guidelines for Drinking Water Quality, 3rd ed., http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3rev/en.
- [13] Bond T, Kamal NHM, Bonnissieu T, Templeton MR. Disinfection by-product formation from the chlorination and chloramination of amines. *Journal of Hazardous Materials* 2014; 278: Pages 288-296.
- [14] Garcia-Villanova RJ, Garcia C, Gomez JA, Garcia MP, Ardanuy R. Formation, Evolution and Modeling of Trihalomethanes in The Drinking Water of A Town: II. In The Distribution System. *Wat. Res.* 1997; Vol. 31: pp. 1405-1413.
- [15] Golfopoulos SK, Xilourgidis NK, Kostopoulou MN, Lekkas TD. Use of A Multiple Regression Model for Predicting Trihalomethane Formation. *Wat. Res.* 1998; Vol. 32, No. 9, pp. 2821-2829.
- [16] Golfopoulos SK, Arhonditsis GB. Multiple regression models: A methodology for evaluating trihalomethane concentrations in drinking water from raw water characteristics. *Chemosphere* 2002; 47: 1007–1018.
- [17] Civelekoğlu G, Yiğit NO, Diamadopoulos E, Kitiş M. Prediction of Bromate Formation Using Multi-Linear Regression and Artificial Neural Networks. *Ozone: Science and Engineering* 2007; 29: 353–362.
- [18] Uyak V, Ozdemir K, Toroz I. Multiple linear regression modeling of disinfection by-products formation in Istanbul drinking water reservoirs. *Science of the Total Environment* 2007; 378: 269–280.
- [19] Chowdhury S. Champagne P. An Investigation on Parameters for Modeling THMs Formation. *Global NEST Journal* 2008; Vol 10: No 1, pp 80-91.
- [20] Mishra BK, Priya T, Gupta SK, Sinha A. Modeling and Characterization of Natural Organic Matter and Its Relationship with The THMs Formation. *Global NEST Journal* 2016; Vol 18: No 4, pp 803-816.
- [21] Triantaphyllou E. *Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*. Springer New York, NY: Kluwer Academic Publishers, 2000.

- [22] Peyrelasse C, Jacob M, Lallement A. Multicriteria Comparison of Ozonation, Membrane Filtration, and Activated Carbon for the Treatment of Recalcitrant Organics in Industrial Effluent: A Conceptual Study. *Environmental Processes* 2022; 9: 9.
- [23] Ebrahimzadeh S, Wols B, Azzelino A, Martijn BJ. Quantification and modelling of organic micropollutant removal by reverse osmosis (RO) drinking water treatment. *Journal of Water Process Engineering* 2021; 42: 102164.
- [24] Teodosiu C, Gilca AF, Barjoveanu G, Fiore S. Emerging pollutants removal through advanced drinking water treatment: A review on processes and environmental performances assessment. *Journal of Cleaner Production* 2018; doi: 10.1016/j.jclepro.2018.06.247.
- [25] APHA (1998) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th Edition, American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environmental Federation, Washington DC.
- [26] U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) 1996. Method 8270C. Semivolatile Organic Compounds by Gas Chromatography / Mass Spectrometry (GC/MS). In Test Methods for Evaluating Solid Waste: Physical/Chemical Methods, SW- 846, 3rd edition. United States Environmental Protection Agency, Washington.
- [27] Avsar E, Toroz I, Hanedar A. Physical Characterisation of Natural Organic Matter and Determination of Disinfection By-Product Formation Potentials in Istanbul Surface Waters. *Fresenius Environmental Bulletin* 2015; 24(9): 2763-2770.
- [28] Civelekoğlu G. Arıtma proseslerinin yapay zeka ve çoklu istatistiksel yöntemler ile modellenmesi. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 2006.
- [29] Ömürbek N, Şimşek A. Analitik Hiyerarşi Süreci ve Analitik Ağ Süreci Yöntemleri ile Online Alışveriş Site Seçimi. *Yönetim ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi* 2014; 22: 306-327.
- [30] İmren E, Karayılmazlar S, Kurt R, Çabuk Y. Yatırım Kararı Almada AHS Yönteminin Kullanımı: Bartın İli Örneği. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi* 2017; 19(2): 107-114.
- [31] Ozgur C. Farklı Su Kaynaklarında ve Şebekelerde Karbonlu ve Azotlu Dezenfeksiyon Yan Ürünlerinin Oluşumu. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, 2019.
- [32] Sadiq R, Rodriguez M. Disinfection by-products (DBPs) in drinking water and predictive models for their occurrence: a review. *Sci Total Environ* 2004; 321(1-3): 21-46.
- [33] Godo-Pla L, Emiliano P, Poch M, Valero F, Monclus H. Benchmarking empirical models for THMs formation in drinking Water systems: An application for decision support in Barcelona, Spain. *Science of the Total Environment*, 2021; 763: 144197.
- [34] Albanakis C, Tsanana E, Fragkaki AG. Modeling and prediction of trihalomethanes in the drinking water treatment plant of Thessaloniki, Greece. *Journal of Water Process Engineering* 2021; 43: 102252.
- [35] Kumari M, Gupta SK. Modeling of trihalomethanes (THMs) in drinking water supplies: a case study of eastern part of India. *Environ Sci Pollut Res* 2015; 22:12615–12623.
- [36] Islam N, Sadiq R, Rodriguez MJ, Legay C. Assessing regulatory violations of disinfection by-products in water distribution networks using a non-compliance potential index. *Environ Monit Assess* 2016; 188: 304.
- [37] Semerjian L, Dennis J, Ayoub G. Modeling the formation of trihalomethanes in drinking waters of Lebanon. *Environ Monit Assess* 2009; 149: 429–436.
- [38] Mcbean E, Zhu Z, Zeng W. Systems analysis models for disinfection byproduct formation in chlorinated drinking water in Ontario. *Civil Engineering and Environmental Systems* 2009; 25(2): 127-138.
- [39] Uyak V, Toroz İ. Modeling The Formation Of Chlorination By-Products During Enhanced Coagulation. *Environmental Monitoring and Assessment* 2006; 121: 503–517.
- [40] Al-Omari A, Fayyad M, Qader AA. Modeling trihalomethane formation for Jabal Amman water supply in Jordan. *Environmental Modeling and Assessment* 2004; 9: 245–252.
- [41] Feungpan M, Panyapinyopol B, Elefsiniotis P, Fongsatitkul P. Development of statistical models for trihalomethane (THM) occurrence in a Water distribution network in Central Thailand. *Urban Water Journal* 2015; Vol. 12, No. 4: 275–282.
- [42] Mahato JK, Gupta SK. Modification of Bael fruit shell and its application towards natural organic matter removal with special reference to predictive modeling and control of THMs in drinking Water Supplies. *Environmental Technology & Innovation* 2020; 18: 100666.

Ekler

Ek A K1 kriteri kullanılarak ikili karşılaştırılan seçeneklerin matrisi

Comparisons for Super Decisions Main Window: 1.sdm

1. Choose		2. Node comparisons with respect to Kısa Analiz Süresi																			
Node	Cluster	Graphical	Verbal	Matrix	Questionnaire	Direct															
Choose Node		Comparisons wrt "Kısa Analiz Süresi" node in "ALTERNATIVES" cluster																			
Kısa Analiz Sü-		A1 is moderately more important than A2																			
Cluster: KRITERLER																					
Choose Cluster																					
ALTERNATIVES																					
1.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A2
2.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A3
3.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A4
4.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A5
5.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A6
6.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A7
7.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A8
8.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9
9.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10
10.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11
11.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A3
12.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A4
13.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A5
14.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A6
15.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A7
16.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A8
17.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9
18.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10
19.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11
20.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A4
21.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A5
22.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A6
23.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A7
24.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A8
25.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9
26.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10
27.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11
28.	A4	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A5
29.	A4	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A6
30.	A4	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A7
31.	A4	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A8
32.	A4	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9
33.	A4	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10
34.	A4	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11
35.	A5	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A6
36.	A5	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A7
37.	A5	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A8
38.	A5	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9
39.	A5	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10
40.	A5	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11
41.	A6	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A7
42.	A6	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A8
43.	A6	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9
44.	A6	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10
45.	A6	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11
46.	A7	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A8
47.	A7	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9
48.	A7	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10
49.	A7	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11
50.	A8	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A3
51.	A8	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10
52.	A8	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11
53.	A9	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10
54.	A9	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11
55.	A10	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11

Düşük SUVA Değerlikli Sular için Trihalometan Tahmin Modelinin Geliştirilmesi ve Analitik Hiyerarşi Yöntemi ile En İyi Tahmin Modelinin Belirlenmesi

Ek B K2 kriteri kullanılarak ikili karşılaştırılan seçeneklerin matrisi

Comparisons for Super Decisions Main Window: 1.sdmod

1. Choose		2. Node comparisons with respect to Düşük Maliyet																			
Node	Cluster	Graphical	Verbal	Matrix	Questionnaire	Direct															
Choose Node		Comparisons wrt "Düşük Maliyet" node in "ALTERNATIVES" cluster																			
Düşük Maliyet		A2 is equally to moderately more important than A1																			
Cluster: KRITERLER																					
Choose Cluster																					
ALTERNATIVES																					
1.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A2
2.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A3
3.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A4
4.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A5
5.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A6
6.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A7
7.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A8
8.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9
9.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10
10.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11
11.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A3
12.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A4
13.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A5
14.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A6
15.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A7
16.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A8
17.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9
18.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10
19.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11
20.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A4
21.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A5
22.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A6
23.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A7
24.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A8
25.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9
26.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10
27.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11
28.	A4	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A5
29.	A4	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A6
30.	A4	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A7
31.	A4	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A8
32.	A4	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9
33.	A4	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10
34.	A4	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11
35.	A5	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A6
36.	A5	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A7
37.	A5	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A8
38.	A5	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9
39.	A5	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10
40.	A5	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11
41.	A6	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A7
42.	A6	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A8
43.	A6	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9
44.	A6	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10
45.	A6	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11
46.	A7	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A8
47.	A7	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9
48.	A7	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10
49.	A7	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11
50.	A8	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9
51.	A8	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10
52.	A8	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11
53.	A9	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10
54.	A9	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11
55.	A10	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11

Restore

Ek C K3 kriteri kullanılarak ikili karşılaştırılan seçeneklerin matrisi

Comparisons for Super Decisions Main Window: 1.sdm

1. Choose 2. Node comparisons with respect to (K3) Az Analitik Cih~

Node Cluster Graphical Verbal Matrix Questionnaire Direct

Choose Node (K3) Az Analit~

Cluster: KRITERLER

Choose Cluster ALTERNATIVES

Comparisons wrt "(K3) Az Analitik Cihaz Gereksinimi" node in "ALTERNATIVES" cluster
A2 is moderately to strongly more important than A1

1.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A2
2.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A3
3.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A4
4.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A5
5.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A6
6.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A7
7.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A8
8.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9
9.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10
10.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11
11.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A3
12.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A4
13.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A5
14.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A6
15.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A7
16.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A8
17.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9
18.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10
19.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11
20.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A4
21.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A5
22.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A6
23.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A7
24.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A8
25.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9
26.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10
27.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11
28.	A4	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A5
29.	A4	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A6
30.	A4	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A7
31.	A4	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A8
32.	A4	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9
33.	A4	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10
34.	A4	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11
35.	A5	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A6
36.	A5	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A7
37.	A5	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A8
38.	A5	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9
39.	A5	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10
40.	A5	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11
41.	A6	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A7
42.	A6	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A8
43.	A6	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9
44.	A6	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10
45.	A6	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11
46.	A7	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A8
47.	A7	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9
48.	A7	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10
49.	A7	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11
50.	A8	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9
51.	A8	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10
52.	A8	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11
53.	A9	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10
54.	A9	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11
55.	A10	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11

Restore

Düşük SUVA Değerlikli Sular için Trihalometan Tahmin Modelinin Geliştirilmesi ve Analitik Hiyerarşi Yöntemi ile En İyi Tahmin Modelinin Belirlenmesi

Ek D K4 kriteri kullanılarak ikili karşılaştırılan seçeneklerin matrisi

Comparisons for Super Decisions Main Window: 1.sdm

1. Choose		2. Node comparisons with respect to Az Parametre Sayısı	
Node Cluster		Graphical Verbal Matrix Questionnaire Direct	
Choose Node		Comparisons wrt "Az Parametre Sayısı" node in "ALTERNATIVES" cluster	
Az Parametre S-		A1 is equally as important as A2	
Cluster: KRITERLER			
Choose Cluster			
ALTERNATIVES			
		Restore	

1.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A2
2.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A3
3.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A4
4.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A5
5.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A6
6.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A7
7.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A8
8.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9
9.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10
10.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11
11.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A3
12.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A4
13.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A5
14.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A6
15.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A7
16.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A8
17.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9
18.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10
19.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11
20.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A4
21.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A5
22.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A6
23.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A7
24.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A8
25.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9
26.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10
27.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11
28.	A4	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A5
29.	A4	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A6
30.	A4	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A7
31.	A4	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A8
32.	A4	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9
33.	A4	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10
34.	A4	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11
35.	A5	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A6
36.	A5	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A7
37.	A5	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A8
38.	A5	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9
39.	A5	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10
40.	A5	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11
41.	A6	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A7
42.	A6	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A8
43.	A6	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9
44.	A6	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10
45.	A6	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11
46.	A7	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A8
47.	A7	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9
48.	A7	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10
49.	A7	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11
50.	A8	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9
51.	A8	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10
52.	A8	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11
53.	A9	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10
54.	A9	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11
55.	A10	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11

Ek E K5 kriteri kullanılarak ikili karşılaştırılan seçeneklerin matrisi

Comparisons for Super Decisions Main Window: 1.sdm

1. Choose		2. Node comparisons with respect to Yüksek R2																				
Node	Cluster	Graphical	Verbal	Matrix	Questionnaire	Direct																
Choose Node		Comparisons wrt "Yüksek R2" node in "ALTERNATIVES" cluster																				
Yüksek R2		A1 is strongly to very strongly more important than A2																				
Cluster:	KRITERLER																					
Choose Cluster																						
ALTERNATIVES																						
1.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A2	
2.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A3	
3.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A4	
4.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A5	
5.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A6	
6.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A7
7.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A8	
8.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9	
9.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10	
10.	A1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11	
11.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A3	
12.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A4	
13.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A5	
14.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A6	
15.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A7	
16.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A8	
17.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9	
18.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10	
19.	A2	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11	
20.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A4	
21.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A5	
22.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A6	
23.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A7	
24.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A8	
25.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9	
26.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10	
27.	A3	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11	
28.	A4	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A5	
29.	A4	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A6	
30.	A4	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A7	
31.	A4	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A8	
32.	A4	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9
33.	A4	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10	
34.	A4	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11	
35.	A5	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A6	
36.	A5	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A7	
37.	A5	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A8	
38.	A5	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9	
39.	A5	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10	
40.	A5	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11	
41.	A6	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A7	
42.	A6	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A8	
43.	A6	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9	
44.	A6	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10	
45.	A6	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11	
46.	A7	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A8	
47.	A7	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9	
48.	A7	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10	
49.	A7	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11	
50.	A8	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A9	
51.	A8	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10	
52.	A8	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11	
53.	A9	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A10	
54.	A9	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11	
55.	A10	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	No comp.	A11	

Öğrenci ve Akademisyenlerin E-Öğrenmeye Hazır Bulunuşlarının Daha Az Soru ile Sınıflandırılması

Merter Hami KARACAN^{1,3*}, Sait Can YÜCEBAŞ²

^{1,2} Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çanakkale, Türkiye

³ Uşak Üniversitesi, Uşak, Türkiye

*¹ merterhk@gmail.com, ² can@comu.edu.tr

(Geliş/Received: 25/07/2022;

Kabul/Accepted: 30/11/2022)

Öz: Küresel boyuttaki KOVID-19 pandemisinin etkisiyle birlikte tüm dünyada alışveriş, çalışma ve eğitim gibi konular “uzaktan” ve “elektronik” olarak daha fazla değerlendirilmeye başlandı. Mart 2020’deki Yüksek Öğretim Kurumu kararının ardından Türkiye’deki tüm üniversiteler eğitimlerine uzaktan devam etme kararı almıştır. Bu karar sonucunda akademisyenlerin ve öğrencilerin e-öğrenme sürecine ne kadar hazır olduklarını değerlendiren çalışmalar da hızla artmıştır. Bu çalışmada iki farklı üniversitedeki akademisyen ve öğrencilerin e-öğrenmeye ne kadar hazır olduklarının incelendiği bir anket çalışmasına makine öğrenmesi teknikleri uygulanmış, daha az soru ile aynı sonuçların elde edilmesi hedeflenmiştir. Soruların azaltılmasında öz yinlemeli öz nitelik eleme yöntemi kullanılmış, azaltılan sorular ile en yüksek Cronbach Alpha değerini CatBoost ve XGBoost yöntemleri sağlamıştır. Ek olarak, en yüksek sonuç tahmin performansını destek vektör makineleri sağlamıştır. Destek vektör makineleri, daha az soru ile akademisyen yanıtlarını %100, öğrencilerin yanıtlarını %97.48 doğrulukla tahmin etmiştir. Önerilen yaklaşım, anket sonuçlarında en az kayıpla uzun süren anket verisi toplama süresini azaltmada yardımcı olacaktır.

Anahtar kelimeler: makine öğrenmesi, anket sınıflandırma, soru azaltma, e-öğrenmeye hazır bulunuşluk.

Classification of E-Learning Readiness of Students and Academics with Fewer Questions

Abstract: With the impact of the global COVID-19 pandemic, issues such as shopping, work and education have started to be evaluated more as "remote" and "electronic" all over the world. Following the decision of the Higher Education Institution in March 2020, all universities in Turkey continued their education remotely. As a result, the number of studies evaluating e-learning increased rapidly. In this study, machine learning techniques were used to reduce the number of questions in the survey without changing the final result in e-learning readiness surveys. Recursive feature elimination was used to reduce the number of the questions. Catboost and XGBoost methods provided the highest cronbach alpha value with the reduced questions. Additionally, support vector machines outperformed other models with 100% accuracy for academicians and 97.48% accuracy for students with fewer questions. The proposed approach will help in reducing the long survey data collection time with minimal loss in survey results.

Key words: machine learning, questionnaire classification, question reduction, e-learning readiness.

1. Giriş

2020 yılının başlarında tüm dünyada daha fazla hissedilen Covid-19 pandemisinin etkisi ile alışveriş, çalışma ve eğitim gibi konular “uzaktan alışveriş, uzaktan çalışma ve uzaktan eğitim” gibi seçeneklere daha fazla yönelmişlerdir. Türkiye’de Yüksek Öğretim Kurumunun 13 Mart 2020 tarihli bilgilendirme notuyla eğitime 3 hafta ara verilirken, 18 Mart 2020 tarihinde yapılan basın açıklaması ile eğitime verilen ara ucu açık şekilde uzatılmış ve üniversitelerden eğitimlere senkron veya asenkron şekilde devam etmek için gerekli çalışmalarını yapmaları istenmiştir [1]. Bu dönemde farklı üniversiteler Moodle, Google Classroom, Google Meet, Microsoft Teams, Zoom vb. platformları kullanarak uzaktan eğitim sürecine geçmişlerdir.

Bu kapsamlı uzaktan eğitim dönemine geçişten önce öğrencilerin ve öğretmenlerin (öğretmen, akademisyen) uzaktan öğrenme ile ilgili konularda görüşlerinden yararlanılarak yapılmış çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalar genelde anketlerle verilerin toplanması ve istatistiksel olarak değerlendirilmesi şeklinde yapılmıştır. Sosyal bilimlerle mühendislik çoklu disiplinleri alanında, kişilerden elde edilen bu anket ölçümlerinin makine öğrenmesi teknikleri ile incelendiği az sayıda çalışma bulunmaktadır. Yapılan çalışmalar genellikle katılımcıların demografik bilgileri ile anket sorularının istatistiksel özelliklerinin incelenmesi şeklindedir. 17.07.2022 tarihine

* Sorumlu yazar: merterhk@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-8605-8750, ² 0000-0002-1030-3545

kadar yapılan literatür çalışması sonucunda makine öğrenmesi teknikleri ile ölçüm kaybı oluşturmadan anket soru sayısının azaltılmasına yönelik sadece bir çalışmaya rastlanmıştır. Özen vd. tarafından yapılmış bu çalışmada e-öğrenmeye hazır bulunuşluk konusunda öğrencilerden alınan yanıtlar C4.5 algoritması ile budanarak oluşturulan karar ağacı ile sınıflandırılmıştır [2].

Yapılan literatür taraması makina öğrenme yöntemlerinin anket sonucu tahmin etmede yeni yeni kullanılmaya başladığını göstermektedir. Ancak ilgili anket veya anketlerin, içeriği ve ölçüm sonucu bozulmayacak şekilde daha az soru ile temsili için makina öğrenmesinin kullanılması alanında henüz bir çalışma yoktur. Bu motivasyonla gerçekleştirdiğimiz çalışmada farklı makine öğrenme yöntemleri kullanılarak, e-öğrenmeye hazır bulunuşluk anketlerindeki soru sayısının, anketin içeriği ve nihai ölçüm sonuçları değiştirilmeden, azaltılması amaçlanmıştır. Buna ek olarak anket sonuçlarının tahmini için de ilgili yöntemlerin başarımları performansları karşılaştırılmıştır. Çalışmanın literatüre katkısı iki başlıkta verilebilir. İlki ve en önemlisi makine öğrenme teknikleri ile ölçüm anketlerinde yer alan soru sayısının anket özünü etkilemeden değiştirilebileceği gösterilmiştir. Diğer yandan anketlerin değerlendirilmesi ve sonuç tahminlemede hangi makine öğrenme yönteminin daha başarılı olduğu test edilmiştir.

Makalenin akışı şu şekildedir; ikinci bölümde e-öğrenme ile ilgili geliştirilmiş ölçekler, ölçeklerden elde edilen sonuçlar ve ölçek sonuçlarına makine öğrenmesi yöntemlerinin uygulandığı çalışmalara değinilmiştir. Üçüncü bölümde veri toplama aracından ve ölçeği yanıtlayanlara ait bilgilere yer verilmiştir. Dördüncü bölümde verilerin toplanması, özniteliklerin belirlenmesi ve uygulanan makine öğrenmesi tekniklerinden bahsedilmiştir. Beşinci bölümde ölçek sonuçlarının analiz sonuçları ile makine öğrenmesi teknikleri ile elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Altıncı bölümde ölçek çalışmalarına makine öğrenmesi tekniklerinin kullanılması ile yapılabilecek iyileştirmelerden ve gelecekte yapılabilecek çalışmalardan bahsedilmiştir.

2. İlgili Çalışmalar

Pandemi döneminden önce e-öğrenmeye hazır bulunuşluk ile ilgili ölçekler devlet veya vakıf üniversitelerinin çeşitli bölümlerinde uygulanarak sonuçları değerlendirilmiştir [3]–[8]. İlgili anketler zaman içerisinde teknolojik gelişmeler ve değişen alışkanlıklar ile yenilenmiş ve güncellenmiştir [3]–[9]. Pandeminin yayılmasıyla birlikte, özellikle Mart 2020 tarihinden sonra yapılan bu çalışmalar hız kazanmıştır [9]–[21].

Sosyal veya eğitim bilimleri alanında kişilerin görüşlerinden elde edilen ölçüm sonuçlarının geleneksel istatistiksel yöntemlerle değerlendirildiği birçok çalışma mevcuttur [22]–[27]. Ayrıca makina öğrenme yöntemleri kullanılarak öz nitelik eleme çalışmalarının özellikle tıp alanında sıklıkla tercih edildiği görülmektedir [28]–[29]. Ancak anket uygulamalarından elde edilen verilerin makine öğrenme yöntemleri ile değerlendirildiği ve orjinal anketin özellik eleme yöntemleri ile daha az soru ile temsiledilebildiği çalışmalar oldukça azdır.

Eğitim alanında olmasa da anket sorularının makine öğrenmesi ile değerlendirildiği bir örnek çalışma Türkiye hane halkı zeytinyağı tüketimi hakkında karar ağaçları uygulanarak yapılmıştır [30]. Yakın zamanda eğitim alanında yapılmış az sayıdaki örneklerden birisi, öğretmenlerin FeTeMM farkındalık ölçeğine verdikleri yanıtlara C5.0 algoritması uygulandığı çalışmadır [31]. Bir diğer çalışmada [32] teknoloji bağımlılığı konusunda C4.5 algoritması kullanılarak %84 başarılı sonuç elde edilmiştir.

PISA 2012 Matematik okuryazarlığı Türkiye araştırması puanlarının J.48 ve CHAID karar ağacı ile analiz edilip sınıflandırıldığı bir çalışma yapılmıştır [33]. Özyeterlik, tutum, çalışma disiplini, kaygı ve ilgi faktörleri ile öğrencilerin matematik okuryazarlıkta başarılı veya başarısız olarak sınıflandırılması yapılmıştır.

“Üniversite öğrencilerinin bilgi okuryazarlık öz-yeterlik algısı” konusunda toplanan yanıtlar karar ağacı ile incelenmiştir [34]. Üniversite öğrencilerine Wikipedia kullanma becerisi, Facebook kullanma becerisi, haftalık internet kullanma süresi, yabancı dil düzeyi, sınıf ve cinsiyet verilerinin elde edildiği ölçek sonuçları ile oluşturulan bir CART karar ağacı analiz edilmiştir. İleri derecede Wikipedia kullanabilen kadın öğrencilerin en yüksek bilgi okuryazarlığı öz-yeterlik algısına sahip olduğu gösterilmiştir.

“Türkiye’deki ortaöğretim öğrencilerinin internet bağımlılık düzeyini etkileyen faktörlerin” araştırılması amacıyla 754 ortaöğretim öğrencisinden İnternet Bağımlılık Ölçeği ile toplanan verilere CHAID karar ağacı yöntemi uygulanmış ve öğrencilerin ailelerinin sosyal durumları ve öğrencilerin internet kullanım verilerine göre sonuçları incelenmiştir [35]. Elde edilen sonuçlarda interneti kullanım amacı, günlük internet kullanım saati, cinsiyet, ailenin gelir düzeyi ve babanın eğitim düzeyi değişkenlerinin belirleyici olduğu bulunmuştur.

Yapmış olduğumuz çalışmaya en yakın çalışma ise Özen vd. tarafından öğrencilerin e-öğrenmeye hazır bulunuşluklarının ölçüldüğü, ilgili sorulardan C4.5 yöntemi ile budanmış bir karar ağacı elde edildiği çalışmadır [2]. Bu çalışmada 667 öğrencinin 3 faktörden oluşan 19 soruya verdiği yanıtlar kullanılmıştır. C4.5 algoritması sonucunda elde edilen beş kuralda üç tane soruya verilmiş yanıtlar kullanılmıştır. Bu sayede üç soru ile e-öğrenmeye hazır ve hazır değil olmak üzere %83 başarılı tahmin elde edilmiştir. Yanıtlar k-ortalama ile gruplandırıldığında ise %70 başarılı tahmin elde edilmiştir.

Yaptığımız çalışmada iki farklı üniversitede eğitim gören öğrenciler ve eğitim veren akademisyenler tarafından yanıtlanan iki farklı ölçek kullanılmıştır [36]. Yanıtlarının ortalamalarına göre öğrenci ve akademisyenler “hazır değil”, “kısmen hazır” ve “hazır” şeklinde üç eşit gruba ayrılmıştır. Kullanılan ölçekte yer alan soruları azaltarak benzer sonuçlara makine öğrenmesi yöntemleri ile ulaşmak için öz yinelenmeli özneliteleme yöntemi [37] kullanılarak sorular azaltılmıştır. Sınıflandırıcı olarak karar ağacı temelli yöntemler ile destek vektör makineleri, k-en yakın komşu, rastgele orman, gradyan artırma, CatBoost ve XGBoost kullanılmıştır.

3. Materyal

Çalışmada kullanılan veriler birden fazla evrenden elde edilmiştir. Uşak Üniversitesi 2021 bahar döneminde kayıtlı bulunan yüz doksan dokuz lisans öğrencisi ile ders veren otuz üç akademik personel ve Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi 2021 bahar döneminde kayıtlı kırk lisans öğrencisi ile aynı dönemde ders veren beş akademik personel ölçekleri yanıtlamıştır. Araştırmaya katılım sayıları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Örneklem sayıları.

	Uşak Üniversitesi	Ç.O.M.Ü.	Toplam
Lisans Öğrencileri	199	40	239
Akademik Personeller	33	5	38

Uşak üniversitesi öğrencilerinden ölçeği yanıtlayan yüz doksan dokuz katılımcının ve ÇOMÜ öğrencilerinden ölçeği yanıtlayan kırk katılımcının fakülterlere göre dağılımları ve yüzdeleri Tablo 2’te verilmiştir.

Tablo 2. Fakülterlere göre öğrenci yanıtlarının dağılımı.

Uşak Üniversitesi Öğrencileri	Frekans	Yüzde	Çanakkale O.M. Üniversitesi	Frekans	Yüzde
Fen Edebiyat Fakültesi	35	17.59	Mühendislik Fakültesi	37	92.5
Eğitim Fakültesi	31	15.58	Eğitim Fakültesi	2	5
İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi	25	12.56	Çanakkale Uygulamalı Bilimler Fakültesi	1	2.5
İletişim Fakültesi	25	12.56			
Mühendislik Fakültesi	22	11.06			
Sağlık Bilimleri Fakültesi	15	7.54			
İslami İlimler Fakültesi	15	7.54			
Uygulamalı Bilimler Fakültesi	14	7.04			
Spor Bilimleri Fakültesi	5	2.51			
Ziraat Fakültesi	4	2.01			
Mimarlık ve Tasarım Fakültesi	3	1.51			
Dış Hekimliği Fakültesi	2	1.01			
Tıp Fakültesi	1	0.5			
Güzel Sanatlar Fakültesi	1	0.5			
Yabancı Diller Yüksekokulu	1	0.5			
Toplam	199	100%	Toplam	40	100%

Her iki üniversiteden çalışmaya katılmış olan öğrencilerin Hazırlık, 1, 2, 3, 4 ve üzeri sınıf olması durumuna göre dağılımları ve yüzdeleri Tablo 3’te gösterilmiştir.

Tablo 3. Sınıflara göre Uşak Üniversitesi öğrencilerinin ve ÇOMÜ öğrencilerinin dağılımı

Sınıf	Uşak Üniversitesi		Ç.O.M.Ü.	
	Frekans	Yüzde	Frekans	Yüzde
Hazırlık	7	3.54	0	0
1. sınıf	73	36.87	9	22.50
2. sınıf	41	20.71	17	42.50
3. sınıf	29	14.65	7	17.50
4 ve üzeri sınıf	48	24.24	7	17.50
Toplam	199	100%	40	100%

Uşak Üniversitesi ve ÇOMÜ akademik personellerinden araştırmaya katılanların unvanlarına göre dağılımları Tablo 4’te gösterilmiştir.

Tablo 4. Akademik personellerin unvana göre dağılımları

Unvan	Uşak Üniversitesi		Ç.O.M.Ü.	
	Frekans	Yüzde	Frekans	Yüzde
Profesör / Profesör Doktor	2	6.06	0	0
Doçent / Doçent Doktor	6	18.18	0	0
Doktor Öğretim Üyesi	8	24.24	1	80.0
Öğretim Görevlisi	13	39.39	4	20.0
Araştırma Görevlisi	4	12.12	0	0
Toplam	33	100%	5	100%

4. Yöntem

4.1. Verilerin toplanması

Her iki üniversitedeki öğrencilere Demir ve Yurdağül tarafından geliştirilmiş “Üniversite Öğrencilerinin E-öğrenmeye Hazır Bulunuşluğu Ölçeği” ve her iki üniversitedeki akademik personele Demir tarafından geliştirilmiş “Akademisyenlerin E-öğrenmeye Hazır Bulunuşluğu Ölçeği” [36], Google Forms ile çevrimiçi olarak uygulanmıştır. Öğrencilere uygulanan ölçek, otuz üç sorudan ve yedili likert tipi cevaplar şeklindedir. Ölçek altı alt faktörden oluşmaktadır, bunlar “Bilgisayar öz yeterliği”, “İnternet öz yeterliği”, “Çevrimiçi iletişim öz yeterliği”, “Kendi kendine öğrenme”, “Öğrenen kontrolü”, “E-öğrenmeye yönelik motivasyon” şeklindedir. Akademik personele uygulanan ölçek otuz beş sorudan ve likert tipi cevaplardan oluşmaktadır. Akademik personele uygulanan ölçeğin dört alt faktörü bulunmaktadır, bunlar; “Bilgi ve iletişim teknolojileri kullanım öz yeterliği”, “E-öğrenmede kendine güven”, “E-öğrenmeye yönelik tutum”, “E-öğrenmeye yönelik eğitim ihtiyacı” şeklindedir. Çalışmaya katılan öğrencilerden fakülte, sınıf, bölüm bilgileri ve akademik personelden unvan, fakülte, bölüm bilgileri alınmıştır.

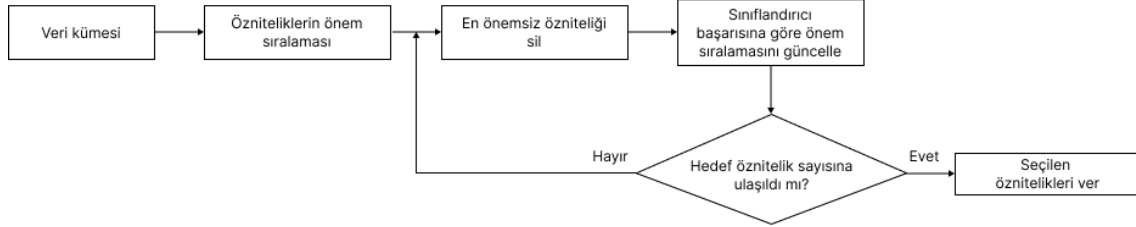
4.2. Öznitelik seçimi ve sınıflandırma

Sınıflandırma tekniklerinin uygulanması için Python programlama dili ve Scikit-Learn kütüphanesinden faydalanılmıştır [38]. Öznitelik seçiminde özyinelemeli öznitelik eleme (recursive feature elimination, RFE) yöntemi kullanılmıştır. Ancak CatBoost, XGBoost kendi içinde öznitelik önemi hesaplayabildikleri için ilgili yöntemlerde RFE kullanılmamıştır.

Öznitelik sıralamasından sonra her sınıflandırıcı için en önemli ilk öznitelikten başlayarak yirmi öznitelik kadar birer öznitelik artırılarak en yüksek başarıyı en az soruyla veren öznitelik sayıları aranmıştır. Bu yaklaşım ile soruların yaklaşık yarısının elenmesi hedeflenmiştir.

4.2.1. Özyinelemeli öznelik eleme (Recursive Feature Elimination, RFE)

Özyinelemeli öznelik eleme yöntemi (RFE) ilk olarak 2002 yılında Guyon tarafından gen seçimi için önerilmiştir [37]. Günümüzde farklı alanlarda öznelik seçimi için kullanılan bu yöntemin temel akışı Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Özyinelemeli öznelik eleme yönteminin akış diyagramı

RFE yönteminde öncelikle öznelik sayısı ve bu öznelikleri seçecek sınıflandırıcılar belirlenir. Daha sonra RFE istenen öznelik sayısına ulaşmaya kadar verilen sınıflandırma yöntemi ile tüm parametreleri özyinelemeli olarak dolaşarak her özneliği önem derecesine göre sıralar ve en önemsiz özneliği eleyerek devam eder.

4.2.2. Destek vektör makineleri (Support Vector Machines, SVM)

Destek vektör makineleri (DVM), Vapnik vd. tarafından geliştirilmiş iki veri grubu arasındaki aralığı (margin) hesaplayarak birbirinden ayıran denetimli bir öğrenme yöntemidir [39]. Eşitlik 1'de gösterildiği üzere y_i sınıflandırma sonucu olmak üzere, x_i sınıflandırılacak vektörü, w sınıflandırıcının ağırlık vektörünü ve b sınıflandırıcının yanlılığını belirtmektedir. C değişkeni ile sınıflandırıcının kabul edilebilir hatası belirtilir. w ve b değişkenleri sınıflandırıcının eğitimi sırasında belirlenir.

$$y_i = \begin{cases} +1 & \text{eğer, } w \cdot x_i + b \geq +1 - C \\ -1 & \text{eğer, } w \cdot x_i + b \leq -1 + C \end{cases} \quad (1)$$

Bu çalışmada destek vektör sınıflandırma yöntemi, kişilerin verdikleri bazı yanıtlardan, ait oldukları e-öğrenmeye hazır bulunuş sınıfını tahmin etmek için kullanılmıştır. Sınıflandırma sırasında C değeri 1.0 olarak belirlenmiştir, b değeri ise RFE ile öznelik önem sıraları belirlenirken her sınıf için sırasıyla $b_{\text{öğrenci}} = \{6, 13, 13\}$ ve $b_{\text{akademisyen}} = \{14.27, 5.8, 7.58\}$ olarak hesaplanmıştır.

4.2.3. K-En yakın komşular (K Nearest Neighbours, KNN)

Bir veri kümesinde seçilen parametreler arasındaki uzaklığa göre, en yakın bulunan k adet sınıfa göre sınıflandırma yapan denetimli öğrenme yöntemidir. KNN; sınıflandırma, regresyon ve aykırılıkları tespit etmek gereken problemlerde kullanılabilir.

Veri kümesindeki noktaların birbirlerine uzaklığının bulunması için farklı ölçütler kullanılsa da en sık tercih edilen ölçüt Eşitlik-2'de verilen Öklid uzaklığıdır.

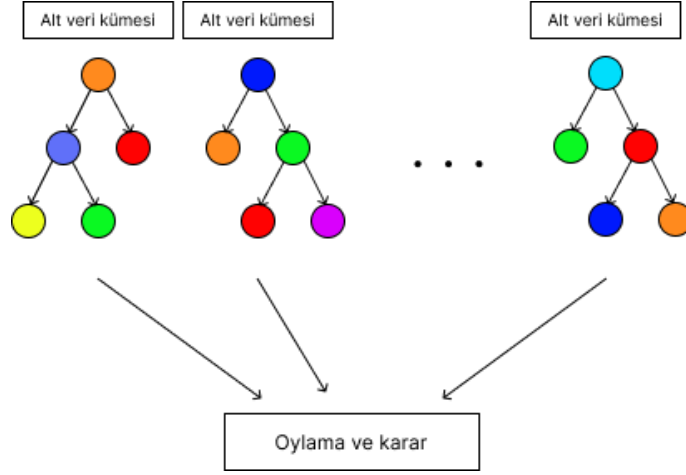
$$Uzaklık = \sqrt{(a_1 + a_2)^2 + (b_1 + b_2)^2 + \dots + (n_1 + n_2)^2} \quad (2)$$

Yukarıdaki eşitlikte öznelik kümesi $\tilde{O} = \{a, b, \dots, n\}$ şeklinde verilmiştir. Bu çalışmada RFE ile seçilmiş öznelikler, KNN yöntemiyle $k=3$ ve $k=5$ için ayrı ayrı sınıflandırılmıştır.

4.2.4. Rastgele orman (Random Forests, RF)

Rastgele orman veya rastgele karar ağacı ormanı şeklinde adlandırılan bu yöntemle bir sınıflandırıcı (genellikle karar ağaçları) rastgele ve birden fazla şekilde oluşturulur. Bu rastgele oluşturulmuş yöntemlere

torbalama (bagging) yöntemi denmektedir. Yöntemin sonucu, torba içindeki her bir bireysel yöntemin sonucunun oylama veya ağırlıklı oylama ile belirlenmesine dayanır [40]. Rastgele orman yöntemi genelde tek karar ağacı içeren yöntemlerden daha iyi sonuçlar üretmektedir [41]. Şekil 2’de gösterildiği üzere farklı alt veri kümeleri ile oluşturulan farklı karar ağaçlarının sınıflandırma sonuçlarının oylaması ile Rastgele Orman algoritmasının sınıflandırma sonucu elde edilir.



Şekil 2. Rastgele orman algoritması, her renk bir özneliği ifade eder.

Bu çalışmada RFE ile seçilmiş özneliklerden elde edilen alt veri kümeleri ile Gini indeksi [42] kullanan yüz karar ağacı ile sınıflandırılmıştır.

4.2.5. Gradyan arttırma (Gradient Boosting), CatBoost, XGBoost

Çalışmada topluluk (ensemble) ve arttırma (boosting) teknikleriyle geliştirilmiş karar ağacı yöntemleri olan Gradyan Arttırma, CatBoost ve XGBoost sonuçları da sunulmuştur.

Gradyan arttırma (gradient boosting) yönteminde zayıf bir sınıflandırıcı her adımda kayıp fonksiyonuna göre yeni karar ağacını optimize ederek zayıf sınıflandırıcının başarısını arttırarak ilerlemektedir [43]. Gradyan arttırma sınıflandırıcıda öğrenme oranı (learning rate) 0.1 olarak seçilmiştir, kayıp fonksiyonu olarak sapıklık (deviance) değeri kullanılmıştır. Yüz adet sınıflandırıcı oluşturulmuştur.

XGBoost (eXtreme Gradient Boosting) karar ağacı arttırma (boosting) temelli, performans odaklı, paralel ve dağıtık çalışabilen, eksik verilere toleranslı gelişmiş bir sınıflandırıcıdır [44], [45]. Bu çalışmadaki sonuçlar XGBoost ile sıralanmış özneliklerin sırayla sınıflandırma kümesine dahil edilmesi ile elde edilmiştir.

CatBoost (Categorical Boosting), simetrik ikili karar ağacı oluşturabilen, kategorik verileri kendisi kodlayabilen ve kestirim kayması (prediction shift) problemini sıralı hedef istatistiği (ordered target statistics) ile çözen bir yöntemdir [46], [47]. XGBoost gibi paralel çalışabilir ve daha hızlı sınıflandırma yapabilir [46]. Elde edilen sonuçlar CatBoost ile önemine göre sıralanmış özneliklerin sırayla sınıflandırmaya dahil edilmesiyle bulunmuştur. CatBoost sınıflandırıcı her adımda yüz iterasyon çalıştırılarak eğitilmiştir.

5. Bulgular

Bu bölümde araştırma sonucu elde edilen bulgular, ölçek sonuçlarının analizi ile öznelik seçimi ve sınıflandırma sonuçları şeklinde iki alt başlıkta sunulmuştur.

Yanıtların Cronbach Alpha değerleri incelendiğinde Uşak Üniversitesi öğrenci ve akademisyenleri ile Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Öğrencileri için güvenilirlik değerleri sırasıyla 0.964, 0.936, 0.966 iken, ÇOMÜ Akademisyenlerinin yedi yanıtı için bu değer daha düşük şekilde 0.741 olarak çıkmıştır. Yanıtların Cronbach Alpha değerleri Tablo 5’te gösterilmiştir.

Tablo 5. Verilen yanıtların Cronbach Alpha değerleri.

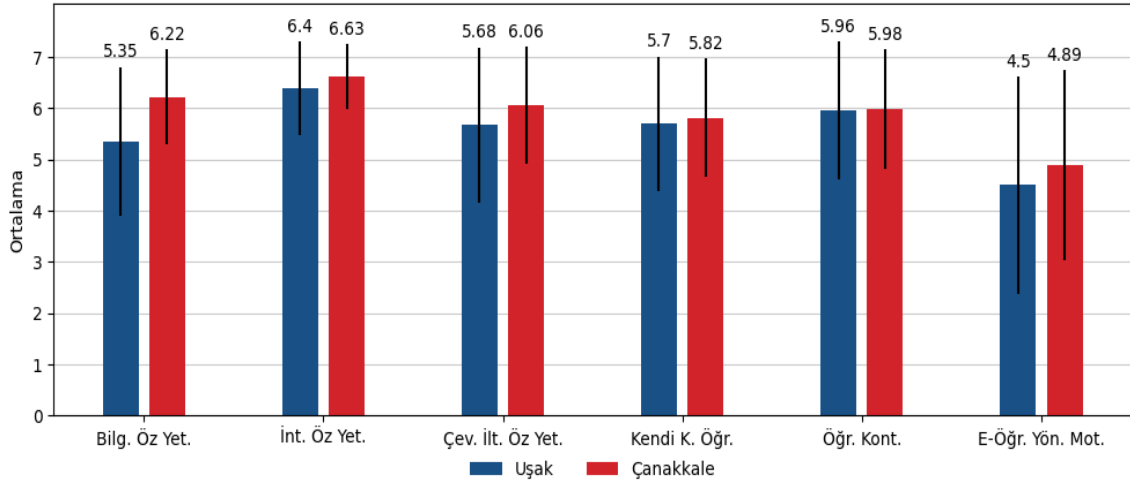
Uşak Üniversitesi		Çanakkale O.M. Üniversitesi	
Öğrenci	Akademisyen	Öğrenci	Akademisyen
0.964	0.936	0.966	0.741

ÇOMÜ için Cronbach Alpha değerinin nispeten düşük çıkması, katılımcı sayısının azlığı ile açıklanabilir.

5.1. Ölçek sonuçlarının analizi

Uşak Üniversitesi öğrencilerinden alınan yanıtlar faktörlere göre gruplandırıldığında en yüksek ortalamanın İnternet öz-yeterliği faktöründe olduğu görülmektedir, en düşük ortalama ise e-öğrenmeye yönelik motivasyon faktöründe bulunmaktadır. En düşük standart sapma İnternet öz-yeterliği faktöründe, en yüksek standart sapma ise e-öğrenmeye yönelik motivasyonda bulunmaktadır.

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi öğrencilerinin verdiği yanıtlar faktörlere göre gruplanıp ortalama ve standart sapma değerleri incelendiğinde Uşak Üniversitesi öğrencilerinin yanıtlarına benzer sonuçlar görülmektedir. ÇOMÜ öğrencilerinin sonuçlarında da en yüksek ortalama ve en düşük standart sapma internet öz yeterliği faktöründe, en düşük ortalama ve en yüksek standart sapma E-öğrenmeye yönelik motivasyon faktöründe bulunmaktadır. ÇOMÜ ve Uşak Üniversitesi öğrencilerinin yanıtlarının faktörlere göre ortalama ve standart sapma grafiği Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Öğrencilerinin yanıtlarının faktörlere göre ortalama ve standart sapma değerleri.

Uşak Üniversitesi Öğrencilerinin yanıtlarının fakültelere göre faktör dağılımları on beş yanıt ve üzerinde katılımcı bulunanlara göre incelendiğinde Mühendislik Fakültesi öğrencilerinin yanıtları Kendi kendine öğrenme faktörü hariç tüm faktörlerde en yüksek ortalamaya sahiptir. İslami İlimler Fakültesi öğrencilerinin ise e-öğrenmeye yönelik motivasyon faktörü hariç tüm faktörlerde yanıtları en düşük ortalamaya sahip görünmektedir. Fakültelere göre ortalama faktör değerleri Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 6. Katılım sayısı on beşten fazla olan fakültelerin faktörlere göre ortalama değerleri.

	Bilgisayar Öz-Yeterliği	İnternet Öz-Yeterliği	Çevrimiçi İletişim Öz-Yeterliği	Kendi Kendine Öğrenme	Öğrenen Kontrolü	E-öğrenmeye Yönelik Motivasyon
Eğitim Fakültesi	5.14	6.35	5.71	5.75	5.86	4.63
Fen Edebiyat Fakültesi	5.13	6.24	5.33	5.43	5.97	3.87
Mühendislik Fakültesi	6.23	6.8	6.29	5.76	6.23	5.38
Sağlık Bilimleri Fakültesi	4.97	6.35	5.39	5.72	5.78	4.01*
İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi	5.37	6.57	5.82	5.7	6.08	4.98
İletişim Fakültesi	5.93	6.86	6.22	6.02	6.1	4.45
İslami İlimler Fakültesi	4.63*	5.85*	4.87*	4.96*	4.98*	4.38
Ortalama	5.34	6.43	5.66	5.62	5.86	4.53
ÇOMÜ Mühendislik Fakültesi **	6.31	6.67	6.09	5.82	6.09	4.91
Genel Ortalama	5.46	6.46	5.72	5.65	5.89	4.58

* En düşük değerler.

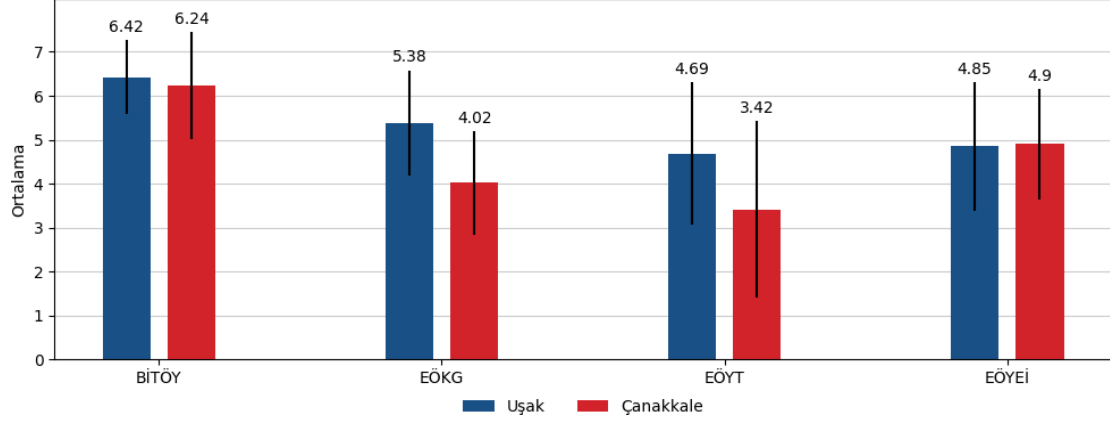
** Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesinden araştırmaya katılan, on beşten fazla yanıt bulunan tek fakülte. Bilgisayar Öz-Yeterliği faktöründe daha yüksek sonuç elde edilmiştir.

Her iki üniversiteden alınan yanıtların sınıflara göre faktör değerleri Tablo 7’de gösterilmiştir. Bu tabloya göre İnternet öz-yeterliği faktöründe Uşak Üniversitesi ve Ç.O.M.Ü. öğrencilerinde dört veya üzeri sınıf öğrencilerinin değeri diğer sınıflardan daha yüksek bulunmuştur. Bilgisayar öz-yeterliği faktöründe Uşak Üniversitesinde en yüksek değere üçüncü sınıftaki öğrencilerde ulaşılmıştır, ÇOMÜ’de ise dört veya üzeri sınıftaki öğrencilerde en yüksek değere ulaşılmıştır. Çevrimiçi iletişim öz-yeterliği faktöründe her iki üniversitede de dört veya üzeri sınıf öğrencileri en yüksek düzeye ulaşmıştır. Kendi kendine öğrenme ve Öğrenen Kontrolü faktörlerinde en yüksek değerler ÇOMÜ’de eğitim göre dört veya üzeri sınıf öğrencileri iken, Uşak Üniversitesinde üçüncü sınıf öğrencileri daha yüksek bulunmuştur. E-öğrenmeye yönelik motivasyon faktöründe ÇOMÜ ikinci sınıf öğrencileri diğer sınıflardan daha yüksek değere sahiptir, Uşak Üniversitesinde en yüksek değer üçüncü sınıf öğrencilerinde görülmektedir.

Tablo 7. Sınıflara göre faktör değerleri.

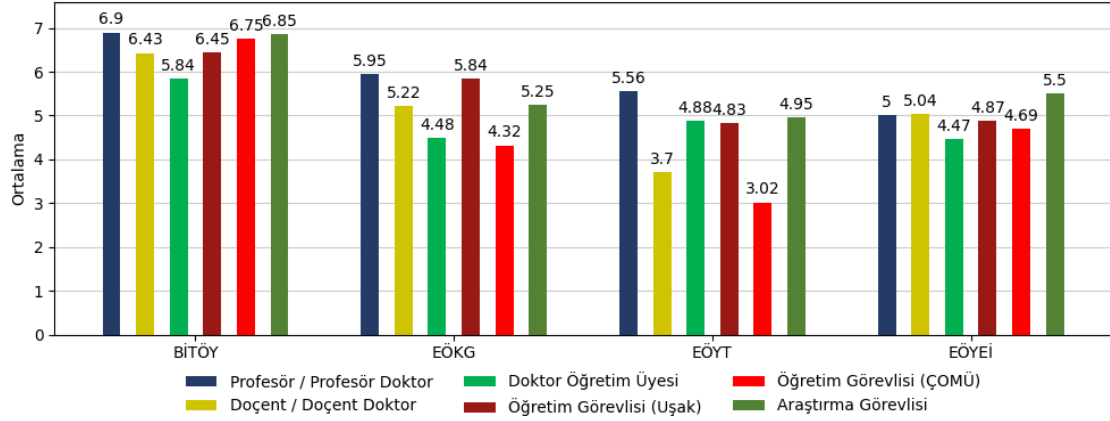
	Bilgisayar Öz-Yeterliği	İnternet Öz-Yeterliği	Çevrimiçi İletişim Öz-Yeterliği	Kendi Kendine Öğrenme	Öğrenen Kontrolü	E-öğrenmeye Yönelik Motivasyon
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi						
1. Sınıf	5.89	6.44	5.42	5.47	5.69	4.3
2. Sınıf	6.19	6.59	6.06	5.76	5.87	5.29
3. Sınıf	6.34	6.71	6.11	5.68	5.82	4.73
4 veya üzeri sınıf	6.6	6.89	6.86	6.55	6.79	4.82
Uşak Üniversitesi						
1. Sınıf	5.05	6.23	5.46	5.47	5.79	4.18
2. Sınıf	5.04	6.38	5.2	5.55	5.73	4.21
3. Sınıf	5.75	6.57	6.03	6.1	6.33	5.53
4 veya üzeri sınıf	5.85	6.67	6.21	5.86	6.16	4.68
Hazırlık	5.06	5.68	5.31	6.02	6.18	3.57

Çalışmada akademisyenlerin verdikleri yanıtlardan elde edilen faktör değerleri incelendiğinde Uşak ve Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi arasında BİT öz yeterliliği ve E-Öğrenmeye yönelik eğitim ihtiyacı seviyeleri birbirine yakın bulunmuştur. E-öğrenmede kendine güven ve e-öğrenmeye yönelik tutum değerlerinde Uşak Üniversitesinden alınan yanıtlar daha yüksek bulunmuştur. Akademisyenlerin yanıtlarını faktörlere göre ortalama ve standart sapma değerleri Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Akademisyenlerin yanıtlarının faktörlere göre ortalama ve standart sapma değerleri.

Akademik personellerin unvana göre dağılımından edilen faktör değerleri incelendiğinde BİT öz yeterliliği faktöründe tüm unvanlarda sonuçların altı ila yedi aralığında olduğu görülmektedir. Doktor öğretim üyeleri ve öğretim görevlilerinin (Ç.O.M.Ü.) E-öğrenmede kendine güven, E-Öğrenmeye yönelik tutum ve E-öğrenmeye yönelik eğitim ihtiyacı düzeyleri diğer unvanlardan daha düşük bulunmuştur. Unvanlara göre faktör değerleri Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Unvanlara göre faktör değerleri.

5.2. Öznitelik seçimi ve sınıflandırma sonuçları

Öznitelik seçimi için kullanılan üç farklı yöntemle elde edilen önem sıralamaları Tablo 8 ve Tablo 9'da sunulmuştur. RFE ile özniteliklerin doğrudan sıralaması elde edilirken, XGBoost ve CatBoost öznitelikler için önem değeri oluşturmaktadır. Bu önem derecesine göre öznitelikler en önemliden en önemsiz doğru sıralanmıştır. Tablodaki soru numaraları ölçeğin sunulduğu yayından alınmıştır [36].

Tablo 8. Öğrencilere sorulan soruların RFE, XGBoost ve CatBoost ile elde edilmiş önem sıralamaları.

Sıra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
RFE	6	33	20	10	7	25	30	18	4	15	28	1	13	22	5	23	16	3	31	11	17	8	9	21	29	32	26	24	14	12	2	27	19
XGBoost	28	31	16	19	13	15	30	11	33	4	14	29	21	6	22	1	26	9	20	3	18	25	32	2	5	27	10	24	7	17	12	23	8
CatBoost	11	27	29	3	16	30	22	33	18	31	15	28	19	26	1	4	13	14	5	21	20	25	10	32	8	12	23	24	17	6	2	7	9

Tablo 9. Akademik personele sorulan soruların RFE, XGBoost ve CatBoost ile elde edilmiş önem sıralamaları.

Sıra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
RFE	26	15	28	34	27	11	9	6	24	8	3	19	33	25	22	13	16	5	18	20	32	12	31	2	14	21	35	7	10	23	1	30	29	4	17
XGBoost	26	10	28	24	3	19	6	13	29	31	11	27	2	15	8	1	22	32	18	9	14	34	20	16	25	12	23	21	4	5	7	17	30	33	35
CatBoost	26	28	3	12	2	10	24	31	27	21	30	25	22	6	14	20	8	7	9	18	16	13	11	23	29	35	34	17	19	32	5	15	1	33	4

Tablo 8’de gösterilen sıralamada en önemli sorular RFE için 1. soru, XGBoost için 28. soru ve CatBoost için 11. soru iken en önemsiz sorular RFE için 19. soru, XGBoost için 8. soru ve CatBoost için 9. soru olarak bulunmuştur. Tablo 9’da akademisyenlere sorulan soruların en önemlisi üç yöntemle de 26. soru, en önemsiz sorular ise RFE için 17. soru, XGBoost için 35. soru ve CatBoost için 4. soru olarak bulunmuştur.

RFE ile elde edilen sıralama kullanılarak akademisyen ve öğrenciler için DVM, KNN, Rastgele Orman, Gradyan Arttırma sınıflandırma sonuçları ve seçilen soruların Cronbach Alpha değerleri Tablo 10’da gösterilmiştir.

Akademik personelin yanıtları için sınıflar “Hazır değil” (1-4.5), “Kısmen Hazır” (4.5-5.6) ve “Tamamen Hazır” (5.6-7) şeklinde her sınıfa yaklaşık on üç kayıt gelecek şekilde üç grup olarak oluşturulmuştur. Öğrencilerin yanıtları için sınıflar “Hazır değil” (1-5.3), “Kısmen Hazır” (5.3-6.3) ve “Tamamen Hazır” (6.3-7) şeklinde her sınıfa yaklaşık seksen iki kayıt gelecek şekilde üç grup olarak oluşturulmuştur.

Yöntemler bir-tane-dışarıda (LeaveOneOut) şeklinde eğitilerek test edilmiştir. Eğitim verileri her iki üniversiteden katılan tüm akademisyenlerin yanıtlarından ve tüm öğrencilerin yanıtlarından oluşturulmuştur.

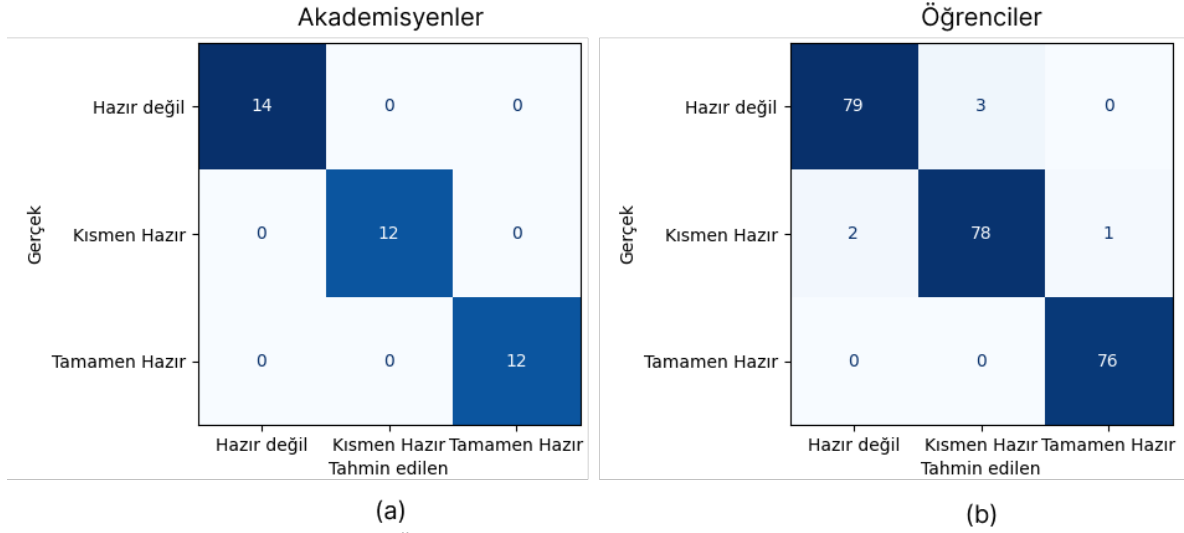
Tablo 10. Akademik personellerin yanıtları için sınıflandırma sonuçları

Yöntem	Akademisyenlerin E-Öğrenmeye Hazır Bulunuşluğu				Öğrencilerin E-Öğrenmeye Hazır Bulunuşluğu			
	Öznitelik Sayısı	Başarım	Cronbach Alpha	F-Skor	Öznitelik Sayısı	Başarım	Cronbach Alpha	F-Skor
DVM *	10	100	0.79	1.0	16	97.48	0.92	0.97
KNN (n=3) *	9	92.10	0.76	0.92	18	89.12	0.93	0.89
KNN (n=5) *	9	89.47	0.76	0.89	15	89.12	0.91	0.89
Rastgele Orman *	11	89.47	0.79	0.89	15	91.21	0.91	0.91
Gradyan Arttırma *	6	92.10	0.76	0.91	12	87.02	0.89	0.87
CatBoost	9	92.10	0.85	0.92	16	90.48	0.94	0.90
XGBoost	10	92.10	0.88	0.91	19	88.70	0.94	0.88

* Özyinelemeli öznitelik eleme (RFE) uygulanarak öznitelikler önem sırasıyla seçilmiştir.

Öğrenci ve akademik personellerin yanıtlarından elde edilen sonuçlar birlikte incelendiğinde en yüksek doğru tahmini destek vektör makineleri (DVM) sağlamaktadır. Tüm sınıflandırıcılar için F-Skor değeri yüksek bulunmuştur. Yanıt sayısının az olması nedeniyle akademik personelin yanıtlarından elde edilen Cronbach Alpha değerleri daha düşük bulunmuştur. Öğrencilerin seçilen sorulara verdikleri yanıtlarla Cronbach Alpha değerleri yeterli yükseklikte bulunmuştur. CatBoost ve XGBoost ile seçilen ölçek sorularına verilen yanıtlar ile Cronbach Alpha değerleri hesaplandığında diğer yöntemlerden daha yüksek bulunmaktadır.

Akademisyen yanıtlarında hatasız tahmin sağlanmıştır. Öğrenci tahminlerinde üç “Hazır Değil” sınıfı “Kısmen Hazır” olarak, iki “Kısmen Hazır” sınıfı “Hazır değil” olarak, bir “Kısmen Hazır” sınıfı ise “Tamamen hazır” olarak sınıflandırılmıştır. Destek vektör makineleri ile yapılan sınıflandırmaların karmaşıklık matrisleri Şekil 6’da gösterilmiştir.



Şekil 6. Akademisyenlerin (a) ve Öğrencilerin (b) yanıtlarının sınıflandırılmasının karmaşıklık matrisleri

Karmaşıklık matrisi incelendiğinde akademisyenler için yanıt sınıflandırmasında DVM'nin hatasız sonuçlar ürettiği görülmektedir. Öğrenci anketleir için ise, “tamamen hazır“ sınıfı %100 oranda doğru tahmin edilirken, “kısmen hazır” ve hazır değil sınıfları için doğruluk oranı %96 seviyesindedir.

6. Sonuç

Daha önceki çalışmalar incelendiğinde ölçek sorularının irdelendiği ve yanıtlayanların demografik özelliklerinden çıkarım yapıldığı görülmektedir. Ölçek sorularının incelendiği çalışmalarda makine öğrenmesi tekniği olarak genellikle C4.5 tercih edilmiştir. Bu çalışmada ise iki farklı üniversiteden elde edilen iki farklı ölçek yanıtları alanyazında daha az kullanıldığı görülen makine öğrenmesi yöntemleri ile incelenmiştir. Çalışmamız e-öğrenmeye hazır bulunuş konusunda uygulanan ölçeklerin içerdiği soruların makine öğrenmesi teknikleri ile daha da azaltılmasını öneren yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Anket sorularının azalması katılımı arttırabileceği gibi yanıtlama için geçen süreyi de azaltacaktır.

Bu çalışmada iki farklı üniversitede eğitim görmekte olan öğrencilere ve eğitim vermekte olan akademisyenlere “e-öğrenmeye hazır bulunuş” hakkında uygulanan ölçeklerin sonuçları ve bazı makine öğrenmesi yöntemleri ile daha az ölçek sorusu kullanılarak bir sınıflandırma yapılabileceği gösterilmiştir.

Ölçek sonuçları incelendiğinde iki üniversitede eğitim gören öğrenciler arasında belirgin bir fark ortaya çıkmamıştır. Akademisyenler incelendiğinde ise Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi tarafından katılım kıyaslama yapmak için yeterli değildir. Sınıflandırma sonuçları incelendiğinde makine öğrenmesi yöntemleri ile öğrencilere sorulmuş otuz üç soru yerine Tablo 8’de gösterilen RFE ile sıralanmış ilk on altı soru kullanılarak 0.92 Cronbach Alpha katsayısına ve %97.48 tahmin başarısına erişilmiştir. Tablo 9’da sıralaması gösterilmiş otuz beş soru yerine 0.79 Cronbach Alpha değerine sahip ilk on soru kullanılarak akademisyenlerin yanıtları üç sınıf için %100 başarılı tahmin edilebilmiştir. Tablo 8 ve Tablo 9’da sırası verilen sorulardan Tablo 10’da gösterilen öznelik sayısı kadar soru alınarak Cronbach Alpha değeri hesaplandığında akademik personel yanıtlarının 0.76 ile 0.88 arasında olduğu görülmektedir. Öğrencilerin yanıtları için hesaplanan Cronbach Alpha değeri ise 0.89 ile 0.94 arasında güvenilir düzeyde bulunmuştur.

Bu çalışma anket sorularının makine öğrenme yöntemleri ile incelenerek, anket içeriği ve nihai sonucu bozmayacak şekilde soru sayısının azaltılabileceğini gösteren bir öncü çalışma niteliindedir. İlgili yöntemin, farklı alanlara ait farklı ölçekler için daha fazla katılımcı ile uygulanıp değerlendirileceği bir gelecek çalışma da planlanmıştır. Ayrıca gelecekte aynı amaçla hazırlanmış farklı ölçeklerin soruları makine öğrenmesi yöntemleri ile seçilip birleştirilerek daha az soru barındıran hibrit bir ölçek oluşturulabilir. Benzer teknikler veri kaybı yaşanan ölçeklerde cevabı eksik soruların olası cevaplarının tahmin edilmesi için geliştirilebilir.

Kaynaklar

- [1] “YÖK Alınan Kararlar”, 2020. <https://covid19.yok.gov.tr/alınan-kararlar> (erişim 12 Mart 2022).
- [2] Z. Özen, E. Kartal, ve İ. E. Emre, “BIG DATA IN EDUCATION: A CASE STUDY ON PREDICTING E-LEARNING READINESS OF LEARNERS WITH DATA MINING TECHNIQUES”, s. 19, Ara. 2020, doi: 10.26650/B/ET06.2020.011.08.
- [3] M. Adnan ve B. B. Yaman, “Mühendislik Öğrencilerinin E-Öğrenmeye Dair Beklenti, Hazır Bulunuşluk ve Memnuniyet Düzeyleri”, 2017, Erişim: 12 Mart 2022. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://acikerisim.mu.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12809/7709>
- [4] F. Bahadır, “Investigation of e-learning readiness of rail system program students: the sample of refahiye vocational high school”, J. High. Educ. Sci., c. 10, sy 2, s. 310, 2020, doi: 10.5961/jhes.2020.392.
- [5] Ö. Korkmaz, R. Çakır, ve S. Tan, “ÖĞRENCİLERİN E-ÖĞRENMEYE HAZIR BULUNUŞLUK VE MEMNUNİYET DÜZEYLERİNİN AKADEMİK BAŞARIYA ETKİSİ”, Ahi Evran Üniversitesi Kırşehir Eğitim Fakültesi Derg., c. 16, sy 3, Art. sy 3, Ağu. 2015.
- [6] İ. Pinar, A. G. Selçuk, ve B. Dağ, “Meslek Yüksekokullarının E-Öğrenme Modeline Geçişinde Dikkate Alınması Gereken İki Kavram: Öğrencilerin Bilgisayar Özyeterlilikleri Ve E-Öğrenmeye Yönelik Hazırbulunuşlukları”, Elektron. Mesleki Gelişim Ve Araştırmalar Derg., c. 2, sy 3, Art. sy 3, Kas. 2014.
- [7] R. Yılmaz, B. Sezer, ve H. Yurdugül, “Üniversite Öğrencilerinin E-Öğrenmeye Hazır Bulunuşluklarının İncelenmesi: Bartın Üniversitesi Örneği”, Ege Eğitim Derg., ss. 180-195, Tem. 2019, doi: 10.12984/egedf.424614.
- [8] H. Yurdugül, “Öğretmen Yetiştiren Lisans Programlarındaki Öğretmen Adaylarının E-öğrenmeye Hazır Bulunuşluklarının İncelenmesi: Hacettepe Üniversitesi Örneği”, Hacet. Univ. J. Educ., ss. 1-1, Kas. 2016, doi: 10.16986/HUJE.2016022763.
- [9] H. İ. Akyüz ve G. Numanoglu, “Readiness and Expectations of University Students for e-learning Environments (Kastamonu University Example)”, Online J. Math. Sci. Technol. Educ., c. 1, sy 1, Art. sy 1, Ara. 2020.
- [10] M. Baygeldi, G. Öztürk, ve F. T. Dikkartın Övez, “Pandemi Sürecinde Eğitim Fakültesi Öğrencilerinin Çevrimiçi Öğrenme Hazır Bulunuşluk ve E-öğrenme Ortamlarına Yönelik Motivasyon Düzeyleri: Online Learning Readiness and E-learning Environments Motivation Levels of the Education Faculty Students in the Pandemic Outbreak.”, Electron. Turk. Stud., c. 16, sy 1, ss. 285-311, Şub. 2021, doi: 10.7827/TurkishStudies.44485.
- [11] O. Bilici ve H. Bağcı, “Öğretmen Adaylarının Yaşam Boyu Öğrenme Eğilimleri İle E-Öğrenmeye Hazır Bulunuşlukları Arasındaki İlişkinin İncelenmesi”, Sak. Üniversitesi Eğitim Fakültesi Derg., c. 20, sy 2, Art. sy 2, Ara. 2020.
- [12] Ö. U. Canpolat ve Ö. Z. N. Canpolat, “Uzaktan eğitim bağlamında e-hazır olma kavramının irdelenmesi”, s. 13, 2020.
- [13] A. A. Cobanoğlu ve I. Cobanoğlu, “DO TURKISH STUDENT TEACHERS FEEL READY FOR ONLINE LEARNING IN POST-COVID TIMES? A STUDY OF ONLINE LEARNING READINESS”, Turk. Online J. Distance Educ., c. 22, sy 3, ss. 270-280, Tem. 2021, doi: 10.17718/tojde.961847.
- [14] S. Demir ve E. Eren, “The Investigation of University Students Online Learning Readiness Levels”, Anadolu Üniversitesi Eğitim Fakültesi Derg., ss. 144-163, Nis. 2021, doi: 10.34056/aujef.852145.
- [15] S. Konak, “Lisans Öğrencilerinin Çevrimiçi Öğrenmeye Hazır Bulunuşluk Düzeyi ve Demografik Özellikleri Arasındaki İlişki: ESOGÜ Turizm Fakültesi Örneği”, J. Hosp. Tour. Issues, c. 3, sy 1, Art. sy 1, Haz. 2021, doi: 10.51525/johti.932684.
- [16] E. K. Pullu ve M. N. Gömleksiz, “MESLEK YÜKSEKOKULU ÖĞRENCİLERİNİN COVID 19 PANDEMİ SÜRECİNDE ÇEVİRİMİÇİ ÖĞRENMEYE İLİŞKİN HAZIR BULUNUŞLUK VE TUTUM DÜZEYLERİ ARASINDAKİ İLİŞKİNİN ÇEŞİTLİ DEĞİŞKENLER AÇISINDAN İNCELENMESİ”, Milli Eğitim Derg., c. 49, sy 1, Art. sy 1, Ara. 2020, doi: 10.37669/milliegitim.788019.
- [17] E. Sarıtaş ve S. Barutçu, “Öğretimde Dijital Dönüşüm ve Öğrencilerin Çevrimiçi Öğrenmeye Hazır Bulunuşluğu: Pandemi Döneminde Pamukkale Üniversitesi Öğrencileri Üzerinde Bir Araştırma”, J. Internet Appl. Manag., Haz. 2020, doi: 10.34231/iuyd.706397.
- [18] Y. Tanrikulu, G. Tanrikulu, ve Ö. Tikit, “Determination of readiness and expectation regarding the e-learning process in first year students of vocational school of health services”, Ara. 2021, doi: 10.5281/zenodo.5819049.
- [19] A. Uyar ve A. Karakuyu, “MESLEK YÜKSEKOKULU ÖĞRENCİLERİNİN E-ÖĞRENMEYE YÖNELİK HAZIRBULUNUŞLUKLARI”, Int. J. Soc. Humanit. Sci. Res. JSHSR, c. 7, sy 60, ss. 2905-2914, Oca. 2020, doi: 10.26450/jshsr.2119.
- [20] A. B. Üstün, F. G. Karaoğlan-Yılmaz, ve R. Yılmaz, “Öğretmenler E-Öğrenmeye Hazır mı? Öğretmenlerin E-Öğrenmeye Yönelik Hazır Bulunuşluklarının İncelenmesi Üzerine Bir Araştırma”, s. 16, 2020.
- [21] S. K. Sharma, S. Gülşen, Z. Özen, ve E. Kartal, “Assessing E-learning Readiness of Instructors in Turkey”, s. 16.
- [22] S. Karaburçak, “AKADEMİK BAŞARI, FİZİKSEL AKTİVİTE, EGZERSİZ VE SPOR İLİŞKİSİ: 2015’TEN GÜNÜMÜZE BİBLİYOGRAFİ TABANLI SİSTEMATİK DERLEME”, J. Int. Soc. Res., c. 14, sy (76-5), ss. 594-601, Oca. 2021, doi: 10.17719/jisr.11463.
- [23] C. Tiftik, “Akademisyenler ve Psikolojik Yıldırma: Sistemik Bir Derleme Araştırması”, IBAD Sos. Bilim. Derg., sy 11, Art. sy 11, Ara. 2021.
- [24] R. Arıkan, “ANKET YÖNTEMİ ÜZERİNDE BİR DEĞERLENDİRME”, Haliç Üniversitesi Sos. Bilim. Derg., c. 1, sy 1, Art. sy 1, Eyl. 2018.
- [25] H. R. Aslan ve Ö. Ç. Tolan, “Çocuk ve Ergenlerdeki Davranış Problemlerinde Çözüm Odaklı Terapi Uygulamalarının İncelenmesi: Sistemik Bir Gözden Geçirme”, İnönü Üniversitesi Eğitim Fakültesi Derg., c. 22, sy 3, Art. sy 3, Ara. 2021, doi: 10.17679/inuefd.919480.

- [26] S. Şahinli ve M. Tarım, “SAĞLIK SEKTÖRÜNDE HİZMET KALİTESİ ÖLÇÜMÜ: SİSTEMATİK BİR DERLEME ÇALIŞMASI”, *J. Healthc. Manag. Leadersh.*, sy 1, Art. sy 1, May. 2020, doi: 10.35345/johmal.538930.
- [27] B. Sabancı, “UZAKTAN EĞİTİM SİSTEMİNİN ÖĞRENCİ MOTİVASYONU ÜZERİNE ETKİSİ: TÜRKİYE’DE YAPILAN ANKET ÇALIŞMALARININ DERLENMESİ”, *Türkiye Mesleki Ve Sos. Bilim. Derg.*, sy 6, Art. sy 6, Eyl. 2021, doi: 10.46236/jvosst.984472.
- [28] T. Tuncer, E. Aydemir, F. Özyurt, S. Dogan, S. B. Belhaouari, & E. Akbal, E., “AN AUTOMATED COVID-19 RESPIRATORY SOUND CLASSIFICATION METHOD BASED ON NOVEL LOCAL SYMMETRIC EUCLIDEAN DISTANCE PATTERN AND RELIEFF ITERATIVE MRMR FEATURE SELECTOR”, *International Advanced Researches and Engineering Journal*, c. 5, s. 3, sy. 334-343, 2021. DOI: 10.35860/iarej.898830
- [29] T. Tuncer, S. Dogan, F. Ozyurt, "AN AUTOMATED RESIDUAL EXEMPLAR LOCAL BINARY PATTERN AND ITERATIVE RELIEFF BASED COVID-19 DETECTION METHOD USING CHEST X-RAY IMAGE", *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, c. 203, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2020.104054>.
- [30] U. Ercan ve S. Irmak, “KARAR AĞAÇLARI KULLANILARAK TÜRKİYE HANEHALKI ZEYTİNYAĞI TÜKETİMİ GÖRÜNÜMÜNÜN BELİRLENMESİ”, *Int. J. Manag. Econ. Bus.*, c. 13, sy 3, ss. 0-0, Eyl. 2017, doi: 10.17130/ijmeb.2017331329.
- [31] N. Dokumacı Sütçü, “C5.0 Karar Ağacı Algoritması ile Öğretmenlerin FeTeMM Farkındalıklarının İncelenmesi”, *Yaşadıkça Eğitim*, c. 35, sy 2, ss. 459-476, Eyl. 2021, doi: 10.33308/26674874.2021352298.
- [32] A. Kaçmaz, K. Yıldız, ve A. Buldu, “C4.5 Sınıflandırma Algoritması ile Teknoloji Bağımlılığı Üzerine Bir Uygulama”, s. 10, 2020.
- [33] G. Aksu ve C. O. Güzeller, “PISA 2012 Matematik Okuryazarlığı Puanlarının Karar Ağacı Yöntemiyle Sınıflandırılması: Türkiye Örneği”, *EĞİTİM VE BİLİM*, c. 41, sy 185, Haz. 2016, doi: 10.15390/EB.2016.4766.
- [34] B. Baran ve F. Ata, “An Investigation of University Students’ Information Literacy Self-Efficacy Perceptions by Using Decision Tree Method”, s. 24, 2014.
- [35] M. Kayri ve S. Günüş, “Türkiye’deki ortaöğretim öğrencilerinin internet bağımlılık düzeyini etkileyen bazı faktörlerin karar ağaçları yöntemleri ile incelenmesi”, *Kuram Ve Uygulamada Eğitim Bilim.*, c. 10, sy 4, Art. sy 4, 2010.
- [36] Ö. Demir, “ÖĞRENCİLERİN VE ÖĞRETİM ELEMANLARININ E- ÖĞRENMEYE HAZIR BULUNUŞLUK DÜZEYLERİNİN İNCELENMESİ: HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ EĞİTİM FAKÜLTESİ ÖRNEĞİ”, *Yüksek Lisans, Hacettepe Üniversitesi*, 2015.
- [37] I. Guyon, J. Weston, S. Barnhill, ve V. Vapnik, “Gene Selection for Cancer Classification using Support Vector Machines”, *Mach. Learn.*, c. 46, sy 1, ss. 389-422, Oca. 2002, doi: 10.1023/A:1012487302797.
- [38] F. Pedregosa vd., “Scikit-learn: Machine Learning in Python”, *J. Mach. Learn. Res.* 12, ss. 2825-2830, 2011.
- [39] Vladimir N. Vapnik, *Statistical learning theory*. New York: Wiley, 1998.
- [40] L. Breiman, “Random Forests”, *Mach. Learn.*, c. 45, sy 1, ss. 5-32, Eki. 2001, doi: 10.1023/A:1010933404324.
- [41] M. Fratello ve R. Tagliaferri, “Decision Trees and Random Forests”, içinde *Encyclopedia of Bioinformatics and Computational Biology*, S. Ranganathan, M. Gribskov, K. Nakai, ve C. Schönbach, Ed. Oxford: Academic Press, 2019, ss. 374-383. doi: 10.1016/B978-0-12-809633-8.20337-3.
- [42] L. Breiman, J. H. Friedman, R. A. Olshen, ve C. J. Stone, *Classification And Regression Trees*. New York: Routledge, 1984. doi: 10.1201/9781315139470.
- [43] J. H. Friedman, “Greedy function approximation: A gradient boosting machine.”, *Ann. Stat.*, c. 29, sy 5, ss. 1189-1232, Eki. 2001, doi: 10.1214/aos/1013203451.
- [44] T. Chen ve C. Guestrin, “XGBoost: A Scalable Tree Boosting System”, içinde *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, San Francisco California USA, Ağu. 2016, ss. 785-794. doi: 10.1145/2939672.2939785.
- [45] Jason Brownlee, *XGBoost with Python: Gradient Boosted Trees with XGBoost and scikit-learn*, V1.10., c. 1.10. Machine Learning Mastery, 2018.
- [46] L. Prokhorenkova, G. Gusev, A. Vorobev, A. V. Dorogush, ve A. Gulin, “CatBoost: unbiased boosting with categorical features”, s. 11, 2018.
- [47] D. Micci-Barreca, “A preprocessing scheme for high-cardinality categorical attributes in classification and prediction problems”, *ACM SIGKDD Explor. Newsl.*, c. 3, sy 1, ss. 27-32, Tem. 2001, doi: 10.1145/507533.507538.

Tarımsal Atığın Boyar Madde Giderimindeki Etkisinin İncelenmesi

Muhammed ONAY^{1*}, Çiğdem SARICI ÖZDEMİR²

¹ Mühendislik Temel Bilimleri Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Malatya, Türkiye

² Kimya Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye

*1 muhammed.onay@ozal.edu.tr, ² cigdem.ozdemir@inonu.edu.tr

(Geliş/Received: 03/08/2022;

Kabul/Accepted: 29/11/2022)

Öz: Bu çalışmada, tarımsal atık olarak ülkemizde çok miktarda bulunan fasulye kabuğunun metilen mavisi adsorpsiyonunda etkisi incelenmiştir. Adsorbanın yüzey özelliklerinin belirlenmesi amacı ile XRD, SEM ve FTIR analizleri gerçekleştirilmiştir. Adsorpsiyon çalışmaları kapsamında metilen mavisi konsantrasyonunun, adsorban miktarının, sıcaklığın ve temas süresinin etkisi çalışılmıştır. Adsorpsiyon izotermi tanımlayabilmek için Langmuir, Freundlich ve Temkin izoterm modelleri incelenmiştir. Yalancı birinci derece, yalancı ikinci derece ve Avrami modelleri ile metilen mavisinin fasulye kabuğu üzerindeki adsorpsiyonu kinetik açıdan değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen verilerin kullanılması ile hazırlanan izoterm grafikleri sonrasında Freundlich izoterm modeli ile daha uyumlu olduğu belirlenmiştir. Metilen mavisinin fasulye kabuğu ile adsorpsiyonunda kinetik çalışmalar sonrasında ise yalancı- ikinci mertebe kinetik modele uyum sağladığı görülmektedir. Buna göre adsorpsiyonun çok tabakalı ve heterojen bir biçimde gerçekleştiği söylenebilir. Bu sonuç fasulye kabuğunun SEM görüntüsündeki tabakalı yapı ile uyum içerisindedir. Çalışmalar sonucunda fasulye kabuğunun tekstil atık sularında bulunabilen metilen mavisi boyar maddesinin uzaklaştırılmasında adsorban olarak kullanılabilceği ortaya konulmuştur.

Anahtar kelimeler: Metilen mavisi, tarımsal atık, adsorpsiyon, denge, kinetik.

Investigation of the Effect of Agricultural Waste on Dye Removal

Abstract: In this study, the effect of bean husk, which is abundant in our country as agricultural waste, on methylene blue adsorption was investigated. XRD, SEM and FTIR analyzes were carried out to determine the surface properties of the adsorbent. Within the scope of adsorption studies, the effects of methylene blue concentration, amount of adsorbent, temperature and contact time were studied. Langmuir, Freundlich and Temkin isotherm models were investigated to define the adsorption isotherm. The pseudo-first-order, pseudo-second-order and Avrami models and the adsorption of methylene blue on the bean husk were evaluated in terms of kinetics. It has been determined that the isotherm graphs prepared by using the data obtained as a result of the experimental studies are more compatible with the Freundlich isotherm models. After kinetic studies in the adsorption of methylene blue with bean husk, it is seen that it conforms to the pseudo-second-order kinetic model. Accordingly, it can be said that the adsorption takes place in a multilayered and heterogeneous manner. This result is in agreement with the layered structure in the SEM image of the bean shell. As a result of the studies, it has been revealed that bean husk can be used as an adsorbent in the removal of methylene blue dyestuff that can be found in textile wastewater.

Key words: Methylene blue, agricultural waste, adsorption, equilibrium, kinetics.

1. Giriş

Son zamanlarda karbon ayak izi, iklim değişikliği ve su kıtlığı gibi önemli terimler giderek daha fazla gündeme gelmektedir. Bu olumsuz durumlara neden olan temel sebeplerden biri de çevre kirliliğidir. Sanayi üretimi çevre kirliliğine neden olan faktörlerden biridir. Ayrıca günümüzde su kaynaklarının önemli ölçüde azaldığı bilinmektedir. Tekstil üretiminin yoğun olduğu ülkemizde ve bölgemizde su ihtiyacı oldukça fazladır. Tüm bu durumlar göz önüne alındığında kullanılan suyun arıtılarak yeniden kullanılması hem doğaya hem de ekonomiye büyük fayda sağlayacaktır.

Boya gibi kirleticileri atık sulardan giderebilmek için endüstriyel atık su arıtma, hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkeler için bir zorunluluk olmaya devam etmektedir. Boyalar gıda, tekstil kâğıdı, kozmetik vb. farklı endüstrilerde renklendirici olarak kullanılmaktadır. Bu boyaların düşük konsantrasyonlarda bile çevreye atılması büyük problemler yaratmaktadır. Tekstil atık sularından boya giderim yöntemleri; kimyasal oksidasyon,

* Sorumlu yazar: muhammed.onay@ozal.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-4276-0425, ² 0000-0003-2129-3044

köpük yüzdürme, adsorpsiyon, pıhtılaşma, elektrodializ şeklinde sıralanabilir. Bu yöntemler arasında, adsorpsiyon yönteminin listelenen diğer işlemlerden daha iyi bir potansiyele sahip olduğu bilinmektedir. Bu yöntemler arasında adsorpsiyonun düşük maliyeti, tasarımının basitliği, kolay temin edilebilirliği ve boyaları daha konsantre bir biçimde işleyebilmesi nedeniyle diğer tekniklere göre daha üstün olduğu düşünülmektedir [1-5].

Aktif karbon adsorpsiyonunun, boyaların sulu çözeltilerden uzaklaştırılmasında çok etkili olduğu geçmiş çalışmalarla kanıtlanmıştır. Ancak, aktif karbon üretim süreçleri nedeniyle hala pahalı olarak kabul edildiği için çalışmaların odak noktası düşük maliyetli adsorbanların geliştirilmesidir. Düşük maliyetli adsorbanlar arasında doğal, tarımsal ve endüstriyel yan ürün atıkları bulunmaktadır. Tarımsal atıkların adsorban olarak kullanılması düşük maliyetleri veya doğada bol olmaları ve sulu çözeltilerden boyaları uzaklaştırmadaki iyi performansları nedeniyle son derece ilgi çekicidir [6,7].

Türkiye’de her yıl milyarlarca ton tarım ürünü yetiştirilmektedir. Bu ürünlerin çekirdek ve kabukları etrafa atıldığı için birtakım çevresel sorunlar doğurmaktadır. Bu atıkları değerlendirmenin bir yolu da adsorpsiyon işlemidir. Adsorpsiyon prosesinde biyolojik kökenli bir adsorban kullanıldığı durumlarda bazen yüzey özelliklerini geliştirmek için modifikasyon (ön işlem) uygulandığı bilinmektedir [8]. Biyosorbentin yapısına göre ön işlem uygulamadan ham haliyle adsorban olarak kullanıldığı durumlarda geçmiş çalışmalardan bilinmektedir. Fasulyede ülkemizde bolca üretilen tarım ürünlerinden birisidir. Kuru fasulye üretiminde bu kabuklar tarımsal atık olarak çevreye bırakılmaktadır. Ülkemizde de son dönemlerde sıklıkla ifade edilen ve birçok projede yer alan ‘sıfır atık’ kapsamında bu kabukların faydalı birer hammaddeye dönüştürülmesi açısından adsorban olarak kullanılması önemli bir değer sağlayacaktır. Daha önceki çalışmalara bakıldığında fasulye kabuğu ön işlem yapılmadan adsorban olarak kullanılmadığı görülmektedir [9].

Bu çalışmada Samsun Bafra yöresine ait fasulye kabukları adsorban olarak kullanılarak, sulu çözeltilerden metilen mavisi giderimi adsorpsiyon yöntemi ile incelenmiştir. Adsorpsiyon üzerine başlangıç metilen mavisi konsantrasyonu, sıcaklık, adsorban miktarı ve denge süresinin etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen veriler Langmuir, Freundlich ve Temkin izoterm modellerine uygulanmıştır. Adsorpsiyon prosesini kinetik açıdan incelemek için ise yalancı birinci merteye, yalancı ikinci merteye ve Avrami kinetik modelleri deneysel sonuçlara uygulanmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyaller

Samsun Bafra ovasından temin edilen fasulyeler temizlenip kabukları ayrılmıştır. Elde edilen kabuklar kurutulup öğütüldükten sonra 0.25 mm tanecek boyutunun altına elenmiştir. Elenen örnekler 105 °C’de etüvde kurutulup saklanmıştır. Adsorbanın karakterizasyonu için; X-Işını Kırınım yöntemi (XRD), Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrofotometre (FTIR) Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizleri yapılmıştır.

Boya olarak molekül formülü $C_{16}H_{18}N_3SCl$ ve molekül ağırlığı $319.85 \text{ g.mol}^{-1}$ olan %99 saflıkta metilen mavisi kullanılmıştır. Deneylerde kullanılmak üzere 1000 ppm konsantrasyonda bir stok çözelti hazırlanmıştır. Daha sonra bu stok çözeltilerden seyreltilerek istenilen konsantrasyonlar elde edilmiş ve deneyler gerçekleştirilmiştir. Adsorpsiyon deneyleri gerçekleştirilirken sulu çözeltilerde kalan metilen mavisi miktarı ve başlangıçta çözeltideki boyar madde konsantrasyonu beş mililitre hacmindeki tek kullanımlık plastik küvetlerle 662 nm dalga boyunda Shimadzu UV/Vis Spektrofotometre cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Oda sıcaklığından farklı derecelerdeki sıcaklıklarda adsorpsiyon çalışmalarını gerçekleştirebilmek için NUVE markalı çalkalamalı su banyosu kullanılmıştır. XRD analizi için Rigaku Geigerflex markasının D/MaxB modeli cihazı, FT-IR analizi için Mattson markasının 1000 FT-IR Spektrofotometre modeli cihazı, SEM analizi için ise LECO markasının CHNS-932 modeli cihazı kullanılmıştır.

2.2. Adsorpsiyon Deneyleri

Metilen mavisi sulu çözeltileri istenilen konsantrasyonlarda distile saf su ile hazırlanmıştır. Adsorpsiyon deneyleri (0.5-2.5 g) ağırlıklarında tarımsal atık kullanılarak 400 rpm’de çalışan bir termostatik banyoda 25, 40 ve 60°C’de belirlenen konsantrasyonda ($25-150 \text{ mg.L}^{-1}$) 50 mL çözeltiler hazırlanarak çalkalama (batch) yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Fasulye kabuğu üzerine adsorbe edilen boya miktarı, q_e (mg.g^{-1}), kütle dengesi ilişkisi ile temsil edilen Denklem 1 [10] ile aşağıda gösterilmektedir.

$$q_e = (C_0 - C_t) \times \frac{V}{m} \quad (1)$$

burada C_0 ve C_t , sırasıyla boyanın (mg.L^{-1}) ilk ve son (t zamanında) sıvı faz konsantrasyonlarıdır. V , çözeltinin (L) hacmidir ve m kullanılan fasulye kabuğunun ağırlığıdır (g).

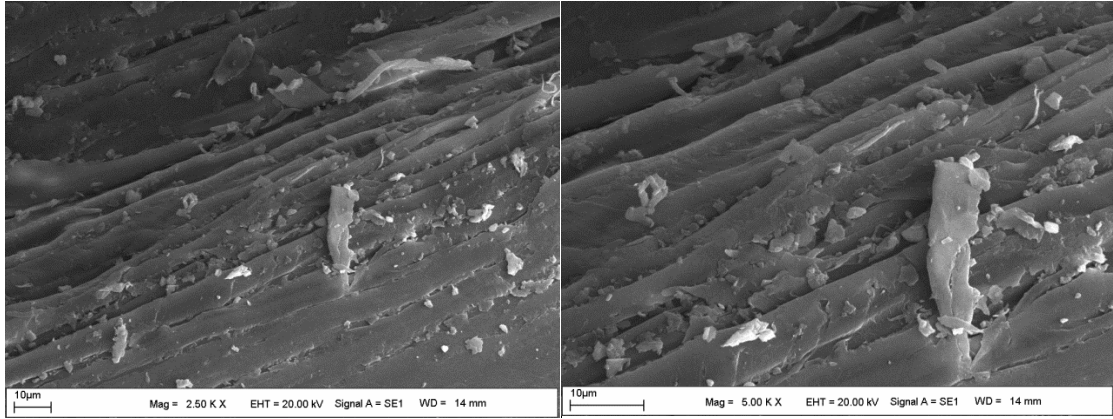
Kinetik çalışmalar için de aynı prosedür izlendi, ancak numuneler mevcut zaman aralıklarında alınmıştır. Adsorpsiyon kinetiğini belirlemek için 1 g adsorban 50 ml 100 mg.L^{-1} boya çözeltisi ile 5 ila 120 dakika arasında 400 rpm'de ve 25, 40, 60°C sıcaklıklarda kesikli sistemde (batch) karıştırılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1.Fasulye Kabuğunun Karakterizasyonu

Adsorbanların yüzey özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan çeşitli enstrümental analiz yöntemleri bulunmaktadır. Fasulye kabuğunun yüzey özelliklerini ve bağ yapılarını belirleyebilmek için XRD, SEM ve FTIR analizleri yapılmıştır. Bu analizler sonucunda genel olarak fasulye kabuğunun adsorban olarak ön işleme gerek duymadan kullanılabilir olduğu söylenebilir.

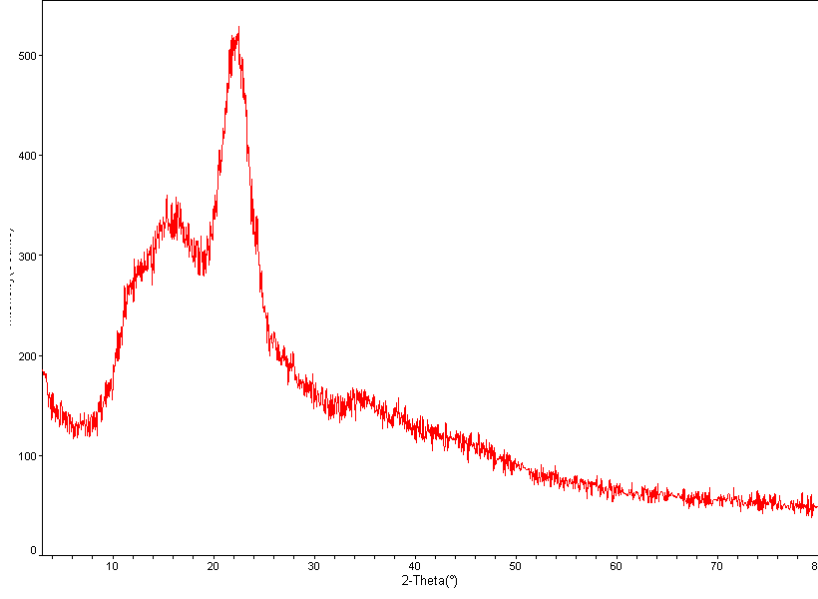
Taramalı elektron mikroskopu (SEM), adsorban karakterizasyonunda önemlidir. Burada gözeneklilik yapısı, ikincil yapılar ve tabakalı yüzeyler belirlenir. Adsorbanın SEM grafiği Şekil 1 ile verilmiştir. Şekil incelendiğinde fasulye kabuğunun katmanlı, geniş ve lifli bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Gözenekliliğin fazla olmadığı ve yer yer mezogözeneklere sahip olduğu söylenebilir.



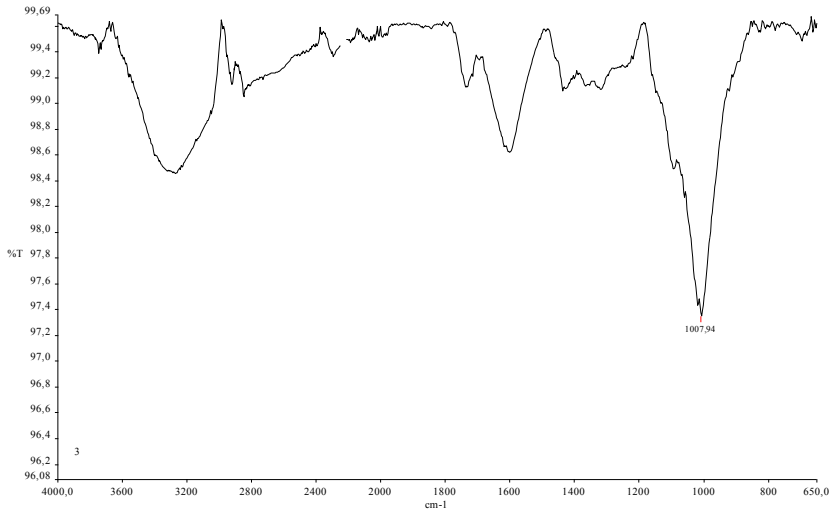
Şekil 1. Fasulye kabuğu yüzeyinin SEM görüntüleri

Fasulye kabuğu için XRD difraktogramları Şekil 2 ile verilmektedir. Şekil incelendiğinde fasulye kabuğu 10-26 2θ arasındaki verdiği pikler dolayısıyla amorf yapıda olduğu düşünülebilir. Adsorbanların amorf yapıda olmaları adsorpsiyon çalışmaları için pozitif bir durumdur. Bu yüzden fasulye kabuğunun boya gideriminde kullanılabilir nitelikte olduğu söylenebilir. Yapı bünyesinde kristal yapıya işaret eden piklere rastlanmamıştır. Kristal yapının oluşması gözenekliliği azalttığı için adsorpsiyon açısından istenmeyen bir durumdur.

Şekil 3 ile fasulye kabuğuna ait FTIR spektrumu gösterilmektedir. Spektruma bakıldığında zaman yaklaşık $950-1100 \text{ cm}^{-1}$ aralığındaki bantlar göze çarpmaktadır. Bu değer aralığındaki piklerin varlığı yapı içerisindeki C-O-C ve C-O gruplarının göstergesi olarak düşünülebilir. $3000-3500 \text{ cm}^{-1}$ aralığındaki bantlar ise aromatik C-H grubunun yapı içerisindeki varlığını göstermektedir. $1500-1700 \text{ cm}^{-1}$ de görünen pikler yapı içerisindeki karboksilik grupların mevcudiyetini göstermektedir. Fasulye yaprakları, hücre duvarlarında selüloz, hemiselüloz, lignin, rosin ve tanen gibi maddeleri içeren hücrelerden oluşmaktadır. Bu yapılar, fenol, aldehit, keton, alkol, karboksil ve eter gibi farklı fonksiyonel gruplara sahiptir. FT-IR analizi ile ihtiva eden gruplar belirlenmiştir. Bu gruplar, organik yapıdaki adsorban yüzeyinde aktif bölgeler oluşturmaktadırlar [11]. Aktif bölgelerin sayısı arttıkça adsorpsiyon verimi artmaktadır [12].



Şekil 2. Fasulye kabuğunun XRD difraktogramı



Şekil 3. Fasulye kabuğunun FTIR grafiği

3.2.Adsorpsiyon Verimini Etkileyen Faktörler

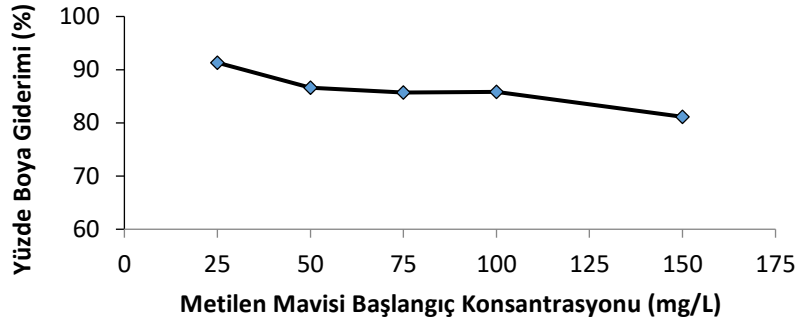
3.2.1.Başlangıç metilen mavisi konsantrasyonunun etkisi

Başlangıç konsantrasyonunun adsorplama verimine etkisi Şekil 4 ile verilmektedir. Şekil incelendiğinde başlangıç konsantrasyonu arttıkça boya giderim yüzdesi azalmaktadır. Belirli miktarda boya molekülleri gözenekleri dolduracağından belirli bir seviyenin üzerine konsantrasyon arttığında boya molekülleri dolmuş gözeneklere nüfuz edemeyeceği için moleküller adsorplanmadan çözeltide kalacaktır [13]. Böylelikle adsorplama yüzdesi azalmıştır.

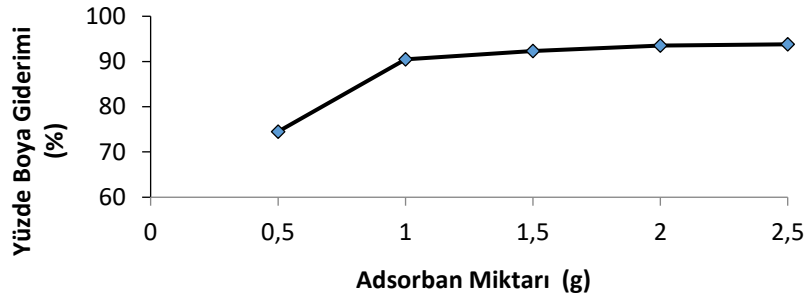
3.2.2. Adsorban miktarının etkisi

Adsorbanın morfolojik özelliklerine, yüzey alanına, gözeneklerin sayısı ve boyutuna bağlı olarak kullanılan miktarlar değişiklik gösterebilir. İdeal çalışma şartlarının belirlenmesi açısından adsorban miktarı ve başlangıç boya konsantrasyonu belirlenmesi, adsorpsiyon uygulamalarında öncelikli olarak belirlenmektedir.

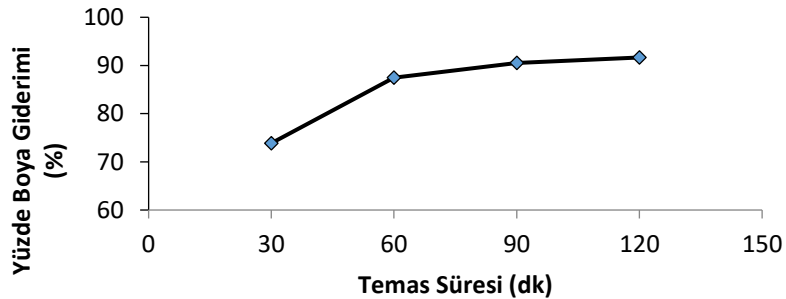
Adsorban miktarının boya giderim hızına etkisini incelemek için deneyler, 100 ppm başlangıç konsantrasyonunda ve 298 K sıcaklıkta 400 rpm karıştırma hızında 1 saat süreyle gerçekleştirilmiştir. Şekil 5 incelendiğinde fasülye kabuğu miktarı arttıkça boya giderim veriminin arttığı görülmektedir. Bu teknik olarak beklenen bir durumdur. Ancak 1, 1.5, 2 ve 2.5 gramlık numunelerde boya giderim oranları birbirine yakındır. Bu, doygunluk değerine ulaşıldığının bir göstergesidir [14]. Bu sonuçlar doğrultusunda ideal adsorban miktarı 1 gram olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. Başlangıç konsantrasyonunun adsorpsiyona etkisi ($m=1g$, $t=1sa$ $T=298 K$, karıştırma hızı=400 rpm).



Şekil 5. Adsorban miktarının adsorpsiyona etkisi ($C_0= 100 mg.L^{-1}$ $t= 1sa$ $T=298 K$, karıştırma hızı=400 rpm).



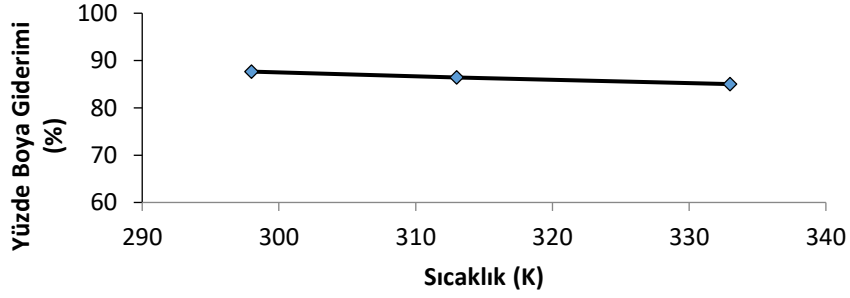
Şekil 6. Temas süresinin adsorpsiyona etkisi ($m=1g$, $C_0= 100 mg.L^{-1}$, $T=298 K$, karıştırma hızı= 400 rpm).

3.2.3. Temas süresinin etkisi

Adsorpsiyon prosesinde verimi etkileyen parametrelerden birisi temas (denge) süresidir. Dengeye ulaşma süresi ne kadar kısa olursa mevcut adsorpsiyon prosesi de o derece ekonomik olacaktır [15]. Şekil 6 incelendiğinde 30 dakikaya kadar düşük verimde gerçekleşen adsorpsiyon işlemi 60 dakika ve sonrasında yaklaşık %70 seviyelerinden %90 seviyelerine kadar yükselmiştir. 180 dk. sonrasında elde edilen değişim 60 ile 30 dk. Arasındaki adsorpsiyon miktarı ile kıyaslandığında çok fazla değişim göstermediğinden 60 dk.'lık karıştırma zamanı yeterli bulunmuştur.

3.2.4. Sıcaklığın etkisi

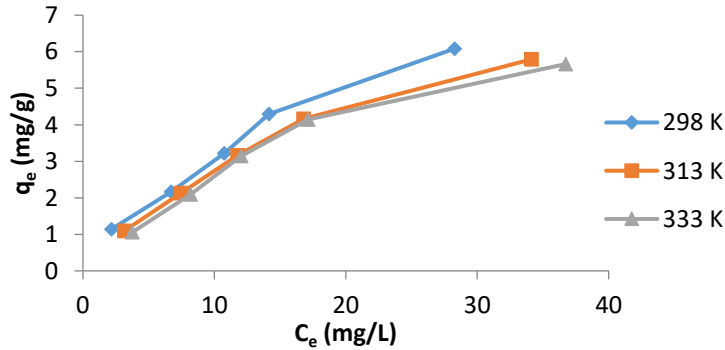
Bilindiği gibi sıcaklık arttıkça genellikle moleküller daha hızlı hareket etmektedir. Sıcaklıkla beraber hızları artan boya molekülleri adsorban yüzeyine daha hızlı ulaşırlar dolayısıyla adsorpsiyon veriminin arttığı akıllara gelebilir. Ancak bu durum her zaman böyle gerçekleşmez. Tarımsal atıkların yüzeyinde genellikle mezo ve makro boyutlarda gözenekler bulunmaktadır. Adsorpsiyon işlemi süresince boya molekülleri bu gözeneklere defalarca girip çıkmaktadır. Sıcaklık bu adsorpsiyon prosesinde moleküllerin gözeneklere girip çıkma hızını arttırmıştır. Ancak denge halinde boya moleküllerinin sayısını arttıramamıştır. Bu yüzden sıcaklık boya giderim verimini önemli ölçüde etkilememiştir diyebiliriz [16].



Şekil 7. Sıcaklığın adsorpsiyona etkisi ($m=1g$, $C_0=100 mg.L^{-1}$, $t=1sa$ karıştırma hızı=400 rpm).

3.3. Adsorpsiyon Dengesi

Adsorpsiyon izotermi genellikle denge parametrelerini ve adsorpsiyon özelliklerini incelemek ve adsorban ile adsorbat arasında meydana gelen etkileşimlerin doğası hakkında bir fikir edinmek için kullanılır. Ayrıca optimum adsorban miktarı hakkında bilgi verirler. Adsorpsiyon denge grafiği Şekil 8 ile gösterilmiştir. Literatürde yaygın olarak kullanılan üç adsorpsiyon izotermi (Langmuir, Freundlich ve Temkin) bu çalışmada deneysel verilere uygulanarak kullanılmıştır.



Şekil 8. Adsorpsiyon denge grafiği

Langmuir izotermini, adsorban yüzeyindeki aktif bölgelerin varlığı ve mevcut tüm bölgeler doldurulduğunda ve maksimum adsorpsiyon elde edildiğinde bu bölgelerin doygunluğu hakkında bilgi sahibi olmamızı sağlar. Langmuir modelinin [17] lineer denklemi, aşağıdaki denklem ile temsil edilmektedir;

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{Q_0 b} + \frac{C_e}{Q_0} \quad (2)$$

Denklemden C_e denge konsantrasyonu (mg.L^{-1}), q_e dengede adsorbe edilen miktardır (mg.g^{-1}), Q_0 , adsorpsiyon kapasitesiyle ilgili Langmuir sabitidir (mg.g^{-1}) ve b , Adsorpsiyon enerjisiyle ilgili Langmuir sabitidir (L.mg^{-1}).

Langmuir izoterminden elde edilebilecek diğer önemli parametre ise ayırma faktörü R_L dir. Bu faktör, adsorpsiyonun özellikleri hakkında bir fikir vermektedir [17]. R_L değerleri aşağıdaki denklemden hesaplanabilir. (3):

$$R_L = \frac{1}{1+bC_0} \quad (3)$$

denklemden C_0 başlangıçtaki metilen mavisi konsantrasyonudur (mg L^{-1}).

Freundlich izoterm modelini, adsorbanın aktif merkezlerinin tamamen dolmasının ardından adsorpsiyon enerjisinde üstel bir azalma olduğunu varsaymaktadır. Freundlich modelinin [18] lineer formu aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir. (4):

$$\ln q_e = \ln K_f + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (4)$$

denklemden K_f , bağ enerjisiyle ilgili bir sabittir. $1/n$ değeri, yüksek enerjili aktif merkezlerin nispi dağılımını gösterir ve adsorpsiyon işleminin doğasına ve gücüne bağlıdır [18].

Temkin adsorpsiyon modelinde, adsorbat ve adsorban arasındaki etkileşimlerin azalması nedeniyle katmandaki tüm moleküllerin adsorpsiyon ısısının adsorban yüzeyinin kaplanmasıyla doğrusal olarak azaldığı varsayılır. Temkin izotermine [19] lineer hali aşağıdaki denklem ile tanımlanabilir;

$$q_e = \frac{R_T}{b_T} \ln A_T + \frac{R_T}{b_T} \ln C_e \quad (5)$$

A_T , maksimum bağ enerjisine karşılık gelen denge bağlanma sabitidir. R , ideal gaz sabiti ($\text{J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$) ve T adsorpsiyon sıcaklığıdır (K).

Fasülye kabuğu üzerine metilen mavisi adsorpsiyonu için izoterm modellerinin sabitleri, izoterm denklemlerinin doğrusal (lineer) formu kullanılarak regresyon yoluyla hesaplanmıştır. Sabit parametreler ve korelasyon katsayıları (R^2) Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo incelendiğinde R^2 değerlerine bakıldığında Langmuir modeline nazaran Freundlich ve Temkin modellerinde korelasyon katsayıları 1 değerine daha yakın olduğu görülmektedir. Bu yüzden adsorpsiyonun çok tabakalı olarak gerçekleştiği ve adsorban yüzeyindeki aktif merkezlerin yapısı ve enerjisi bakımından heterojen yapıda olduğu düşünülebilir. Freundlich izotermine sıcaklık arttıkça K_f değerinin arttığı görülmektedir. Bunun nedeni, sıcaklık değişimi ile heterojen çok katmanlı olarak gerçekleşen bir adsorpsiyon prosesinde, adsorpsiyon kapasitesinin değişmesidir.

Tablo 1'de Langmuir modeli incelendiğinde maksimum adsorplama kapasitesi 333 K sıcaklığında 11.05 mg.g^{-1} olarak belirlenmiştir. Belirli ön işlemlerle muhtemelen bu değer daha üst seviyelere çıkabilirdi. Ancak maliyet ve çevre kirliliği açısından ön işlem uygulamaları bu çalışma kapsamında adsorbana uygulanmamıştır. Bu haliyle de adsorban olarak kullanılabilir olduğu adsorplama kapasitesi değerleriyle ortaya konulmuştur.

3.4. Adsorpsiyon Kinetiğinin Belirlenmesi

Adsorpsiyon sürecinin kontrol mekanizmasını belirleyebilmek için çeşitli kinetik modeller kullanılmaktadır. Adsorpsiyon hızı; adsorbanın gözenekliliği, spesifik yüzey alanı ve adsorbanın parçacık boyutu, gibi yapısal özelliklere bağlı olarak değiştiği bilinmektedir. Bu sürecin kimyasal reaksiyon, difüzyon kontrolü ve kütle transferi gibi durumların hangisinin kontrolünde olduğunu belirlemek önem arz etmektedir [20].

Sıvı fazda gerçekleşen adsorpsiyonlarda adsorbat molekülleri adsorbanın etrafında film tabakası oluşturarak etkileşir. Akışkan karıştırıldığında film tabakasının kalınlığı azalmaktadır. Bu durumda adsorpsiyonun bu evresi ihmal edilir. Sonraki evrelerde ise yüzeye tutunan moleküller gözeneklerin içine girmeye başlar ve gözeneklerin yüzeyine tutunur. Tüm bu durumlarda belirleyici basamaklar kinetik açıdan modellerle ortaya çıkarılmaya çalışılmaktadır [21].

Tablo 1. İzoterm sabitleri

İzoterm	298 K	313 K	333 K
Langmuir			
Q_0 (mg /g)	10.74	10.64	11.05
b (L/mg)	0.044	0.036	0.030
R^2	0.899	0.986	0.941
Freundlich			
K_f (L/g)	1.517	1.976	2.329
n	1.488	1.395	1.325
R^2	0.989	0.986	0.966
Temkin			
A_T	1.070	1.128	1.161
b_T	12.725	12.787	13.054
R^2	0.919	0.972	0.983

Bu çalışmada kinetik modeller arasında sıklıkla kullanılan üç model; Yalancı birinci mertebe, Yalancı ikinci mertebe ve Avrami kinetik modelleri kullanılmıştır. Bu modeller aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Yalancı birinci mertebe kinetik model Lagargren [22] tarafından ortaya konulmuş ve adsorpsiyon hız eşitliği Denklem 6 ile aşağıda verilmektedir.

$$\frac{dq}{dt} = k_1 (q_e - q_t) \quad (6)$$

Bu eşitlik $t=0$ da $q=0$ ve $t=t$ de $q=q_t$ sınır şartlarına göre integre edilirse Denklem 7 elde edilir.

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} * t \quad (7)$$

t 'ye karşılık $\log(q_e - q_t)$ grafiğe geçirildiğinde eğimi $(k_1/2.303)$ ve kayması $\log(q_e)$ olan bir doğru elde edilmektedir. Burada; k_1 , Yalancı birinci mertebe hız sabitidir (dk^{-1}). q_e , dengede birim adsorbanda adsorbe edilen adsorbat miktarıdır ($mg.g^{-1}$). q_t , t zamanında birim adsorbanda adsorbe edilen adsorbat ($mg.g^{-1}$) miktarıdır.

Yalancı ikinci dereceden hız denklemleri Ho ve McKay [23] tarafından aşağıdaki şekilde verilmektedir;

$$\frac{dq}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (8)$$

Eşitlik $t=0$ da $q=0$ ve $t=t$ de $q=q_t$ şartlarında integre edilirse ve doğrusal hale getirilirse aşağıdaki halini alır.

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (9)$$

Bu ifadeye t değerine karşılık t/q_t değeri grafiğe geçirildiğinde doğrunun eğiminden q_e değeri, kaymadan hız sabiti k_2 bulunmaktadır. Burada k_2 Yalancı ikinci derecede hız sabitidir ($g/mg.dk$).

Deneysel veriler kullanılarak yalancı birinci mertebe, yalancı ikinci mertebe ve Avrami modellerine uyum incelenmiş ilgili değerler Tablo 2'de gösterilmektedir. Tablo incelendiğinde korelasyon katsayıları yalancı ikinci mertebe kinetik modelde daha yüksek bulunmuştur. Hesaplanan q_e değerleri deneysel q_e değerlerine yalancı ikinci mertebe kinetik modelde daha fazla uyum göstermektedir. Bu durumlar göz önünde bulundurulduğunda

fasulye kabuğu üzerine metilen mavisi adsorpsiyonu yalancı ikinci merteye kinetik modele uyum gösterdiği belirlenmiştir. Benzer sonuçlar yapılan son çalışmalarda da görülmektedir [24].

Tablo 2. Kinetik sabitler

Sıcaklık (K)	298	313	323
q_e (deneysel) ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	4.776	4.744	4.722
Yalancı Birinci Merteye	298	313	323
q_e ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	1.001	1.257	1.272
k_1 (min^{-1})	0.026	0.030	0.027
R^2	0.95	0.966	0.961
Yalancı İkinci Merteye	298	313	323
q_e ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	4.838	4.837	4.814
k_2 (min^{-1})	0.078	0.062	0.057
h ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)	1.821	1.463	1.339
R^2	0.999	0.999	0.999
Avrami	298	313	323
k	0.585	0.936	0.964
n	0.332	0.361	0.346
R^2	0.986	0.945	0.946

4. Sonuçlar

Bu çalışmada tekstil endüstrisinde sıklıkla kullanılan katyonik boyalar grubunda yer alan metilen mavisinin sulu çözeltilerden adsorpsiyon yöntemiyle uzaklaştırılmasında tarımsal atık olarak değerlendirilebilecek olan fasulye kabuğunun kullanılabilirliği incelenmiştir. Çalışmada kullanılan fasulye kabuğu herhangi bir kimyasal aktivasyona ve ön işleme uğramadan doğal olarak kullanılmıştır. Aynı zamanda fasulye kabuğu tarımsal atık olarak sınıflandırıldığı için adsorban olarak kullanılması çevre kirliliği ve doğa için yarar sağlamaktadır. Fasulye kabuğunun SEM görüntülerine bakıldığında yüzeyinde çoğunlukla mezogözenekli yapıların hakim olduğu, XRD difraktogramına bakıldığında ise amorf yapıda olduğu belirlenmiştir. FT-IR analizi ile adsorban yüzeyinde aktif merkezler oluşturabilecek fonksiyonel grupların varlığı belirlenmiştir. Başlangıç metilen mavisi konsantrasyonunun, adsorban miktarının, sıcaklığın ve temas süresinin boya giderim verimi üzerine etkileri incelenmiştir. Deney sonuçlarına bağlı olarak adsorban miktarının 1 g, adsorpsiyon temas süresinin 1 saat, sıcaklığın 298 K olduğu durumların optimum değerler olduğu belirlenmiştir. Başlangıç metilen mavisi konsantrasyonu arttıkça boya giderim yüzdesi azalmaktadır. Sıcaklığın adsorpsiyon verimine önemli ölçüde etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Metilen mavisinin fasulye kabuğu üzerine adsorpsiyonunda elde edilen verilerin Freundlich izoterm modeli ile uyum sağladığı görülmüş olup, bu durum adsorban yüzeyinde bulunan aktif merkezlerin heterojen dağılım gösterdiğine işaret etmektedir ve adsorpsiyonun çok tabakalı olarak gerçekteştiği düşünülebilir. Çalışmada adsorpsiyon prosesi kinetik açıdan incelendiğinde ise yalancı ikinci merteye kinetik modele uyum gösterdiği belirlenmiştir. Adsorpsiyon işlemi sonrasında boya molekülleri içeren adsorban, desorpsiyon veya fotokatalitik uygulamalarla rejenere edilerek yeniden kullanılabilir. Çalışmalar sonucunda fasulye kabuğunun tekstil atık sularında bulunabilen metilen mavisi boyar maddesinin uzaklaştırılmasında etkili, ucuz ve çevre dostu bir adsorban olarak kullanılabileceği ortaya konulmuştur.

Kaynaklar

- [1] Yagub, M. T., Sen, T. K., Afroze, S., & Ang, H. M. (2014). Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: a review. *Advances in colloid and interface science*, 209, 172-184.
- [2] Sultana, S., Islam, K., Hasan, M. A., Khan, H. J., Khan, M. A. R., Deb, A., ... & Rahman, M. W. (2022). Adsorption of crystal violet dye by coconut husk powder: isotherm, kinetics and thermodynamics perspectives. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 17, 100651.
- [3] Salleh, M. A. M., Mahmoud, D. K., Karim, W. A. W. A., & Idris, A. (2011). Cationic and anionic dye adsorption by agricultural solid wastes: a comprehensive review. *Desalination*, 280(1-3), 1-13.
- [4] Sarıcı Özdemir, Ç. (2019). Equilibrium, kinetic, diffusion and thermodynamic applications for dye adsorption with pine cone. *Separation Science and Technology*, 54(18), 3046-3054.
- [5] Hamzezadeh, A., Rashtbari, Y., Afshin, S., Morovati, M., & Vosoughi, M. (2022). Application of low-cost material for adsorption of dye from aqueous solution. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 102(1), 254-269.
- [6] Ahmed, M. J. (2016). Application of agricultural based activated carbons by microwave and conventional activations for basic dye adsorption. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(1), 89-99.
- [7] Jawad, A. H., Abdulhameed, A. S., Wilson, L. D., Syed-Hassan, S. S. A., ALOthman, Z. A., & Khan, M. R. (2021). High surface area and mesoporous activated carbon from KOH-activated dragon fruit peels for methylene blue dye adsorption: Optimization and mechanism study. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 32, 281-290.
- [8] Onay, M., & Ozdemir, C. S. (2021). Applications of dye adsorption in fixed bed column and modeling studies. *Desalination and Water Treatment*, 222, 209-218.
- [9] Gadekar, M. R., & Ahammed, M. M. (2019). Modelling dye removal by adsorption onto water treatment residuals using combined response surface methodology-artificial neural network approach. *Journal of environmental management*, 231, 241-248.
- [10] Kearns, J. P., Wellborn, L. S., Summers, R. S., & Knappe, D. R. U. (2014). 2, 4-D adsorption to biochars: Effect of preparation conditions on equilibrium adsorption capacity and comparison with commercial activated carbon literature data. *Water research*, 62, 20-28.
- [11] Ofomaja, A.E., Naidoo, E.B., (2011). Biosorption of copper from aqueous solution by chemically activated pine cone: A kinetic study. *Chem. Eng. J.* 175:260-270.
- [12] Peng, L. C., Gao, J., Yao, S., Lan, X. Q., Li, H. P., & Song, H. (2020). Modified ginkgo leaves for adsorption of methyl violet and malachite green dyes in their aqueous system. *Desal. Water Treat.* 206, 358-370.
- [13] Masoudian, N., Rajabi, M., Ghaedi, M., (2019). Titanium oxide nanoparticles loaded onto activated carbon prepared from bio-waste watermelon rind for the efficient ultrasonic-assisted adsorption of Congo red and phenol red dyes from wastewaters. *Polyhedron* 173, 114105.
- [14] Wu, L., Zhang, X., Thorpe, J. A., Li, L., & Si, Y. (2020). Mussel-inspired polydopamine functionalized recyclable coconut shell derived carbon nanocomposites for efficient adsorption of methylene blue. *Journal of Saudi Chemical Society*, 24(8), 642-649.
- [15] Hijab, M., Saleem, J., Parthasarathy, P., Mackey, H. R., & McKay, G. (2021). Two-stage optimisation for malachite green removal using activated date pits. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11(2), 727-740.
- [16] Jabar, J. M., & Odusote, Y. A. (2020). Removal of cibacron blue 3G-A (CB) dye from aqueous solution using chemophysically activated biochar from oil palm empty fruit bunch fiber. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(5), 5417-5429.
- [17] Langmuir, I. (1918). The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical society*, 40(9), 1361-1403.
- [18] Freundlich, H. (1907). Über die adsorption in lösungen. *Zeitschrift für physikalische Chemie*, 57(1), 385-470.
- [19] Temkin, M. J.; Pyzhev, V. (1940). Recent Modifications to Langmuir Isotherms. *Acta Phys. Chem.*, 12, 271-279.
- [20] Guo, X., & Wang, J. (2019). A general kinetic model for adsorption: theoretical analysis and modeling. *Journal of Molecular Liquids*, 288, 111100.
- [21] Munagapati, V. S., Wen, H. Y., Wen, J. C., Gutha, Y., Tian, Z., Reddy, G. M., & Garcia, J. R. (2021). Anionic congo red dye removal from aqueous medium using Turkey tail (*Trametes versicolor*) fungal biomass: adsorption kinetics, isotherms, thermodynamics, reusability, and characterization. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 42(12), 1785-1798.
- [22] Lagergren S. "Zurtheorie dar sogenannten adsorption gelosterstoffe Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens". *Handlinga*, 24, 1-39, 1898.
- [23] Ho YS, McKay G. " Sorption of dye from aqueous solution by peat". *Chemical Engineering Journal*, 70, 115-124, 1998.
- [24] Benjelloun, M., Miyah, Y., Evrendilek, G. A., Zerrouq, F., & Lairini, S. (2021). Recent advances in adsorption kinetic models: their application to dye types. *Arabian Journal of Chemistry*, 14(4), 103031.

Çizgeler Üzerinde Farklı Ağırlıklandırma Yöntemleri Ve Merkezilik Ölçütleri İle Çıkarımsal Metin Özetleme

Abdulsamet AYDIN¹, Taner UÇKAN^{2*}

¹ Yapay Zekâ ve Robotik Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van, Türkiye

² Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van, Türkiye

¹ a.sametaydn@gmail.com, ^{2*} taneruckan@yyu.edu.tr

(Geliş/Received: 04/08/2022;

Kabul/Accepted: 11/12/2022)

Öz: Çıkarıma dayalı metin özetleme konusunda birçok farklı yaklaşım vardır. Bu çalışmada Kosinüs Benzerliği, Jaccard Benzerliği, Levenshtein Benzerliği ve Pearson Korelasyon Katsayısı ölçütleri kullanarak ağırlıklı çizgeler oluşturulmuştur. Bu çizgelerdeki düğümler ile temsil edilen cümleler arasından en değerli olanları belirlemek amacı ile Arasındalık Merkeziliği, Yakınlık Merkeziliği, Derece Merkeziliği ve Özvektör Merkeziliği ölçümleri kullanılmıştır. Çıkarımsal metin özetlemede kullanılan yaklaşımların farklı kombinasyonları ile her bir metinden 16 adet 200 ve 400 kelimelik özetler oluşturularak en başarılı özetlerin hangi yaklaşımlar ile elde edildiğinin tespit edilmesi hedeflenmiştir. Çalışma, Document Understanding Conference (DUC-2002) veri seti üzerinde gerçekleştirilmiştir. ROUGE değerlendirme metrikleri ile performansı hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak karşılaştırılmıştır. En başarılı sonuçlar, sırasıyla 200 kelimelik özetlerde Jaccard Benzerliği ve Yakınlık merkeziliği yaklaşımı ile 0.46091 ve 400 kelimelik özetlerde ise Kosinüs Benzerliği ve Özvektör Merkeziliği yaklaşımı ile 0.52485 F-Skor değerleri ile elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Çıkarımsal Metin Özetleme, Düğüm Merkeziliği, Benzerlik Yöntemleri

Extractive Text Summarization Using Different Weighting Methods And Centrality Measures On Graphs

Abstract: There are many different approaches to extractive text summarization. In this study, weighted graphs were created using Cosine Similarity, Jaccard Similarity, Levenshtein Similarity and Pearson Correlation Coefficient measures. Betweenness Centrality, Closeness Centrality, Degree Centrality and Eigenvalue Vector Centrality measurements were used to determine the most valuable nodes among the nodes representing the sentences in these graphs. With the different combinations of approaches used in inferential text summarization, it is aimed to determine which approaches the most successful summaries are obtained by creating 16 pieces of 200 and 400 word summaries from each text. The study was carried out on the Document Understanding Conference (DUC-2002) dataset. Its performance was calculated using ROUGE evaluation metrics and the results were compared in detail. The most successful results were obtained with the Jaccard Similarity and Closeness centrality approach in the 200-word abstracts, 0.46091 and the Cosine Similarity and Eigenvector Centrality approach in the 400-word abstracts, with an F-Score of 0.52485, respectively.

Key words: Extractive Text Summarization, Node Centrality, Similarity Methods

1. Giriş

Teknolojinin gelişmesi ile birlikte akademik ve iş dünyasında internet ve bilgisayar kullanımı her geçen gün artmaktadır. Dijital ortamlardaki metinsel verilerin katlanarak büyümesi, faydalı bilgilere erişimi oldukça zorlaştırmıştır. Bilgiye erişim sırasında aranılan bilgi ile ilgili binlerce doküman elde edilebilir. Her bir dokümanı okumak ve gerçekten de aranılan bilginin dokümanda bulunup bulunmadığını tespit etmek zahmetli bir iştir. Bu nedenlerle bilgiye erişimde zamandan tasarruf etmek amacıyla dokümanları özetleyerek önemli bilgileri kullanıcıya sunan yöntemler geliştirilmektedir.

Metin özetleme bir dokümanı genel hatlarıyla anlatan kısaltılmış halidir. Metin özetlemede çıkarıcı ve yorumlayıcı yöntemler kullanılır. Yorumlayıcı metin özetleme dilbilimsel yöntemler kullanılarak dokümandaki cümlelerden aynı anlamı ifade eden yeni cümleler üretme süreci olarak tanımlanabilir. Bu sebeple özeti çıkarılan dokümanda bulunmayan yeni cümleler veya yeni kelimeler özetlemede yer alabilir [1]. Çıkarıma dayalı özetleme, cümle bazında önemli içeriği bulmaya dayanır. Frekans ve benzerlik gibi özellikler kullanılarak önemli cümlelere karar verilir. İlk çalışmalar 1950 yıllarında Luhn tarafından yapılmıştır [2]. Bu çalışmalarda genel olarak kelime frekansları kullanılmıştır. Yapılan araştırmalar bir metinde çok fazla geçen kelimeler ile edatlar, bağlaçlar metin

* Sorumlu yazar: taneruckan@yyu.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-5329-4407, ² 0000-0001-5385-6775

içeriği hakkında pek fazla bilgi vermediğini ortaya çıkarmıştır [3]. Çıkarıma dayalı metin özetlemede önemli olan metin hakkında en fazla bilgi içeren cümlelerin seçilerek özete konulmasıdır.

Otomatik metin özetleme işleminin yapılabilmesi için öncelikle kelimelerin bilgisayarlar tarafından anlaşılır hale getirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle TF-IDF, Word2Vec, GloVe, BERT ve FastText gibi algoritmalar kullanılır [4-6]. Böylece metin içerisindeki cümleler vektör olarak temsil edilebilmektedir. Bu çalışmada cümleler, TF-IDF algoritması kullanılarak vektör haline getirilmiştir. Bu vektörler, Kosinüs Benzerliği, Jaccard Benzerliği, Levenshtein Benzerliği ve Pearson Korelasyon Katsayısı benzerlik yöntemleri kullanılarak ayrı ayrı benzerlik matrisleri oluşturulmuş ve çizgelere dönüştürülmüştür. Çizge olarak temsil edilen metindeki cümleler (düğümler) Arasındalık Merkeziliği, Yakınlık Merkeziliği, Derece Merkeziliği ve Özvektör Merkeziliği yaklaşımları kullanılarak en değerli cümlelerin seçilmesi ile özetler oluşturulmuştur. Bu çalışmada benzerlik ve merkezilik yöntemleri birlikte kullanılarak elde edilen özetlerin performansları karşılaştırılarak en başarılı özetlerin hangi yaklaşımlar ile oluşturulduğu tespit edilmiştir.

2. Literatür

Otomatik metin özetleme konusunda çıkarımsal, soyutlayıcı ve hibrit yaklaşımlar bulunmaktadır. Bilimsel makale, hukuki metin, biyomedikal doküman vb. alanlarda otomatik metin özetleme uygulamaları yaygın olarak kullanılmaktadır. Çizge tabanlı çıkarımsal metin özetleme uygulamalarında çizgedeki en değerli düğümler tespit edilmeye çalışılarak cümle bazında önemli içeriğin özette yer alması sağlanır [7].

İlk çalışmalar 1950 yıllarında Luhn tarafından yapılmıştır [2]. Bu çalışmalarda genel olarak kelime frekansları kullanılmıştır. Yapılan araştırmalar bir metinde çok fazla geçen kelimeler, edatlar ve bağlaçların metnin içeriği hakkında pek fazla bilgi vermediğini ortaya çıkarmıştır [3]. Çıkarıma dayalı metin özetlemede önemli olan metin hakkında en fazla bilgi içeren cümlelerin seçilerek özete konulmasıdır. Çizge tabanlı özetlemede ise cümleler çizge olarak temsil edilir ve düğümlerin ilişkilerine göre cümleler puanlanarak sıralanır. En yüksek puana sahip düğümler tarafından temsil edilen cümleler, metindeki sıralarına göre birleştirilerek özet oluşturulur.

Belwal ve diğ. [8], cümlelerin birbirleri ile olan benzerliklerinin yanı sıra cümleler ile dokümanın bütünü arasındaki benzerliği de dikkate alan çizge tabanlı bir yaklaşım önermiştir. Bu yaklaşımda cümlelerin birbirlerine benzerlikleri ve cümlelerin dokümanın konusuna olan benzerlikleri birlikte değerlendirilerek ağırlıklı çizgeler elde edilmiştir. Çizgedeki en yüksek değere sahip olan düğümler seçilerek temsil ettikleri cümleler ile özet oluşturulmuştur.

Joshi ve diğ. [9], konu bilgisi, anlamsal içerik, önemli anahtar kelimeler ve konum özelliklerini hesaplayarak her bir cümle için sıralama yapmışlardır. Her özellik için hesaplanan sıralama değerleri birleştirilerek dokümandaki her cümle için nihai puanları ortaya çıkarılmıştır. En yüksek puana sahip olan cümlelere özette yer verilmiştir.

Azadani ve diğ. [10], biyomedikal alanına özgü bilgiden ve sık öge kümesi madenciliği adı verilen bir veri madenciliği tekniğinden yararlanarak çizge tabanlı özetleme yöntemi önermiştir. Çalışmalarında cümlelerin benzerliklerini tespit etmek amacıyla Jaccard Benzerliği yaklaşımından yararlanmışlardır.

Metin özetleme alanında yapılan çalışmalar göstermiştir ki, bir cümle değerlendirilirken cümledeki konumu, uzunluğu ve anahtar sözcüklere yer verilip verilmediği, cümledeki kelimelerin başlıkta yer alıp almadığı ve terim frekansı gibi kıstaslar değerlendirmeye dahil edilerek özetlemenin başarısı artırılmıştır [11-13]. Mihalcea ve Tarau, PageRank algoritmasını TextRank adını verdikleri bir metin özetleme yöntemine uyarlamışlardır. Bu yöntemde her bir cümle bir düğüme atanmıştır. Düğümler arasındaki bağlantılar ise benzerlik fonksiyonları ile sağlanmıştır. En yüksek değere sahip cümleler dokümanı en iyi özetleyen cümleler olarak belirlenmiştir [14].

Çizge tabanlı çıkarımsal metin özetleme üzerine yapılan bir çalışmada, 4 farklı ilişkilendirme yönteminin "TextRank" algoritması üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada DUC ve CAST veri setinden yararlanılmıştır. Bu çalışmaya ilave olarak hiyerarşik birleştirici kümeleme ve "TextRank" yöntemleri ile bir sistem geliştirilmiştir. Önerilen yöntemde cümleler belli bir ölçüte göre kümelenebilir. Kümelerden cümle seçebilmek için "TextRank" algoritması uygulanmıştır. DUC 2002 veri seti ile yapılan çalışmalarda önerilen sistemin daha performanslı çalıştığı gözlemlenmiştir. CAST veri seti ile yapılan çalışmalar ise önerilen yöntemin 2 ilişkilendirme yöntemden daha performanslı olduğunu, diğer 2 yöntemle ise arasında az bir fark olduğu gözlemlenmiştir [15].

Kupec ve diğ. [16], cümleleri puanlamak için cümlelerin konumunun ilk 10 paragrafta olup olmadığı, büyük harfli kelimeleri barındırıp barındırmadığı, tematik kelime bulunup bulunmadığı gibi farklı özellikler belirlemişlerdir. Bu özellikler Bayes sınıflandırma algoritması ile eğitilerek bir sınıflandırıcı elde edilmiştir. Oluşturulan bu sınıflayıcı yeni bir dokümandaki hangi cümlelerin önemli olduğunu tespit etmek için kullanılmıştır.

Kaynar ve diğ. [17], metin özetlemede cümle seçimine, benzerlik yöntemlerinin etkisini incelemiştir. Uygulamalarında TextRank algoritması ile birlikte Kosinüs, Jaccard ve Levenshtein benzerlik yöntemlerini kullanmışlardır. Levenshtein mesafesi benzerlik yöntemi olarak kullanıldığında diğer benzerlik yöntemlerine göre daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Cengiz ve diğ. [18], metin çizgeleri kullanarak cümlenin önemine göre doğrusal ağırlıklandırma ile bir metin özetleme yöntemi önermektedir.

3. Materyal ve Metot

Bu çalışmada farklı benzerlik ölçütleri kullanılarak oluşturulan çizgelerin merkezilik değerlerine göre çıkarımsal özet elde edilmiştir. Jaccard Benzerliği, Kosinüs Benzerliği, Pearson Korelasyon Katsayısı ve Levenshtein Benzerliği ölçütleri kullanılmıştır. Bu benzerlik yöntemleri ile cümlelerin birbirlerine olan benzerlikleri hesaplanarak benzerlik matrisinde tutulur.

3.1. Benzerlik ölçütleri

3.1.1. Kosinüs benzerliği

Cümlelerin birer vektör olarak ifade edildiği bu yaklaşımda, iki vektör arasındaki açının kosinüs değeri cümleler arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir [19].

$$\cos(\theta) = \frac{A \cdot B}{\|A\| \|B\|} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n B_i^2}} \quad (1)$$

A ve B vektörleri arasındaki açının kosinüsü ne kadar az ise bu iki vektör birbirlerine o kadar benzer demektir.

3.1.2. Jaccard benzerliği

Jaccard benzerliği iki kümenin kesişimi ile birleşimlerinin birbirine bölünmesi şeklinde ifade edilir. Eğer benzerlik ölçütü 0 ise hiç benzemiyor, 1 ise tam benziyor demektir [20].

$$Jaccard(A, B) = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|} \quad (2)$$

3.1.3. Pearson korelasyon katsayısı

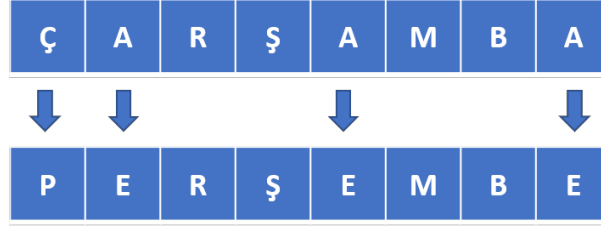
Pearson Korelasyon Katsayısı, iki sayısal ölçüm arasındaki doğrusal ilişkiyi ölçer. Pearson Korelasyon Katsayısı, +1 ile -1'lik arasında bir değer olarak ilişkinin şiddetini ve yönünü belirlemek için kullanılan bir istatistik yöntemidir. +1 değeri cümlelerin mükemmel ilişkili olduğunu, -1 ise cümlelerin birbirleri ile ilişkili olmadığı anlamına gelmektedir [21].

$$Pearson(A, B) = \frac{\sum AB - \frac{\sum A \sum B}{N}}{\sqrt{\left(\sum A^2 - \frac{(\sum A)^2}{N}\right) \left(\sum B^2 - \frac{(\sum B)^2}{N}\right)}} \quad (3)$$

3.1.4. Levenshtein mesafesi

Levenshtein mesafesi, iki kelimeyi birbirine benzetmek için minimum kaç harfte değişiklik yapılacağını (ekleme, silme veya değiştirme) sayısıdır. Şekil 1' de Levenshtein mesafesinin kelimeler için nasıl hesaplandığını gösterilmektedir. "ÇARŞAMBA" kelimesini "PERŞEMBE" kelimesine dönüştürebilmek için minimum 4 adet harfte değişiklik yapılması gerekmektedir. Bu nedenle "ÇARŞAMBA" ve "PERŞEMBE" kelimelerinin

birbirlerine olan Levenshtein mesafesi 4 olarak hesaplanmıştır. Cümleler arasındaki Levenshtein mesafesi hesaplanarak cümlelerin benzerlikleri hakkında bilgi sahibi olunabileceği varsayımı ortaya atılmıştır [17].



Şekil 1. Levenshtein mesafesi

3.2. Merkezilik ölçütleri

Merkezilik ölçütleri, bir ağ içindeki bazı düğümlerin konum ve bağlantıları nedeniyle diğer düğümlerden ne kadar önemli olduğunu belirlemek için kullanılmaktadır. Bavelas, sosyal ağdaki bir bireyin konumunun, bu kişinin diğer kişilere etkisini nasıl belirlediğini anlamak için merkeziyet kavramını ortaya atmıştır [22]. Merkezilik ölçümleri konusunda çok sayıda çalışma yapılmıştır. Her çalışma farklı bir fikri savunmaktadır. Merkezilik ölçümleri farklı alanlarda merkez düğümleri bulmak amacı ile kullanılmaktadır [23-24]. Bu çalışmada metin çizgelerinin en değerli düğümlerini tespit etmek amacıyla Arasındalık Merkeziliği, Yakınlık Merkeziliği, Derece Merkeziliği ve Özvektör Merkeziliği ölçümleri kullanılmaktadır.

3.2.1. Derece merkeziliği

Çizgedeki bir düğüm ile diğer düğümler arasındaki bağlantılarının sayısı olarak tanımlanmaktadır. Freeman, merkez düğümün derecesinin bağlı olduğu diğer düğümlerin sayısı olduğunu ortaya atmıştır. Düğüm derecesi bir ağı incelerken ilk adım olarak kullanılır [25]. N adet düğümden oluşan bir $G = (V, E)$ çizgesi olsun ve v düğümünün derece merkeziliği $C_D(v)$ Denklem 4 ile hesaplanmaktadır.

$$C_D(v) = \frac{\text{derece}(v_i)}{N-1} \quad (4)$$

3.2.2. Arasındalık merkeziliği

Arasındalık merkeziliği, bir çizgedeki merkeziliği ölçmek için kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntemdeki temel fikir x düğümünden y düğümüne en kısa yoldan giderken çoğunda V düğümünden geçiliyorsa V düğümü önemlidir. Bu yöntemde önemli düğümler diğer düğümlerle bağlantılı olduğu varsayılır [26]. V düğümü için arasındalık merkeziliği Denklem 5 ile hesaplanmaktadır. N çizgedeki düğümler kümesidir.

$$C_b(v) = \sum_{x,y \in N} \frac{G_{x,y}(v)}{G_{x,y}} \quad (5)$$

3.2.3. Yakınlık merkeziliği

Yakınlık merkeziliği, düğümler arasındaki en kısa mesafelerin toplamıdır [27]. Yakınlık merkeziliği değeri, hesaplanmak istenen düğümün çizgede bulunan diğer düğümler ile olan en kısa yol mesafelerinin toplanması ile elde edilebilir [18]. V bir düğüm olmak üzere, v düğümünden diğer düğümlere gidilebilen en kısa yol olarak tanımlanır [28]. İki düğüm arasındaki en kısa mesafe $mesafe(V_i, V_j)$ olmak üzere yakınlık merkeziliği Denklem 6'daki gibi hesaplanmaktadır [27].

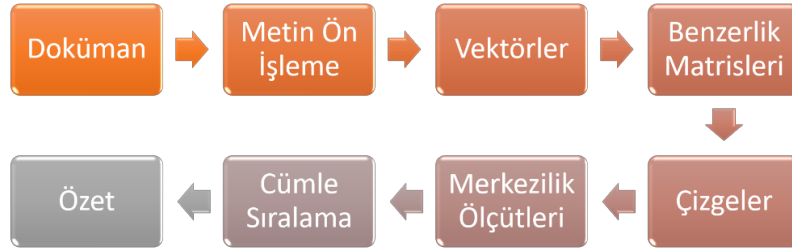
$$C_c(v_i) = \frac{N-1}{\sum_{V_j \in V} mesafe(v_i, v_j)} \quad (6)$$

3.2.4. Özvektör merkeziliği

Özvektör merkeziliği, bir çizgedeki düğümün önemini belirlemek için kullanılan yöntemlerden biridir. Bu yöntem önemli bir düğüm ile olan bağlantının düşük öneme sahip olan bir düğüme olan bağlantıdan daha değerli olduğu prensibine dayanmaktadır [28]. Google tarafından sunulan PageRank, özvektör merkeziliği kullanan bir yöntemdir [29]. Özvektör merkeziliği, V_j ve V_i düğümler arasındaki bağlantıların ağırlığı ve λ bir sabit olmak üzere, Denklem 7 ile hesaplanmaktadır [27].

$$C_e(v_i) = \frac{1}{\lambda} \sum_{v_j \in N(v_i)} v_{ij} \chi C_e(v_j) \quad (7)$$

Şekil 2’de, yapılan çalışmaya ait aşamalar genel hatlarıyla gösterilmektedir. Öncelikle özetlenecek dokümanlara metin ön işleme adımları uygulanır. Bu aşamada noktalama işaretleri ve anlam ifade etmeyen kelimeler cümlelerden çıkarılır. Ön işlemde geçen cümleler vektörlere dönüştürülür. Vektörler kullanılarak benzerlik yöntemleri ile birbirlerinden farklı benzerlik matrisleri oluşturulur. Bu çalışmada 4 farklı benzerlik yöntemi kullanılmıştır. Benzerlik matrisleri çizgelere dönüştürülür. Böylece her bir cümle çizgedeki bir düğüm ile temsil edilmiş olur. Benzerlik matrislerinde tutulan değerler çizgenin düğümleri arasındaki bağlantıların ağırlıklarıdır. Farklı benzerlik yöntemleri ile elde edilen çizgelerdeki merkezi düğümlerin tespit edilmesi için yukarıda bahsedilen merkezilik ölçümleri uygulanarak en değerli düğümler tespit edilir. Çalışmada farklı benzerlik yöntemi ve merkezilik ölçütleri kullanılarak 16 farklı özet oluşturulmuştur. Böylece benzerlik ve merkezilik ölçütleri birlikte kullanılarak oluşturulan özetler birbirleri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 2. Benzerlik yöntemleri ve merkezilik ölçütleri kullanarak metin özetleme

4. Deneysel Çalışmalar

Çalışmanın bu bölümünde farklı benzerlik ölçütleri kullanılarak oluşturulan çizgelerin merkezilik değerleri ile oluşturulan özetlerin başarısı değerlendirilmektedir. Yöntemlerin başarısını test edebilmek için Document Understanding Conference (DUC-2002) veri seti kullanılmıştır. Bu veri setinde metin özetlemeye yönelik dokümanlar bulunmaktadır. Çalışma, çıkarımsal özetleme yöntemleri kullanılarak yapıldığından veri setinin ilgili dosyalarından yararlanılmıştır. DUC-2002 veri seti çıkarımsal özeti farklı değerlendiriciler tarafından oluşturulan 59 adet dosyaya sahiptir. Ayrıca bu dosyalara ait her birinden iki farklı değerlendiricinin oluşturduğu 200 ve 400 kelimelik özetler bulunmaktadır.

Çalışmada DUC-2002 veri setinden 10 adet dosyanın farklı benzerlik ölçütleri ile oluşturulan çizgelerin merkezilik değerleri ile özetleri oluşturulmuştur. Oluşturulan özetler, ROUGE (Recall-Oriented Understudy for Gisting Evaluation) performans ölçütlerinden ROUGE-1, ROUGE-2, ROUGE L ve ROUGE-W-1.2 ile değerlendirilmiştir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmanın amacı, farkı benzerlik ölçütleri ile oluşturulan çizgeler ve bu çizgelerin merkezilik değerleri ile çıkarımsal çizge tabanlı özet oluşturmaktır. DUC-2002 veri setinde yer alan metinler üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Metinler üzerinde çalışabilecek biçimlere dönüştürülmesi amacıyla bir takım metin ön işleme işlemlerine tabi tutulmuştur. TF-IDF algoritması kullanılarak metin içerisindeki cümleler vektör olarak temsil edilmiştir. Vektör olarak temsil edilen cümleler kosinüs benzerliği, Jaccard benzerliği, levenshtein benzerliği, pearson korelasyon katsayısı ölçütleri kullanılarak çizgeler oluşturulmuştur. Oluşturulan bu çizgelerdeki en değerli düğümleri tespit etmek amacı ile Derece Merkeziliği, Arasındalık Merkeziliği, Yakınlık Merkeziliği ve Özvektör Merkeziliği ölçütleri kullanılmıştır.

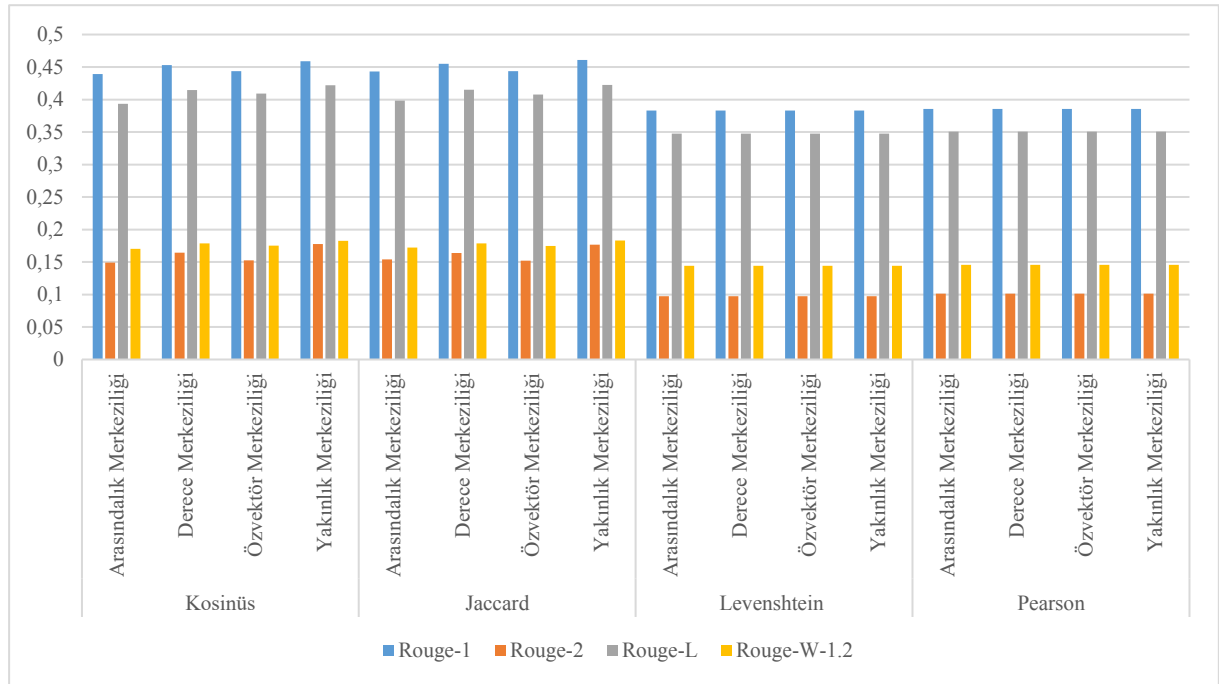
Literatürdeki en yaygın performans metrikleri kullanılarak elde edilen özetlerin başarısı hesaplanarak yaklaşımların performansı birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Her bir yaklaşıma ait 200 ve 400 kelimelik özetler oluşturulmuştur. Gerçekleştirilen çalışma ile DUC-2002 veri setindeki metinlere ait referans özetler (200,400 kelimelik) ve bu çalışma ile oluşturulan özetler karşılaştırılarak ROUGE metrikleri kullanılarak elde edilen özetlerin performansını değerlendirilmiştir. Kosinüs Benzerliği, Jaccard Benzerliği, Levenshtein Benzerliği ve Pearson Korelasyon Katsayısı ölçütleri ile merkezilik değerlerine göre oluşturulan modellerin 200 kelimelik özetleme performanslarına Tablo 1’de, 400 kelimelik özetleme performanslarına ise Tablo 2’de yer verilmiştir.

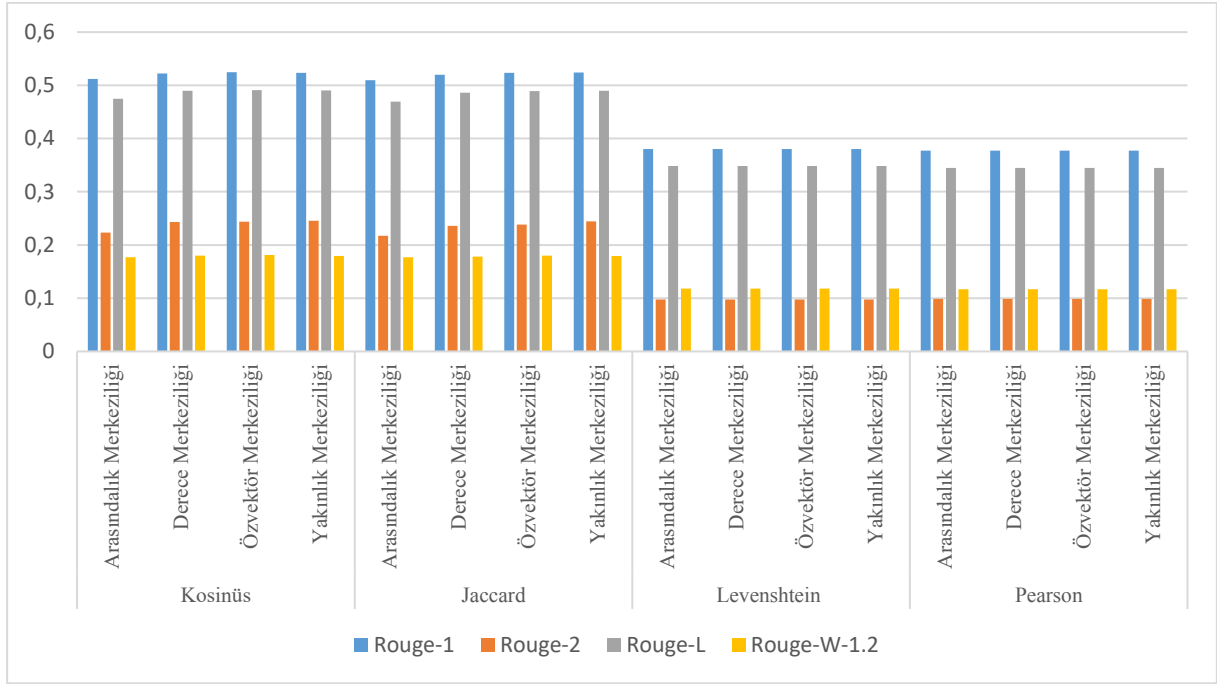
Tablo 1. 200 kelimededen oluşan özetler için farklı benzerlik yöntemleri kullanılarak oluşturulan çizgelerin merkezilik ölçütlerine göre performansları

		Rouge-1	Rouge-2	Rouge-L	Rouge-W-1.2
Kosinüs	<i>Arasındalık Merkeziliği</i>	0,43934	0,14897	0,39362	0,17011
	<i>Derece Merkeziliği</i>	0,45309	0,16436	0,4145	0,17847
	<i>Özvektör Merkeziliği</i>	0,44369	0,15241	0,40893	0,17532
	<i>Yakınlık Merkeziliği</i>	0,45876	0,17765	0,42197	0,18264
Jaccard	<i>Arasındalık Merkeziliği</i>	0,44309	0,15411	0,39825	0,17218
	<i>Derece Merkeziliği</i>	0,45507	0,16362	0,41486	0,17874
	<i>Özvektör Merkeziliği</i>	0,44366	0,15213	0,40764	0,17487
	<i>Yakınlık Merkeziliği</i>	0,46091	0,17648	0,42249	0,18284
Levenshtein	<i>Arasındalık Merkeziliği</i>	0,38284	0,09753	0,34754	0,14433
	<i>Derece Merkeziliği</i>	0,38284	0,09753	0,34754	0,14433
	<i>Özvektör Merkeziliği</i>	0,38284	0,09753	0,34754	0,14433
	<i>Yakınlık Merkeziliği</i>	0,38284	0,09753	0,34754	0,14433
Pearson	<i>Arasındalık Merkeziliği</i>	0,38552	0,10106	0,3507	0,14576
	<i>Derece Merkeziliği</i>	0,38552	0,10106	0,3507	0,14576
	<i>Özvektör Merkeziliği</i>	0,38552	0,10106	0,3507	0,14576
	<i>Yakınlık Merkeziliği</i>	0,38552	0,10106	0,3507	0,14576

Tablo 2. 400 kelimededen oluşan özetler için farklı benzerlik yöntemleri kullanılarak oluşturulan çizgelerin merkezilik ölçütlerine göre performansları

		Rouge-1	Rouge-2	Rouge-L	Rouge-W-1.2
Kosinüs	<i>Arasındalık Merkeziliği</i>	0,51221	0,22353	0,47469	0,17705
	<i>Derece Merkeziliği</i>	0,52245	0,24289	0,48987	0,1798
	<i>Özvektör Merkeziliği</i>	0,52485	0,2439	0,49092	0,18123
	<i>Yakınlık Merkeziliği</i>	0,52357	0,24578	0,49026	0,17964
Jaccard	<i>Arasındalık Merkeziliği</i>	0,50963	0,21711	0,46918	0,17674
	<i>Derece Merkeziliği</i>	0,52013	0,23619	0,48588	0,17831
	<i>Özvektör Merkeziliği</i>	0,52335	0,23827	0,48894	0,18013
	<i>Yakınlık Merkeziliği</i>	0,52376	0,24448	0,48994	0,17958
Levenshtein	<i>Arasındalık Merkeziliği</i>	0,38037	0,09744	0,3483	0,11819
	<i>Derece Merkeziliği</i>	0,38037	0,09744	0,3483	0,11819
	<i>Özvektör Merkeziliği</i>	0,38037	0,09744	0,3483	0,11819
	<i>Yakınlık Merkeziliği</i>	0,38037	0,09744	0,3483	0,11819
Pearson	<i>Arasındalık Merkeziliği</i>	0,37712	0,09877	0,34471	0,11698
	<i>Derece Merkeziliği</i>	0,37712	0,09877	0,34471	0,11698
	<i>Özvektör Merkeziliği</i>	0,37712	0,09877	0,34471	0,11698
	<i>Yakınlık Merkeziliği</i>	0,37712	0,09877	0,34471	0,11698

**Şekil 3.** 200 kelimededen oluşan özetlerin ROUGE metriklerine göre F-skor değerleri



Şekil 4. 400 kelimededen oluşan özetlerin ROUGE metriklerine göre F-skor değerleri

Çizge tabanlı metin özetleme çalışmalarında cümlelerin birbirlerine olan benzerlikleri genellikle Kosinüs Benzerliği ve Jaccard Benzerliği ile hesaplanır. Belwal ve diğ. [8] ve Yalkın [15], Kosinüs ve Jaccard benzerliklerinden yararlanarak özetler oluşturmuşlardır. Ayrıca Kaynar ve diğ. [17], farklı benzerlik yöntemlerinin metin özetlemeye etkileri üzerine çalışma yapmışlardır. Ancak bu çalışmada Kosinüs, Jaccard ve Levenshtein benzerlik yöntemlerinin yanı sıra Pearson Korelasyon katsayısı da kullanılarak çizgeler oluşturulmuştur. Elde edilen çizgelerin her biri için Derece Merkeziliği, Arasındalık Merkeziliği, Yakınlık Merkeziliği ve Özvektör Merkeziliği yaklaşımları ile en değerli düğümler tespit edilerek cümlelerin metindeki sıralarına göre özetler oluşturulmuştur.

Elde edilen sonuçlara göre Jaccard Benzerliği ile Özvektör Merkeziliği yaklaşımı ve Kosinüs Benzerliği ile Yakınlık Merkeziliği yaklaşımı birlikte kullanıldığında diğer yaklaşımlara göre daha başarılı özetler elde edildiği görülmüştür.

6. Tartışma

Bu çalışmada, çıkarımsal metin özetleme yapmak amacıyla çizge tabanlı bir süreç sunulmaktadır. Dokümanlar farklı benzerlik yöntemleri kullanılarak çizge temsilleri oluşturulmuş ve en değerli cümlelerin tespit edilmesi için düğüm merkezilik değerleri hesaplanmıştır. Merkezilik ölçümleri en yüksek değerli olan cümleler seçilerek 200 kelimelik ve 400 kelimelik özetler oluşturulmuştur. Elde edilen özetler birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 1' de görüldüğü üzere çizgelerin merkezilik değerleri ile oluşturulan 200 kelimelik özetlerde Jaccard Benzerliği ve Yakınlık merkeziliği yaklaşımı diğer yaklaşımlara göre başarılı performans göstermiştir. Bu yaklaşım ile elde edilen ROUGE-1 metriğinin F-skor değeri 0,46091 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 2' de görüldüğü üzere ise Kosinüs Benzerliği kullanılarak oluşturulan çizgenin Özvektör Merkeziliği değerleri ile oluşturulan 400 kelimelik özetler en yüksek performansı göstermiştir. ROUGE-1 metriğinin F-skor değeri 0,52485 olarak hesaplanmıştır. Özvektör merkezilik değeri yüksek olan düğümler hem kendileri hem de komşuları çok fazla bağlantıya sahiptir. Bu da o düğümün önemli ve etkili olduğunu ifade eder. En yüksek performans özvektör merkeziliği yaklaşımı ile ölçülmüştür.

Tablolar ve şekillerde görüldüğü üzere kullanılan performans metrikleri açısından, farklı benzerlik ölçütleri kullanılarak oluşturulan çizgelerin düğüm merkezilik değerleri ile elde edilen özetlerin performansı metin özetlemede kullanışlı ve etkin bir yöntem olduğunu göstermiştir.

Kaynaklar

- [1] Sunitha C, Jaya A, Ganesh A. A study on abstractive summarization techniques in Indian languages. *Procedia Computer Science*. 2016;87:25-31.
- [2] Luhn HP. The automatic creation of literature abstracts. *IBM Journal of research and development*. 1958;2(2):159-65.
- [3] Nenkova A, McKeown K. *Automatic summarization: Now Publishers Inc*; 2011.
- [4] Çelik Ö, Koç BC. TF-IDF, Word2vec ve Fasttext Vektör Model Yöntemleri ile Türkçe Haber Metinlerinin Sınıflandırılması. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*. 2021;23(67):121-7.
- [5] Dharma EM, Gaol FL, Leslie H, Warnars H, Soewito B. The accuracy comparison among Word2vec, Glove, and Fasttext towards convolution neural network (CNN) text classification. *J Theor Appl Inf Technol*. 2022;31(2).
- [6] Gautam AK, Bansal A. Effect of Features Extraction Techniques on Cyberstalking Detection Using Machine Learning Framework. *Journal of Advances in Information Technology Vol*. 2022;13(5).
- [7] El-Kassas WS, Salama CR, Rafea AA, Mohamed HK. Automatic text summarization: A comprehensive survey. *Expert Systems with Applications*. 2021;165:113679.
- [8] Belwal RC, Rai S, Gupta A. A new graph-based extractive text summarization using keywords or topic modeling. *Journal of Ambient Intelligence and Human Computing*. 2021;12(10):8975-90.
- [9] Joshi A, Fidalgo E, Alegre E, Alaiz-Rodriguez R. RankSum—An unsupervised extractive text summarization based on rank fusion. *Expert Systems with Applications*. 2022;200:116846.
- [10] Azadani MN, Ghadiri N, Davoodijam E. Graph-based biomedical text summarization: An itemset mining and sentence clustering approach. *Journal of biomedical informatics*. 2018;84:42-58.
- [11] Edmundson HP. New methods in automatic extracting. *Journal of the ACM (JACM)*. 1969;16(2):264-85.
- [12] Lin C-Y, editor Rouge: A package for automatic evaluation of summaries. *Text summarization branches out*; 2004.
- [13] Salton G, Buckley C. Term-weighting approaches in automatic text retrieval. *Information processing & management*. 1988;24(5):513-23.
- [14] Mihalcea R, Tarau P, editors. *TextRank: Bringing order into text*. Proceedings of the 2004 conference on empirical methods in natural language processing; 2004.
- [15] Yalkın C. Çizge tabanlı metin özetleme Yüksek Lisans Tezi. Fırat Üniversitesi, 2014.
- [16] Kupiec J, Pedersen J, Chen F, editors. A trainable document summarizer. Proceedings of the 18th annual international ACM SIGIR conference on Research and development in information retrieval; 1995.
- [17] Kaynar O, Işık YE, Görmez Y, editors. Graph based automatic document summarization with different similarity methods. 2017 25th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU); 2017: IEEE.
- [18] Cengiz H, Uçkan T, Seyyarer E, Karci A, editors. Graph-based suggestion for text summarization. 2018 International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP); 2018: Ieee.
- [19] Singhal A. Modern information retrieval: A brief overview. *IEEE Data Eng Bull*. 2001;24(4):35-43.
- [20] Bag S, Kumar SK, Tiwari MK. An efficient recommendation generation using relevant Jaccard similarity. *Information Sciences*. 2019;483:53-64.
- [21] Zhou H, Deng Z, Xia Y, Fu M. A new sampling method in particle filter based on Pearson correlation coefficient. *Neurocomputing*. 2016;216:208-15.
- [22] Bavelas A. A mathematical model for group structures. *Human organization*. 1948;7(3):16-30.
- [23] Erkan G, Radev DR. LexRank: Graph-based lexical centrality as salience in text summarization. *Journal of artificial intelligence research*. 2004;22:457-79.
- [24] Kutlu M, Cığır C, Cicekli I. Generic text summarization for Turkish. *The Computer Journal*. 2010;53(8):1315-23.
- [25] Freeman LC. Centrality in social networks conceptual clarification. *Social networks*. 1978;1(3):215-39.
- [26] Feo TA, Resende MG, Smith SH. A greedy randomized adaptive search procedure for maximum independent set. *Operations Research*. 1994;42(5):860-78.
- [27] Boudin F, editor A comparison of centrality measures for graph-based keyphrase extraction. *International joint conference on natural language processing (IJCNLP)*; 2013.
- [28] Kosorukoff A. *Social network analysis: theory and applications*: Passmore, D. L; 2011.
- [29] See A, Liu PJ, Manning CD. Get to the point: Summarization with pointer-generator networks. *arXiv preprint arXiv:170404368*. 2017.

Hidrolojik Sapan Değer Tespitinde Komşu İstasyon Seçimi

Ahu DEDE^{1*}, Necati AĞIRALIOĞLU²

¹Hidrolik ve Su Kaynakları Bölümü, İnşaat Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
²İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Antalya Bilim Üniversitesi, Antalya, Türkiye
^{*}dedeah@itu.edu.tr, ²necati.agiralioglu@antalya.edu.tr

(Geliş/Received: 13/08/2022;

Kabul/Accepted: 08/11/2022)

Öz: Bu çalışmada, k-en yakın komşular yöntemine göre komşu istasyon seçiminin kriterleri, sapan değer tespiti üzerinden değerlendirilmiştir. Türkiye’de 129 istasyonda, 1926 – 2012 tarihleri arasında aylık olarak ortalama sıcaklık, ortalama bağıl nem ve toplam yağış verileri kullanılmıştır. Yakınlığa göre komşu seçildiğinde karşılaşılan ilk problem veri eksikliğinden dolayı uzak komşulara başvurulması ve komşuların %0,04 - %3’ünün 140 km’den fazla mesafede ve 0,4’ten düşük korelasyonda olmasıdır. İkinci problem incelenen dizilerin %0,1 - 3’ünde daha uzak olan komşuların en yakın 5 komşudan anlamlı olarak daha yüksek korelasyon göstermesidir. Korelasyon katsayısının yüksekliğine göre komşu seçildiğinde istasyonların %2 - %8’inde her ayın sadece kendi 1.komşusu o ay için kullanılabilir. 2. ve 3.komşular için bu oranlar düşmüştür. İstasyonların %25 - %86’sında belli aylardaki 1.komşular tüm ayları temsil edebilir ama bunun hangi aylardaki komşular olduğu belirlenmelidir. Ayrıca istasyonların %2,5’inde her değişkenin sadece kendi 1.komşusu o değişken için kullanılabilir. 2. ve 3.komşular için bu oran düşmüştür. İstasyonların %29’unda belli değişkenlerdeki 1.komşular tüm değişkenleri temsil edebilir ama bunun hangi değişkenlerdeki komşular olduğu belirlenmelidir. Bunlardan başka, tespit edilen sapan değerler çıkarılınca, sapan değerli dizilere göre korelasyon katsayısı, çoğunlukla %1-36 daha fazla, bazen %1-5 daha az çıkmıştır.

Anahtar kelimeler: K-En Yakın Komşular, Sapan Değer, Histogram, Kutu Grafiği, Korelasyon.

The selection of neighboring station in hydrological outlier detection

Abstract: In this study, the criteria of choosing a neighboring station by k-nearest neighbor method were evaluated through outlier detection. Monthly average temperature, average relative humidity and total precipitation data were used between 1926 and 2012 at 129 stations in Turkey. The first problem when choosing a neighbor according to the extent of nearness is that 0.04% - 3% of neighbors are more than 140 km away and less than 0.4 correlation because of choosing distant neighbors due to lack of data. The second problem is the more distant neighbors show a significantly higher correlation than the 5 closest neighbors at 0.1 - 3% of monthly series. When the neighbor is selected according to the correlation coefficient, the 1st neighbor of each month can be used for only that month in 2% - 8% of the stations. These percentages decrease for 2nd and 3rd neighbors. In 25% - 86% of stations, the 1st neighbors in certain months can be used for all months, but it should be determined which certain months are they. In addition, in 2.5% of the stations, the 1st neighbor of each variable can be used for only that variable. The percentage decreases for 2nd and 3rd neighbors. In 29% of the stations, the 1st neighbors in certain variables can be used for all the variables, but it should be determined which certain variables are they. Other than these, when the detected outliers are removed, the correlation coefficient becomes mostly 1-36% higher, sometimes 1-5% less than for the series with outliers.

Key words: K-NearestNeighbors, Outlier, Histogram, Boxplot, Correlation

1. Giriş

Bilimselliğin önemli kriterlerinden biri, rakamlaştırılmış ölçümlerin güvenilir olmasıdır. O nedenle güvenilirlik analizleri pek çok bilimsel disiplinin ayrılmaz bir parçasıdır. Hidrometeorolojik ölçümlerin; eksik veri tahmini, türdeşlik, kalite kontrol gibi güvenilirlik analizleri yapılırken en önemli husus, hedef istasyonu kıyaslamak için komşu istasyonlar seçmektir. Komşu istasyonlar, hedef istasyonla aralarındaki benzerliğe göre veya rastgele olarak seçilebilir [1]. Benzerliğe göre seçildiğinde hedef istasyonla arasındaki mesafe, istasyonlarda ölçülen değerler ya da her ikisi komşu istasyonları ağırlıklandırmada kullanılır [2].

Komşu istasyonları ağırlıklandırmada mesafe çeşitli şekillerde kullanılır. Thiessen yönteminde en yakındaki istasyonların ağırlıkları bir, diğer istasyonlarınki sıfır alınır [3]. En yakın komşu yönteminde en yakındaki tek istasyonun ağırlığı bir, diğer istasyonlarınki sıfır alınır [4]. İstasyon ortalama tahminleyici yönteminde tüm

* Sorumlu yazar: dedeah@itu.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹0000-0002-0534-6823, ²0000-0002-5336-9202

istasyonlar eşit ağırlıkta kabul edilir [5]. Ters mesafe ağırlıklı enterpolasyon yönteminde hedef istasyonun diğer istasyonlar ile olan mesafesiyle ,d, ters orantılı olarak belirlenen ve $(1/d^a)/\sum(1/d^a)$ şeklinde ifade edilen ağırlıklar kullanılır [5]. Coğrafi koordinatlar yönteminde komşu istasyonların enlem ,e, ve boylam ,b, değerleriyle ters orantılı olarak belirlenen ve $(1/(e^2+b^2))/\sum(1/(e^2+b^2))$ şeklinde ifade edilen ağırlıklar kullanılır [4]. Doğal komşuluk yönteminde en yakındaki komşular temsil ettikleri alanlara göre ağırlıklandırılır [6]. Krigleme yönteminde variogramlarla veya yapay sinir ağlarıyla hesaplanan polinomlarla, hedef istasyonun diğer istasyonlar ile olan mesafesiyle artan ölçüm değerlerinin birbirinden olan farklılıkları kullanılarak oluşturulan denklem sistemlerinin çözümüyle belirlenen ağırlıklar kullanılır [7].

Mesafeye göre komşu istasyon seçiminin temeli yakın istasyonlar arası benzerliğin yüksek olduğunun düşünülmesidir [8]. Fakat mesafenin kısa olması iki istasyonun benzer olduğunu her zaman göstermez [7]. Dolayısıyla komşu istasyonları ağırlıklandırmada ölçülen değerler de kullanılır. Bunlar da mesafeler gibi çeşitli şekillerde kullanılır. Hedef istasyondaki değerler ,x, ile diğer istasyonlardaki değerler ,y, arasındaki korelasyon katsayıları ,r, ile ağırlıklar $(1/r^2)/\sum(1/r^2)$ şeklinde belirlenebilir [9]. Ters mesafe ağırlıklı enterpolasyon yönteminde hedef istasyonun diğer istasyonlar ile olan mesafesi ,d, yerine istatistiksel bir ölçü olan $\sum(x-y)^2/2n$ katsayısı ile ters orantılı olarak belirlenen ağırlıklar kullanılır [10]. Bir diğer durumda, hedef istasyondaki ölçülen değer diğer istasyonlardaki ölçülen değerlerin bir fonksiyonu olacak şekilde yazılan denklemlerdeki katsayılar komşu istasyonların ağırlıkları olur. Ağırlıklar, denklemlerin çözüm yöntemlerine göre değişebilir. Çok değişkenli doğrusal polinomlardan oluşan denklem sistemleri sadece katsayıları belirleyen yöntemlerle çözülebilir veya buna ek olarak bu denklem sonuçlarının gözlemlenen değerlerle olan farklarını en aza indirecek şekilde çözüme giden yollar izlenebilir. Optimum ağırlıklandırma yöntemi ve negatif olmayan en küçük kareler yönteminde bu yollar izlenmiştir [2, 5]. Normal oran yönteminde hedef istasyondaki değerlerin aritmetik ortalamasının , M_x , komşu istasyondaki değerlerin aritmetik ortalamasına , M_y , oranı (M_x/M_y) ile belirlenen ağırlıklar kullanılır [4]. En yakın komşu yönteminde komşu istasyon yakınlığına göre seçildiği gibi hedef istasyonla en yüksek korelasyon katsayısına sahip istasyonun ağırlığı bir, diğerlerininki sıfır alınarak da seçilebilir. Bu ağırlık bazen bir yerine hedef istasyondaki değerlerin aritmetik ortalamasının , M_x , komşu istasyondaki değerlerin aritmetik ortalamasına , M_y , oranı (M_x/M_y) olarak da alınabilir. Bazen de tek değişkenli doğrusal regresyon denklemleri şeklinde yazılıp topluca çözümlenerek ağırlıklar bulunur [11].

Komşu istasyonları ağırlıklandırmada mesafe ve ölçülen değerler birlikte de kullanılabilir. Moran I, Getisord G veya Geary C istatistikleriyle hesaplanan uzaysal otokorelasyon katsayısı hem ölçülen değerleri hem de aralarındaki mesafeyi içerdiğinden buna göre belirlenen komşu istasyonlar da her ikisi de kullanılmış olur [8]. Mesafeyi içeren uzaysal otokorelasyon katsayısının tekrar mesafeyle çarpılması veya bölünmesiyle hesaplanan ağırlıklarda da gene her ikisi de kullanılmış olur [5]. Coğrafi koordinatlı normal oran yönteminde komşu istasyonların enlem, e, ve boylam, b, değerleriyle ters orantılı olarak belirlenen ağırlıkların, hedef ve komşu istasyonlardaki aritmetik ortalamaların oranıyla (M_x/M_y) çarpılması ile $(1/(e^2+b^2)).(M_x/M_y)/\sum(1/(e^2+b^2)).(M_x/M_y)$ şeklinde belirlenen ağırlıklar kullanılır [4]. Sistemik hatalar sapma düzeltmesiyle düzeltilir. Sapma düzeltmeleri, birliktelik kural tabanlı, dağılım tabanlı veya ortalama değer tabanlı yöntemler olarak istasyonlardaki değerleri doğrudan veya dolaylı kullanır. Dolayısıyla komşu istasyonlar için ters mesafe ağırlıklı enterpolasyon veya krigleme gibi mesafenin kullanıldığı yöntemlerde belirlenen ağırlıklar sapma düzeltmesiyle değiştirildiğinde hem mesafe hem değerler kullanılmış olur [9]. İki sonuçlu değişkenler istasyonda değer olup olmama durumunu temsil eder (ör: yağış var/yok). Optimum mesafe tabanlı yöntemlerde olduğu gibi iki sonuçlu değişkenlerle mesafenin birlikte kullanılmasıyla hesaplanan ağırlıklarda hem mesafe hem değerler kullanılmış olur [5]. K-en yakın komşular yönteminde hedef istasyonla komşu istasyonlar arasındaki mesafe ve komşu istasyonların sayısı kullanılır. Komşu istasyonların sayısı az olursa aşırı uyum çok olursa eksik uyum olacağından değerler mesafeler kadar sonucu etkiler. Bu yöntem başlangıcında Pearson korelasyon katsayısı yardımıyla bileşenlerin azaltılması yoluyla da kullanılabilir [12] ya da korelasyon katsayısı ve nominal mesafeyi ölçen değer fark metriğiyle belirlenen ilişkiler arası farkların bulanık kümelerle sayısal olarak gösterilen değeri yardımıyla da kullanılabilir [13]. Her iki durumda da ağırlıklandırmaya hem değerlerin hem mesafelerin etkisi vardır. En iyi tek tahminci yönteminde mesafe ile en yakındaki istasyonlar belirlenir, korelasyon katsayısıyla onların içinden en benzer istasyon komşu istasyon olur [5]. Bulanık kural tabanlı yöntemde eğer üyelik fonksiyonları sadece değerler üzerinden belirlenmişse, ağırlıklar değerler

kullanılarak, sadece mesafeler üzerinden belirlenmişse, ağırlıklar mesafeler kullanılarak, her ikisi üzerinden belirlenmişse, ağırlıklar her ikisi kullanılarak bulunmuş olur [11].

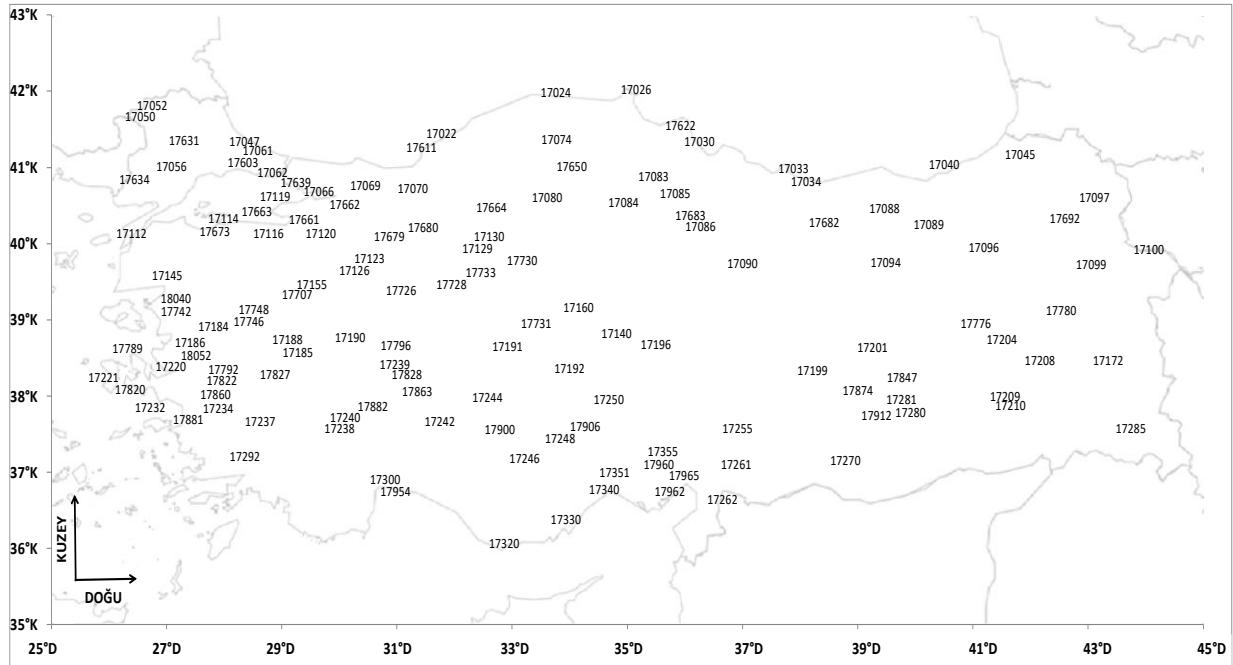
Bu çalışmada hidrolojik sapan değer tespitinde komşu istasyon seçimi için k-en yakın komşular yöntemi kullanılmış ve Türkiye'deki pek çok sıcaklık, bağıl nem ve yağış verileri kullanılarak bulunan sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Literatürde en yakın k komşunun seçildiği çalışmalar [14, 15, 16, 17, 18, 19] ve en yüksek korelasyonlu k komşunun seçildiği çalışmalar [16, 20, 21, 22, 23] olmak üzere k komşu sayısını seçme üzerine bir çok çalışma vardır. Mesafe ve korelasyonun sabit alınarak değişen sayıda komşuların belirlendiği çalışmalar da mevcuttur [24]. Çalışmada, en yakın 3 komşu seçildiğinde veri eksikliğinin ve korelasyon katsayısının ortaya çıkardığı problemler ile en yüksek korelasyonlu 5 komşu seçildiğinde hidrolojik verilerdeki çeşitliliğin ortaya çıkardığı problemler değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme istasyonlarda sapan değer tespiti üzerinden yapılmıştır. Hidrolojik sapan değerleri tespit etmek için literatürde birçok yöntem mevcuttur [15, 25, 26, 27]. Burada literatürde sıklıkla kullanılan histogram ve kutu grafiği yöntemi kullanılmıştır. Tüm işlemler excel ve excel makro ile yapılmıştır.

2. Materyal

2.1. Genel Değerlendirme

Bu çalışmadaki 1926 – 2012 arası Türkiye genelinde 129 istasyonda aylık ortalama sıcaklık (°C), 128 istasyonda aylık ortalama bağıl nem (%) ve 128 istasyonda aylık toplam yağış (mm) olmak üzere 4620 adet dizi Devlet Meteoroloji İşlerine (DMİ) bağlı Türkiye Meteorolojik Veri Arşiv ve Yönetim Sisteminden temin edilmiştir. University of East Anglia (İngiltere) kurumunun genel ağ açık veri tabanına göre verilerin eksik kısımları tamamlanmıştır. İstasyonların 82 tanesi 2007'ye kadar klima istasyonuyken, sonrasında otomatik istasyon olmuştur [28].

Klima istasyonlarında sıcaklık kuru termometreyle, bağıl nem kuru ve ıslak termometreyle ölçülür. Bunlar otomatik istasyonlarda sensörlerle ölçülür. Yağış ise klima istasyonunda plüviyometreyle, otomatik istasyonlarda elektronik plüviyometreyle ölçülür [29].

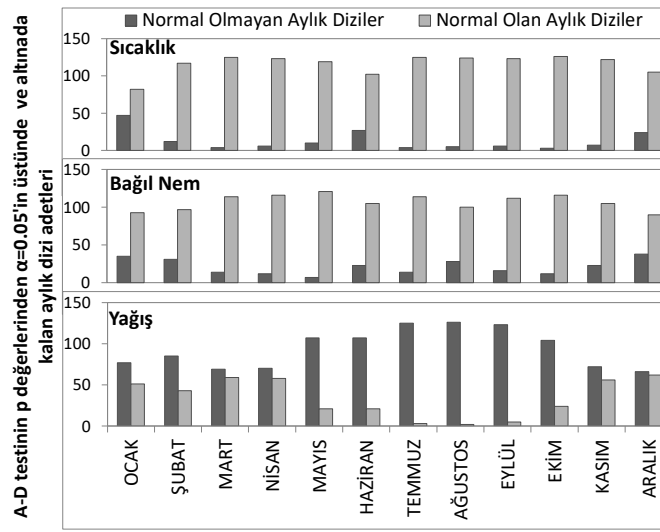


Şekil 1. Uluslararası kodlarıyla Türkiye'deki istasyonların coğrafi dağılımı.

Şekil 1’de 5 haneli istasyon kodlarının kullanıldığı haritada ortadaki hane istasyonun kuzey paralelleri ve doğu meridyenlerindeki coğrafi koordinatlarını göstermektedir. Veriler kesintisiz değildir. Eksik veri en çok 1960 öncesi zaman zarfında görülmektedir. Elimizde bulunan istasyonların Akdeniz ve Güneydoğu bölgelerinde eksik veri daha fazladır. Ölçümler sıcaklıkta [+34.8°C – (-21.3°C)], bağıl nemde [6.6%–98.5%], yağışta [0mm –907.2mm] aralığındadır. Aylık dizilerin eleman sayıları genellikle 45 – 87 arasına toplanmıştır. Bir dizide sıcaklık için en az 11, bağıl nem için en az 10 ve yağış için en az 7 eleman bulunur.

Anderson-Darling testine göre sıcaklık ve bağıl nem için normallik kabulü yapılabilirken yağış için tüm aylarda özellikle yaz aylarında sağa çarpık aylık dizilerin büyük oranda 0.05 anlamlılık seviyesinin altında kaldığı görülmüştür (Şekil 2).

Bu teste normal dağılımlı çıkmayan dizilerin daha esnek değerlendirmeye tabi tutmak amacıyla çarpıklık ve basıklık değerlerinin Çizelge 1’deki formüllerle hangi sınırlarda kaldığına bakılmıştır. Sıcaklık ve bağıl nem dizileri, çarpık veya basık görülmezken, yağış dizileri çarpık veya basık çıkmaya devam etmiştir.



Şekil 2. A-D sınavasının p değerine göre $\alpha=0.05$ 'in altında ve üstünde kalan dizi adetleri.

Bağıl nem ve yağışta çarpıklığın basıklığa göre daha çok normalden uzaklaştığı görülmüştür. Sıcaklık için genel olarak çarpık, basık veya sivri denecek istasyon sayısı yok denecek kadar azdır, bağıl nem için kış aylarında sola çarpık ve sivri istasyonlar olsa da bu sayıca azdır, yağış için kış aylarında daha az olmak üzere sağa çarpık ve sivrilik durumu gösteren istasyon sayısı oldukça fazladır.

Çizelge 1. Çarpıklık ve basıklık formülleri ve standart hatası.

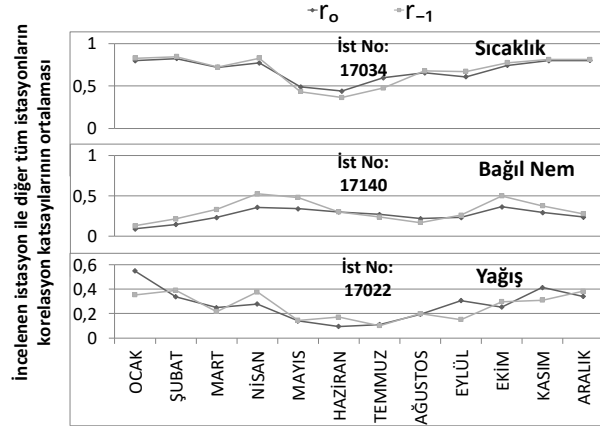
	Formül	Std Hata
Çarpıklık	$\frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum \left(\frac{x_j - \bar{x}}{s} \right)^3$	$\frac{\sqrt{6}}{\sqrt{N}}$
Basıklık	$\left\{ \frac{n(n+1)}{(n-1)(n-2)(n-3)} \sum \left(\frac{x_j - \bar{x}}{s} \right)^4 \right\} - \frac{3(n-1)^2}{(n-2)(n-3)}$	$\frac{\sqrt{24}}{\sqrt{N}}$

n: veri adeti; s: standart sapma

x_j: istasyon değeri; \bar{x} : istasyon ortalaması

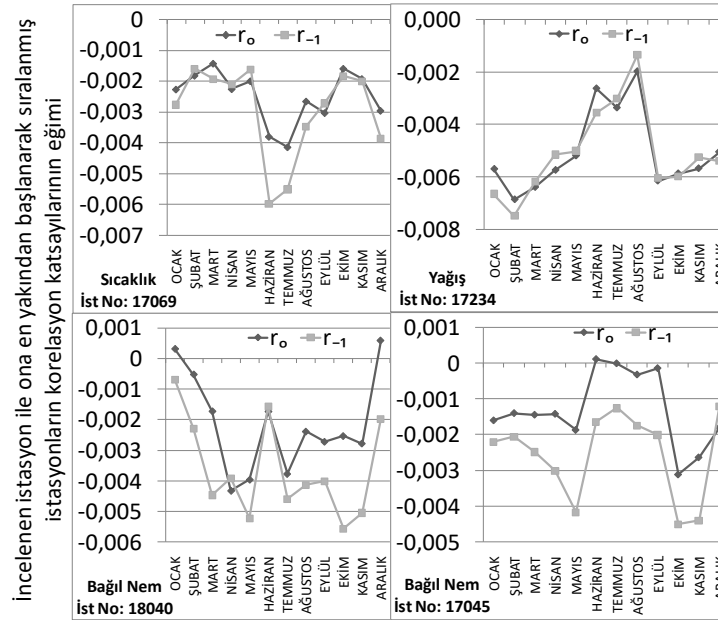
2.2 Korelasyon Katsayısı Değerlendirmesi

Sıcaklık ve yağış değişkeninde incelenen istasyon ile geriye kalan tüm istasyonların korelasyon katsayılarının ortalaması yazın kışa göre daha düşüktür. Bağıl nem değişkeninde korelasyon katsayılarının ortalaması bahar aylarında daha fazladır. Özetle miktar olarak düşük sıcaklık, yüksek yağış ve orta seviye bağıl nemde istasyonlar birbirleriyle daha çok benzerlik göstermiş, birbirleri arasındaki bağlar daha kuvvetli olmuştur. Şekil 3’deki örnek istasyonlarda gösterilen bu davranış sıcaklık için istasyonların %90’ında, bağıl nem için istasyonların %57’sinde ve yağış için istasyonların %75’inde görülmüştür.



Şekil 3. İncelenen istasyon ile geriye kalan tüm istasyonların korelasyon katsayılarının ortalaması.

Şekil 3’te r_0 doğrudan diziye uygulanan korelasyon katsayısıdır. r_{-1} ise 1. yıldaki gözlem 2.yıldan, 2. yıldaki gözlem 3. yıldan çıkarılarak sadece peş peşe yıllar arasındaki değişimleri gösteren ilk fark dizilerine uygulanan korelasyon katsayısıdır. Bu dizilerdeki ortalama veya varyans değişimi, değişim anındaki değerden itibaren



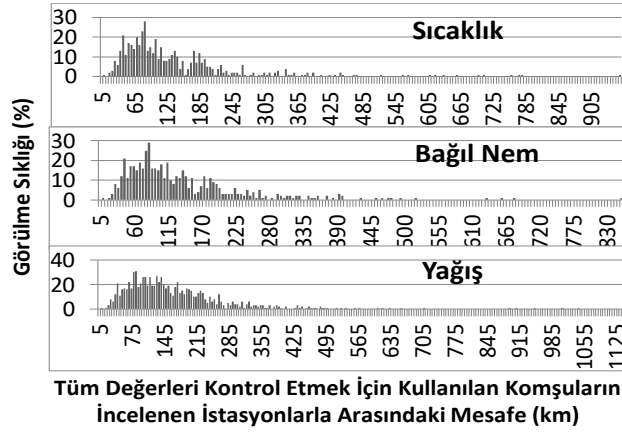
Şekil 4. İncelenen istasyon ile ona en yakından başlanarak sıralanmış geriye kalan tüm istasyonların korelasyon katsayılarının eğimi.

komşusuyla farklılaşmaya başlamaz, sadece yıllar arasındaki değişimler kıyaslanır, değişim anı ve sonrasındaki farklılaşma benzerliği etkilemez ve iki dizi arasındaki gerçek benzerlik ortaya çıkar diye düşünülmektedir [30].

Tüm değişkenler için mesafe arttıkça korelasyon katsayısı azalmıştır. Fakat bu azalış bazen daha geniş bir aralıkta bazen daha dar bir aralıkta olmuştur. İncelenen istasyon ile ona en yakından başlanarak sıralanmış geriye kalan tüm istasyonların korelasyon katsayılarının eğimi sıcaklık için istasyonların %60'ında kış aylarında yaz aylarına göre, yağış için istasyonların %45'inde yaz aylarında kış aylarına göre daha düşüktür. Bağıl nem için istasyonların %15'inde yaz aylarında kış aylarına göre, %15'inde kış aylarında yaz aylarına göre daha düşüktür. Şekil 4'te bu durumdaki istasyonlara benzer istasyonlar gösterilmiştir. Diğer istasyonlarda belirgin bir eğilim gözlenmemiştir.

2.3 İstasyon Dağılımının Değerlendirmesi

Çalışmada kullanılan istasyonların birbirlerine uzaklıkları çoğunlukla 30 – 200 km arasında olduğundan tüm değerlerin komşularıyla mesafelerinin %51'i 0 – 70 km arasında, %29'u 70 – 100 km arasında, %20'si 100 – (960 km - sıcaklık, 854 km - bağıl nem, 1154 km - yağış) arasındadır (Şekil 5).



Şekil 5. İncelenen istasyonla komşusu arasındaki mesafenin dağılımı.

3. Yöntem

3.1 Histogram ve Kutu Grafiği Yönteminin Kullanılma Biçimi

Sapan değerleri tespit etmek için sıcaklık ve bağıl nemde $\mu \pm 3\sigma$ (μ :ortalama, σ :standart sapma) sınırlarıyla histogram, yağışta $Q_{3,1} \pm 2IQR$ ve $Q_{3,1} \pm 4IQR$ ($Q_{3,1}$:üçüncü ve birinci çeyrek, $IQR:Q_3 - Q_1$ çeyrekler açıklığı) sınırlarıyla kutu grafiği yöntemi kullanılmıştır.

İncelenen toplam değer sayısı sıcaklıkta 92787, bağıl nemde 90506 ve yağışta 90618'dir. Literatüre göre komşu istasyonların sayısı 1 tane [31], 2 tane [32], 3 tane [33], 4 tane [32] veya 5 tane [34] olabilir. Üç değerlerle kıyas yapmamak için komşu sayısı ortalama bir değer olarak 3 seçilmiştir. Bu çalışmadaki komşu seçimi mekanizması şu şekilde kurulmuştur: İncelenen istasyondaki değer en yakın 3 komşusundaki karşı gelen değerle kıyaslanmış ve 3 komşuda sapan değer göstermişse bu değer sapan değer kabul edilmiş, herhangi biriyle sapan değer göstermemişse sapan olmadığı kabulü yapılmıştır. Ama herhangi bir (iki) komşusu eksik ama diğer iki (bir) komşusuyla da sapan değer göstermişse o zaman başka bir (iki) komşu ile kontrol edilmiştir. İncelemeler bazen komşuları münferit şekilde kullanarak, bazen komşulardan oluşturulan tek bir referans dizi kullanarak yapılır [24, 30]. 3 dizinin birleşiminden oluşan bir referans dizi seçilseydi, sapan değer kararı için sadece bu tek referans dizinin, incelenen değeri sapan değer göstermesi gerekirdi. Komşu olarak 3 münferit dizi seçildiğinden, üçünün de sapan değer göstermesinin gerekeceği düşünülmüştür. İncelenen istasyonun incelenen yılı için ilk üç komşunun hepsi eksik ise o zaman en yakın 4.komşuya ve sırayla devam eden şekilde diğer

komşulara başvurulmuştur. Dolayısıyla her değer en yakından başlamak üzere farklı komşu kombinasyonlarına sahip olabilir. Eğer değer, 129 istasyon içinde sadece bir/iki komşuyla çalışıyorsa bir/iki komşu ile değerlendirme yapılmıştır. Tüm değerler için kullanılan toplam komşu sayısı sıcaklıkta 233475, bağıl nemde 227831 ve yağışta 223401 olmuştur.

Komşuları seçerken yakınlık temel alındığında aynı zamanda homojen iklim bölgeleri de dikkate alınmış olmaz. Çünkü birbirine yakın iki istasyon farklı iklim bölgelerine düşebilir. İncelenen istasyonun iklim bölgesinin kıyaslanan komşuların iklim bölgeleriyle uyumluluğu için 6 ana iklim bölgesine sahip Aydeniz, De Martonne, Erinç ve Thornthwaite iklim sınıflandırmaları kullanılmıştır [35]. En yakın 1. ve 2. komşular tüm iklim sınıflandırmalarına göre çoğunlukla aynı iklim bölgesinde az bir miktarda (≈ 30) %80 benzer iklim bölgesinde, 3. komşular De Martonne sınıflandırması hariç diğerlerinde eşit miktarlarda aynı iklim bölgesinde ve %80 benzer iklim bölgesindedir. İlk üç komşu dışında kullanılan komşular Aydeniz iklim sınıflandırması hariç diğerlerinde eşit miktarlarda aynı iklim bölgesinde ve %80 benzer iklim bölgesindedir.

3.2 Komşu Seçiminde Korelasyon Katsayısının Değişimini İnceleyen Yöntemler

Komşu seçiminde Denklem 1'deki Pearson korelasyon katsayısının (r) etkisini gözlemlemek için onun mesafeye, zamanla ve sıcaklık, bağıl nem, yağış değişkenleriyle değişimleri incelenmiş, t -değerine göre kontrol edilmiştir. \bar{x} , \bar{y} : istasyon ortalamaları, x , y : istasyon değerleri, n : veri adetidir. Şekil 2'de gösterildiği gibi normal dağılımlı olan sıcaklık ve bağıl nem Denklem 1'deki Pearson korelasyon katsayısı ile incelenmiştir. Yağış önce excel'de rank.avg fonksiyonuyla sıralanmış sonra bu sıralamalar Denklem 1'deki aynı Pearson korelasyon katsayısı ile incelenmiştir. Spearman katsayısı olarak bilinen bu hesap yağış değişkeni Şekil 2'de gösterildiği gibi normal dağılımlı olmadığı için kullanılmıştır. Ölçülen değerler ve konumları ayrı ayrı değerlendirildiği için uzaysal otokorelasyon katsayısı değil, Pearson ve Spearman korelasyon katsayıları kullanılmıştır. Hem r_0 hem r_{-1} için hesaplanan sonuçlar benzer çıkmıştır. Korelasyon katsayısının güvenilirliğini denetlerken, otokorelasyon fonksiyonu grafiğine göre $\pm 2/\sqrt{n}$ sınırını aşmayan istasyon sayıları aşanlardan yüksek olduğundan dizilerde iç bağımlılık olmadığı kabul edilmiş ve etkin eleman yerine veri adeti kullanılmıştır.

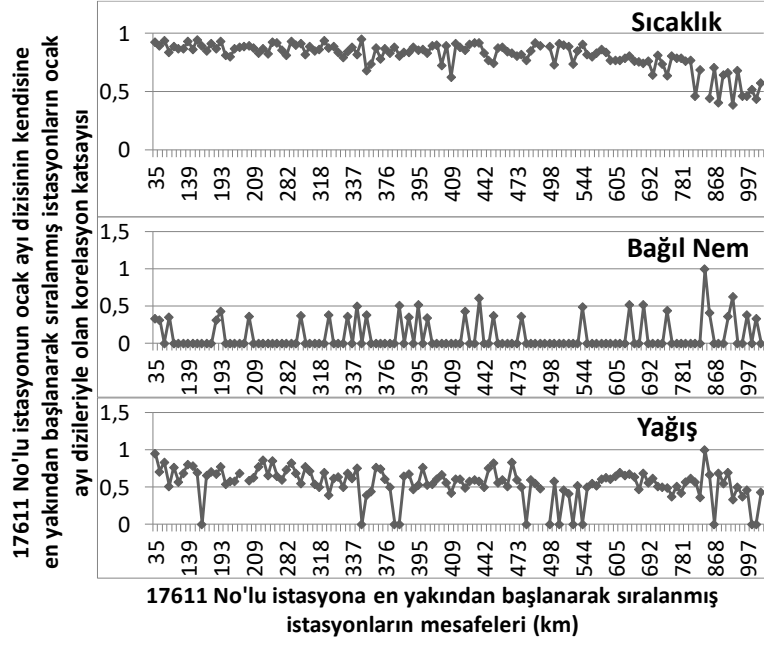
$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \quad t - \text{değeri} = \frac{abs(r)\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (1)$$

3.2.1 Korelasyon Katsayısının Mesafeye Göre Değişimini İnceleyen Yöntem

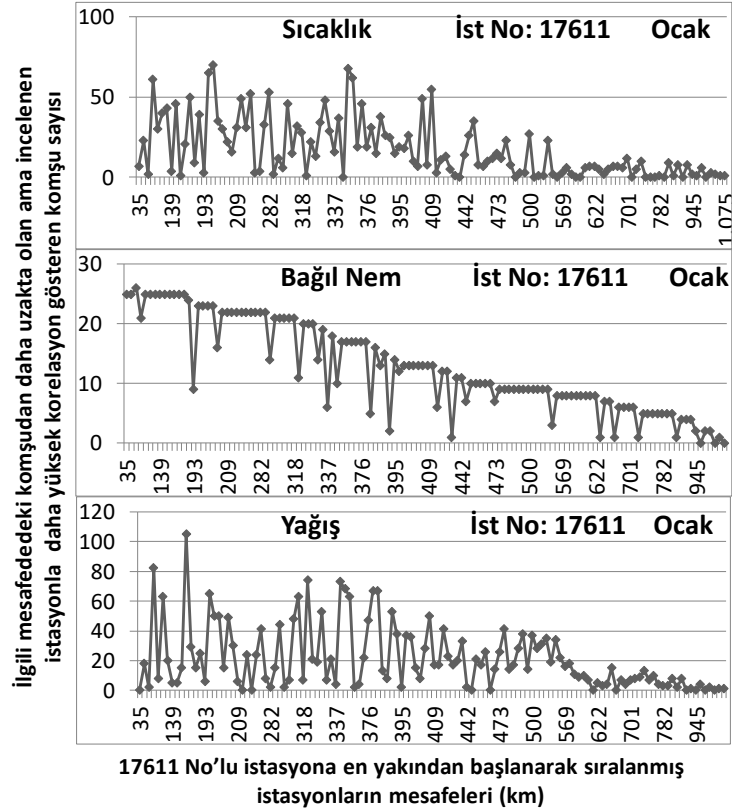
Çalışmada istasyonla komşusu arasındaki enlem boylam ve yükseklik kullanılarak hesaplanan Öklid uzaklığı kullanılmıştır [36]. Uzayda birbirine yakın verilerin, birbirinden uzak verilere göre benzer olma olasılığı daha yüksektir [8]. En yakın komşular yöntemindeki uzaklık algoritmalarından Öklid uzaklığı, uzaklık algoritmaları içinde en kısa mesafeyi hesaplandığı için kullanılmıştır [13]. Bir istasyonun komşusuyla arasındaki mesafe arttıkça aralarındaki korelasyon değişik seyirler takip etmiştir. Belli bir ortalama etrafında yaklaşık olarak sabit kalıp sonra düşmüş, sonra tekrar sabit gidip tekrar düşmüştür. Hiç düşme eğilimi göstermemiş sadece sabit bir seyir takip etmiştir. Hiç sabit kalmadan doğrudan düşme eğilimi göstermiştir. Düşüşler bazen hafif eğimle bazen dik eğimle meydana gelmiştir. Hangi durumda olursa olsun Şekil 6'deki örnek veride görüldüğü gibi mesafe arttıkça korelasyon birebir düşmediği için bir istasyona en yakın istasyon o istasyonla en yüksek korelasyonu gösterir denilemez.

Bir istasyonun komşusuyla arasındaki mesafe arttıkça o mesafedeki komşusundan daha yüksek korelasyon gösteren daha uzaktaki komşuların sayısı değişik seyirler takip etmiştir. Bazılarında önce belli bir ortalama etrafında sabit kalmış sonra yükselmiş ve sabit kalmış en sonunda doğal olarak düşmeye başlamıştır. Çünkü mesafe arttıkça istasyon sayıları da doğal olarak azalmıştır. Bazılarında önce belli bir ortalama etrafında sabit kalıp yükseldikten sonra tekrar sabit kalmadan düşmeye başlamıştır. Bazılarında önce sabit bir seyir takip edip sonra düşmüştür.

Bazılarında sadece düşüş eğilimi vardır herhangi bir kısmında sabit seyir yoktur. Bunlar hem r_0 hem de r_{-1} için geçerlidir. Şekil 7'deki örnek veride görüldüğü gibi hangi durumda olursa olsun mesafe arttıkça o mesafedeki komşusundan daha yüksek korelasyon gösteren daha uzaktaki istasyonların sayısı azalsa da başlangıçta dikkate alınır bir sayı değerine sahiptir.



Şekil 6. 17611 No'lu istasyona en yakından başlanarak sıralanmış istasyonların mutlak korelasyon katsayısı.

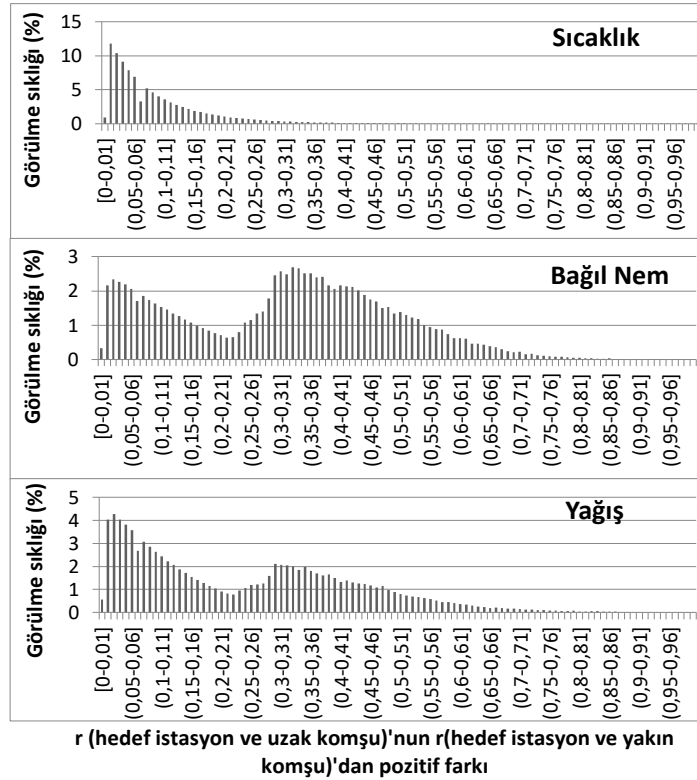


Şekil 7. 17611 No'lu istasyonun ilgili mesafesinden daha uzakta olan ama daha yüksek korelasyon gösteren istasyon sayısı.

Görüldüğü gibi incelenen istasyonun etrafındaki istasyonlarla mesafeleri arttıkça korelasyon katsayısının inişli çıkışlı bir seyir izlemesi nedeniyle zaman zaman uzak korelasyonların yakın korelasyonlardan fazla çıktığı gözlemlenmiştir. Önemli olan bu fazlalığın anlamlı olup olmadığıdır. Bu anlamlılığı belirlemek üzere bu farkların bir dağılımını oluşturmak ve bu dağılımın $Q_{3,1} \pm 2IQR$ içinde kalanlarını anlamsız kabul edip yeterince küçük olduğu için dikkate alınmayacağını, dışında kalanların ise yeterince büyük oldukları için anlamlı farklardan sayılacağını belirtmek amacıyla işlemler yapılmıştır.

Örneğin sıcaklık değişkeni için ocak ayında bir istasyonun 1.komşusundan daha uzaktaki komşuların hepsinin 1.komşusuyla olan korelasyon farkları yazılmıştır. Bu farklar hesaplanırken korelasyonların mutlak değeri alınmıştır. Bu işlem 2., 3. ve diğer tüm komşuları için ve diğer tüm aylar için yapılmıştır. Böylelikle 129 istasyonun her birinin 128 istasyonla teması vardır ve 127 adet fark en yakın 1.komşu için 126 fark en yakın 2.komşu için vs. olacak şekilde, bir istasyon için $126 \times 127/2$ adet fark hesaplanmıştır. Bu farklar 129 istasyon ve 12 ay için bulunmuştur. Ortaya çıkan $(126 \times 127/2) \times 129 \times 12$ fark içinde pozitif olanlarla bir dağılım oluşturulmuştur (Şekil 8).

Bu dağılım hem r_0 hem r_{-1} 'e uygulanmıştır. r_0 ve r_{-1} arası farklar Şekil 9'da görüldüğü gibi önce yüksek başlayıp sonra sifıra yaklaşan ama genel olarak çok küçük olan farklar olmuştur.



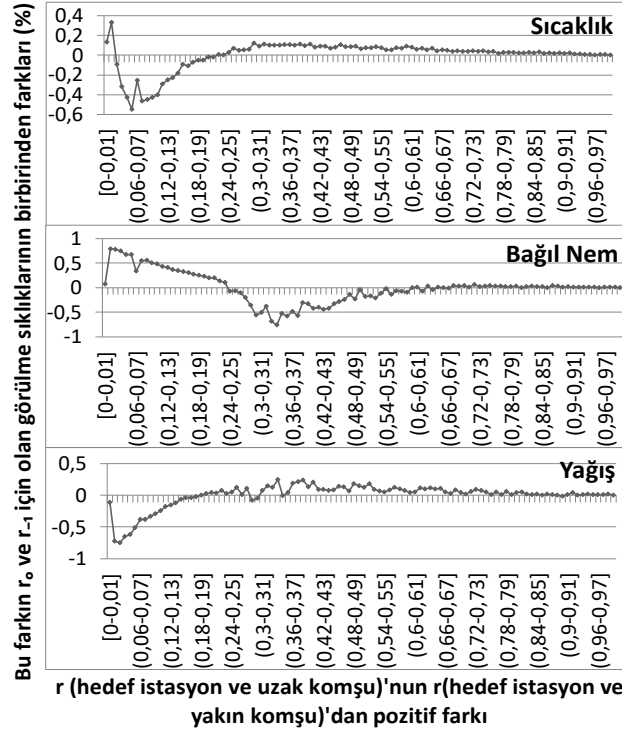
Şekil 8. 129 istasyonun 12 farklı ayda her 128 komşusu için $126 \times 127/2$ adet pozitif farkın görülme sıklığı.

Çarpık olan bu dağılımlarda $Q_{3,1} \pm 2IQR$ sınırlarını kullanarak bulunan eşiklere göre r_0 için sıcaklıkta 0,33, bağıl nemde 1,04, yağışta 0,97; r_{-1} için sıcaklıkta 0,39, bağıl nemde 1,09, yağışta 1,02 fark eşliğinin dışında kalan ve dolayısıyla anlamlı kabul edilen fark sayısı istasyondan istasyona değişmektedir.

3.2.2 Korelasyon Katsayısının Zamana Göre Değişimini İnceleyen Yöntem

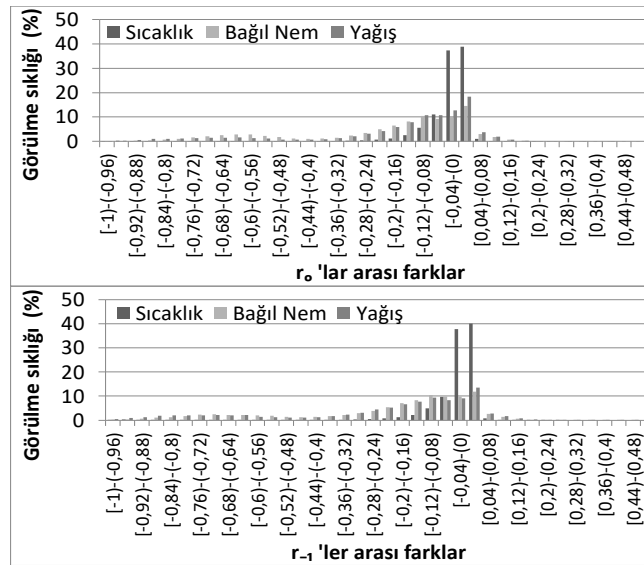
Her istasyonun her ay için benzerliğin yüksekliğine göre farklı bir komşusu olabilir. Bunun olabilirliğini göstermek için, her istasyonun her ay için benzerliğin yüksekliğine göre var olan komşusu diğer aylar için kullanıldığında oluşan farklardan bir dağılım oluşturulmuş ve bu dağılıma göre anlamlı farklar belirlenmiştir.

Örnek olarak 17611 no'lu istasyonun ocak ayındaki en yüksek korelasyonu gösteren 1.komşusu olan 17120 no'lu istasyon, şubat ayında 9. en yüksek korelasyonu gösteren komşudur. Bunun şubat ayındaki en yüksek



Şekil 9. r (hedef istasyon ve uzak komşu)'nun r(hedef istasyon ve yakın komşu)'dan pozitif farkının r_0 ve r_{-1} için olan görüme sıklıklarının birbirinden farkları (%).

korelasyonu gösteren 1.komşusu olan 17022 no'lu istasyonla arasındaki korelasyon farkı -0,02'dir. Yani ocak ayındaki en yüksek korelasyonu gösteren 1.komşu, şubat ayındaki en yüksek korelasyonu gösteren 1.komşu yerine kullanılsaydı -0,02 kadar fark oluşacaktı. Mart ayındaki en yüksek korelasyonu gösteren 1.komşu yerine



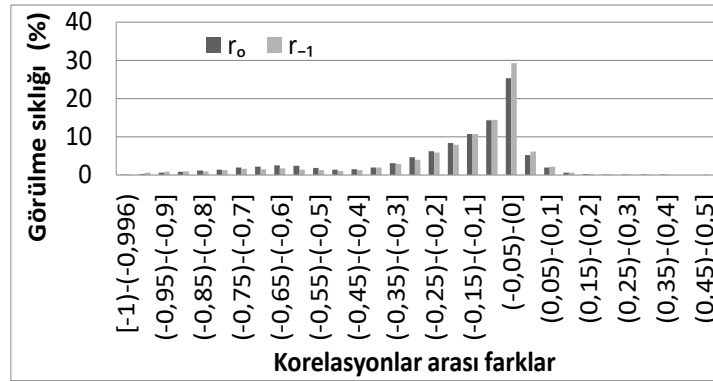
Şekil 10. Farklı aylarda korelasyon farklarının görüme sıklığı (%).

kullanılıyorsa -0,06 kadar fark oluşacaktı. Yani ocak ayındaki en yüksek korelasyonu gösteren 1.komşu için 11 adet fark çıkmıştır. Şubat ayında en yüksek korelasyonu gösteren 1.komşu tüm aylar için 1.komşu olarak kullanılırsa hepsinde gene 11 adet fark çıkar. Dolayısıyla bir istasyonun 1.komşusu için 11x12 fark meydana gelir. Dolayısıyla sıcaklık değişkeninde tüm istasyonlar için 129x11x12 fark meydana gelmiştir. Bu işlem en yakın 1., 2., 3., 4. ve 5. komşu için yapıldığında 11x12x129x5 adet fark oluşmuştur. Sıcaklıkta r_0 için +0,24 – (-0,996) ve r_{-1} için +0,27 – (-0,996) arası, bağıl nemde r_0 için +0,5 – (-0,99) ve r_{-1} için +0,47 – (-0,996) arası, yağışta r_0 için +0,4 – (-0,996) ve r_{-1} için +0,46 – (-0,996) arası farklar oluşmuş ve bunlar çarpık bir dağılım meydana getirmiştir (Şekil 10). $Q_{3,1} \pm 2IQR$ sınırlarına göre eşik değerler (r_0 için: sıcaklık: 0,08 – (-0,12), bağıl nem: 0,54 – (-0,86), yağış: 0,44 – (-0,66), r_{-1} için: sıcaklık: 0,08 – (-0,12), bağıl nem: 0,56 – (-0,94), yağış: 0,61 – (-0,99)) belirlendikten sonra anlamsız farklar çıkarılmıştır. Bu eşiklerin dışında kalan farklar anlamlıdır.

Bu farklardan bazıları pozitiftir çünkü örneğin 17661 no'lu istasyonun ocak ayında en yüksek 2. korelasyonu gösteren 17126 no'lu komşu haziran ayında en yüksek korelasyonu gösteren 1. komşudur ve en yüksek korelasyonu gösteren 17731 no'lu 2. komşudan daha büyük olduğu için fark pozitif çıkmıştır.

3.2.3 Korelasyon Katsayısının Değişkene Göre Değişimini İnceleyen Yöntem

Her istasyonun her değişken için benzerliğin yüksekliğine göre farklı bir komşusu olabilir. Bunun olabilirliğini göstermek için, her istasyonun her değişken için benzerliğin yüksekliğine göre var olan komşusu diğer değişkenler için kullanıldığında oluşan farklardan bir dağılım oluşturulmuş ve bu dağılıma göre anlamlı farklar belirlenmiştir.



Şekil 11. Değişkenler arası korelasyon farklarının görülme sıklığı (%).

Örnek olarak ocak ayında 17611 no'lu istasyonun sıcaklık değişkenindeki en yüksek korelasyonu gösteren 1.komşusu olan 17120 no'lu istasyon, bağıl nem değişkeninde 35. en yüksek korelasyonu gösteren komşudur. Bunun bağıl nem değişkenindeki en yüksek korelasyonu gösteren 1.komşusu olan 17780 no'lu istasyonla arasındaki korelasyon farkı -0,62'dir. Yani sıcaklık değişkeninde en yüksek korelasyonu gösteren 1.komşu bağıl nem değişkenindeki en yüksek korelasyonu gösteren 1.komşu yerine kullanılıyorsa -0,62 kadar fark oluşacaktı. Yağış değişkenindeki en yüksek korelasyonu gösteren 1.komşu yerine kullanılıyorsa -0,25 kadar fark oluşacaktı. Yani sıcaklık değişkenindeki en yüksek korelasyonu gösteren 1.komşu için 2 adet fark çıkar. Bağıl nem değişkeninde en yüksek korelasyonu gösteren 1.komşu tüm değişkenler için 1.komşu olarak kullanılırsa gene 2 adet fark çıkar. Dolayısıyla bir istasyonun 1.komşusu için 2x3 fark meydana gelir. Bu işlem tüm aylar, tüm istasyonlar ve en yakın 1., 2., 3., 4. ve 5. komşusu için yapıldığında 12x128x5x2x3 adet fark oluşmuştur. Bu farklar r_0 için +0,36 – (-0,996), r_{-1} için +0,45 – (-0,996) aralığındadır ve çarpık bir dağılım meydana getirmiştir (Şekil 11).

$Q_{3,1} \pm 2IQR$ sınırlarına göre eşik değerler (r_0 için: 0,46 – (-0,74), r_{-1} için: 0,41 – (-0,64)) belirlendikten sonra anlamsız farklar çıkarılır. Bu eşiklerin dışında kalan farklar anlamlıdır. Bu farklardan bazıları pozitiftir çünkü örneğin sıcaklık için 18040 no'lu istasyonun ocak ayında en yüksek 2. korelasyonu gösteren 17742 no'lu komşu yağışta en yüksek korelasyonu gösteren 1. komşudur ve en yüksek korelasyonu gösteren 17220 no'lu 2. komşudan daha büyük olduğu için fark pozitif çıkmıştır.

3.2.4 Korelasyon Katsayısının Dizinin Sapan Değer İçeriğine Göre Değişimini İnceleyen Yöntem

Korelasyonun sapan değerle değişimini göstermek için yukarıda anlatılan yöntemle sapan değer içerdiği tespit edilen istasyonların, kendi komşularıyla olan korelasyonları incelenmiştir. Sapan değer içeren dizinin komşusuyla korelasyonuna göre, sapan değer içermeyen dizinin komşusuyla korelasyonunun % kaçının fazla olduğunu tespit etmek için Denklem 2 kullanılmıştır.

$$r_{\text{fark}} = \frac{100 \times (r_{\text{sapan_değersiz_dizi}} - r_{\text{sapan_değerli_dizi}})}{r_{\text{sapan_değersiz_dizi}}} \quad (2)$$

4. Bulgular ve Tartışma

Bulgular iki aşamalı tartışılabilir. Yakınlığa göre komşu seçildiğinde veri eksikliğinden dolayı daha uzak komşulara başvurulduğu için güvenilirlik düşer ve uzaktaki komşunun korelasyonunun daha fazla olduğu durumlar olur. Benzerliğe göre komşu seçildiğinde komşular zamana, değışkene ve sapan değer içeriklerine göre farklılaşır.

4.1 Mesafeye Göre Komşu Seçiminin Değerlendirilmesi

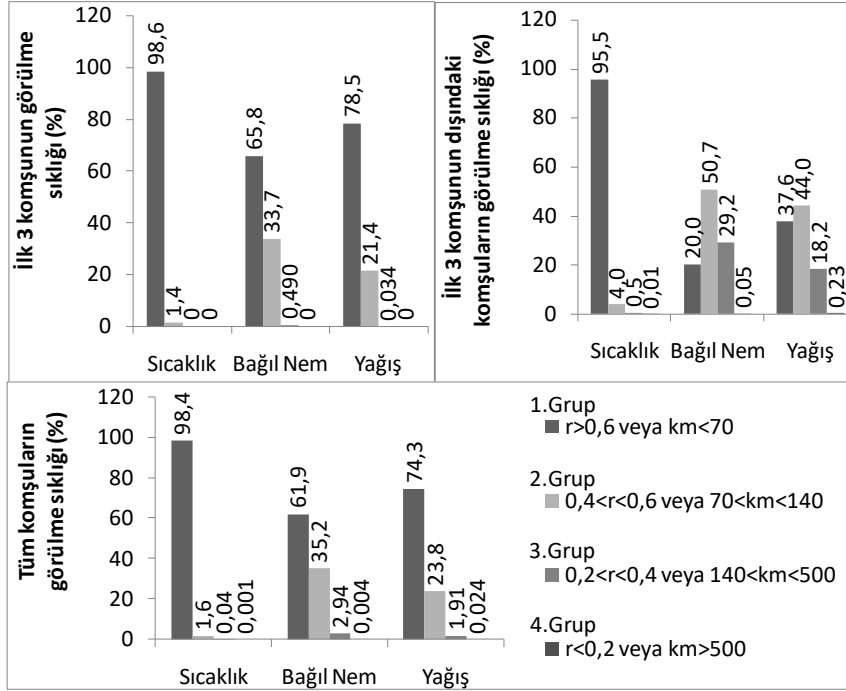
4.1.1 Uzak Komşulara Başvurulmasının ve Güvenilirliğin Düşmesinin Değerlendirilmesi

Belli bir yılın belli bir ayındaki bir dizinin her elemanının aynı yılın aynı ayındaki başka en az bir dizinin karşı gelen elemanı ile çakışması gerekir ki bir dizinin tüm elemanları kontrol edilebilsin. Sıcaklık değışkeninde en az 2 en çok 128 kez çakışmıştır. Fakat yağışta 11, bağıl nemde 16 tane değer diğeri istasyonlarda aynı zamandaki başka bir değerle çakışmamış dolayısıyla kontrol edilememiştir. Kontrol edilebilen değerlerin en yakın 3 komşusunun 3'ünde de veri olmaması ve diğeri sapan değer vermesi koşuluyla 1'inde ya da 2'sinde veri olmaması ve diğeri komşulara başvurulma durumu sıcaklık için 72, bağıl nem için 85, yağış için 115 istasyonda görülmüştür. Bu, verilerin sıcaklık için %7,4'üne (6840/92787), bağıl nem için %7,2'sine (6493/90506) ve yağış için %8,6'sına (7375/85495) (temmuz, ağustos, eylül için sıfır yağış kayıtları mevcut değilken, sıfır yağış kayıtları mevcutken 7375/90618) denk gelmiştir.

En yakın üç komşu ile incelenen istasyon arasındaki mesafe %56 (sıcaklık - 118569/213000), %55 (bağıl nem - 114464/208403), %54 (yağış - 103323/190879 (temmuz, ağustos, eylülde sıfır yağışlar kayıt yok olarak değıştirilmiş)) oranında 70 km'nin içindedir, ama veri eksikliğinden dolayı kullanılmak zorunda kalınan daha uzaktaki istasyonlarda bu oran %4,4'e (sıcaklık - 897/20475), %4,5'e (bağıl nem - 880/19428), %6,4'e (yağış - 1414/22097 (temmuz, ağustos, eylülde sıfır yağışlar kayıt yok olarak değıştirilmiş)) düşmüştür. Bu güvenilirlik düşüklüğü korelasyonu da hesaba katan bir gruplama metoduyla gösterilmiştir.

İncelenen istasyonla 70 km'den az bir mesafede veya 0,6'ten daha yüksek bir korelasyona sahip komşular birinci güvenilir grup, incelenen istasyonla 70 km'den fazla ama 140 km'den az bir mesafede veya 0,6'tan daha düşük ama 0,4'ten yüksek bir korelasyona sahip komşular ikinci güvenilir grup, incelenen istasyonla 140 km'den fazla ama 500 km'den az bir mesafede veya 0,4'tan daha düşük ama 0,2'ten yüksek bir korelasyona sahip komşular üçüncü güvenilir grup ve geri kalan incelenen istasyonla 500 km'den fazla bir mesafede veya 0,2'ten yüksek bir korelasyona sahip komşular dördüncü güvenilir grup olarak ayarlanmıştır. İlk grup, istasyonlar arası mesafede 70 km'nin kullanıldığı [37] ve hidrolojide 0,6'dan büyük korelasyon katsayılarının genellikle anlamlı bir bağımlılık ifade ettiği kabulünün yapıldığı [38] komşularda dikkate alınarak güvenilir kabul edilmiştir. İkinci grup ilk gruba yakın olduğu için yaklaşık olarak kabul edilmiştir. Son iki grup ise güvenilirliği düşük kabul edilmiştir.

r_{-1} , r_0 'dan en yakın 3 komşunun, sıcaklığın %90'ında %0 – 10 kadar, bağıl nemin %88'inde %10 – 50 kadar, yağışın %45'inde %0 – 50 kadar daha fazla çıkmıştır. Dolayısıyla sıcaklık ve bağıl nem değışkeninde grup belirleme işlemleri r_0 ile değil r_{-1} ile yapılırca, daha yüksek güvenilirlikli gruplarda olan istasyon sayıları artmıştır. Yağış değışkeninde ise tam tersi bir durum vardır. Dolayısıyla yağış değışkeni r_{-1} ile yapılırca Şekil 12'de görülen güvenilir olmayan yani 3. ve 4. gruplara giren istasyon miktarı biraz daha artmıştır.



Şekil 12. Komşuların güvenilirliğini belirten grupların görülme sıklığı.

En yakın 3 komşuda düşük güvenilirlikli gruplar sıcaklık değişkeni için yoktur, bağıl nem değişkeni için %0,5 ve yağış değişkeni için %0,03'dir. En yakın 3 komşuda veri olmayan ve diğer yakın komşulara başvuru durumlarda düşük güvenilirlikli gruplar sıcaklık değişkeni için %0,51, bağıl nem değişkeni için %29,25 ve yağış değişkeni için %18,43'tir. Toplamda kullanılan tüm komşularda düşük güvenilirlikli gruplar sıcaklık değişkeni için %0,041, bağıl nem değişkeni için %2,94 ve yağış değişkeni için %1,93'tür (Şekil 12). Dolayısıyla sapan değerleri tespit etmek için kullanılan komşuların yaklaşık %0,04'ü, (sıcaklık için), %3'ü, (bağıl nem için) ve %2'si (yağış için) güvenilirliği düşük komşulardır.

4.1.2 Uzaktaki Komşuların Daha Yüksek Korelasyon Göstermesinin Değerlendirilmesi

En yakın 1., 2., 3., 4. ve 5 komşudan daha yüksek korelasyon gösteren anlamlı istasyon sayısı sırasıyla sıcaklık için 8, 11, 18, 20 ve 19 (r_{-1} için: 5, 9, 15, 22 ve 18)'dur, bağıl nem için tüm farklar anlamsızlık sınırlarının içinde kalmıştır, yağış için 0, 2, 1, 2 ve 3 (r_{-1} için tüm farklar anlamsızlık sınırlarının içinde kalmıştır)'tür. Örneğin sıcaklık için 17120 no'lu istasyonun dışında kalan 128 adet istasyon mayıs, haziran, ağustos ve eylül aylarında toplam 18 defa 17120 no'lu istasyonun 1.komşusundan daha yüksek korelasyon göstermiştir. 17673 no'lu istasyonun dışında kalan 128 adet istasyon mart, mayıs, haziran, temmuz, ağustos ve eylül aylarında toplam 488 defa 17673 no'lu istasyonun 3.komşusundan daha yüksek korelasyon göstermiştir.

Özetle Çizelge 2'de görüldüğü gibi sıcaklık ve yağış değişkeni için ilk 5 komşunun korelasyon katsayısı farklı aylarda farklı istasyonlarda değişik defalar daha uzak istasyonların korelasyon katsayısından düşük kalmıştır. Sıcaklık değişkeninde 1548 dizide (129 istasyon x 12 ay) ilk 5 komşu için sırasıyla 11, 19, 42, 42, 43 (r_{-1} için: 6, 14, 30, 37 ve 35) defa yani %1 ila %3 arasında daha uzak komşular ilk 5 komşunun yerine geçebilecek durumdadır. Yağış değişkeninde 1536 dizide (128 istasyon x 12 ay) ilk 5 komşu için sırasıyla 0, 3, 1, 3, 4 defa yani %0,1 ila %0,3 arasında daha uzak komşular ilk 5 komşunun yerine geçebilecek durumdadır. Özetle yakınlığı kullanarak komşu seçildiğinde ilk komşulardan anlamlı olarak daha yüksek korelasyon gösteren komşuların daha uzak komşular olduğunu görülmektedir.

Çizelge 2. En yakın 5 komşu ile olan r₀'ın daha uzak komşularla olan r₀'dan düşük olduğu durumlar.

Sıcaklık	Mesafeye göre en yakın komşular	İncelenen İstasyon No	İncelenen İstasyon Ay											İlk 5 komşu daha uzak komşuların katından daha az korelasyon gösterir			
			OCAK	ŞUBAT	MART	NİSAN	MAYIS	HAZİRAN	TEMMUZ	AĞUSTOS	EYLÜL	EKİM	KASIM		ARALIK		
SICAKLIK	1.KOMŞU	17827															4
		17881				X											2
		17040						X									1
		17119								X							14
		17120				X	X				X	X					18
		17188										X					123
		17682				X											1
	17882												X			3	
	2.KOMŞU	17827											X				4
		17040				X											1
		17045					X	X	X	X	X						48
		17066				X											10
		17237											X				118
		17238											X				1
		17240											X				16
		17300								X	X						2
		17320				X	X										8
		17355				X											1
		17954				X	X	X	X	X							67
	3.KOMŞU	17663				X	X	X	X	X							252
		17661				X											1
		17673			X	X	X	X	X	X							488
		17827											X				4
		17863											X				1
		17881		X		X											8
		17022		X		X											6
		17034			X												4
		17045					X										9
		17061				X					X						115
		17069			X	X		X									14
		17119			X	X		X									83
17300					X	X										3	
17330				X	X	X										8	
17692				X	X											6	
17906				X												1	
17954				X	X	X	X	X	X	X	X	X				215	
17062											X				114		
Sıcaklık	4.KOMŞU	17611															7
		17663															53
		17661						X	X	X							275
		17827															4
		17024					X	X									6
		17030							X								3
		17034					X	X	X								27
		17040				X	X	X	X	X		X					212
		17045									X						53
		17088					X										5
		17089										X					1
	17096				X	X	X	X	X							68	
	17097										X					1	
	17114											X				26	
	17116				X	X		X	X			X				104	
	17239											X				89	
	17246						X	X	X							67	
	17300						X	X	X	X						8	
	17748									X		X				116	
	17954										X					6	
	5.KOMŞU	17663			X		X	X	X		X						471
		18040							X		X						201
		17827												X			4
		17863												X			2
		17022					X	X									6
		17033						X									2
		17040					X	X	X								3
17061						X	X	X	X							34	
17238						X	X	X								78	
17244									X		X					13	
17300						X	X	X								56	
17330									X	X						2	
17340											X					1	
17355							X									1	
17820				X		X										19	
17860												X				111	
17882											X				6		
17954				X	X	X	X	X	X						309		
17062				X	X		X	X							59		
Yağış	2.KOMŞU	17827												X		1	
		17746		X											X		2
	3.KOMŞU	17827													X		1
		17827										X	X				3
	5.KOMŞU	17123								X							1
		17731								X							1
		17827										X	X				3
17126											X				1		

4.2 Benzerliğe Göre Komşu Seçiminin Değerlendirilmesi

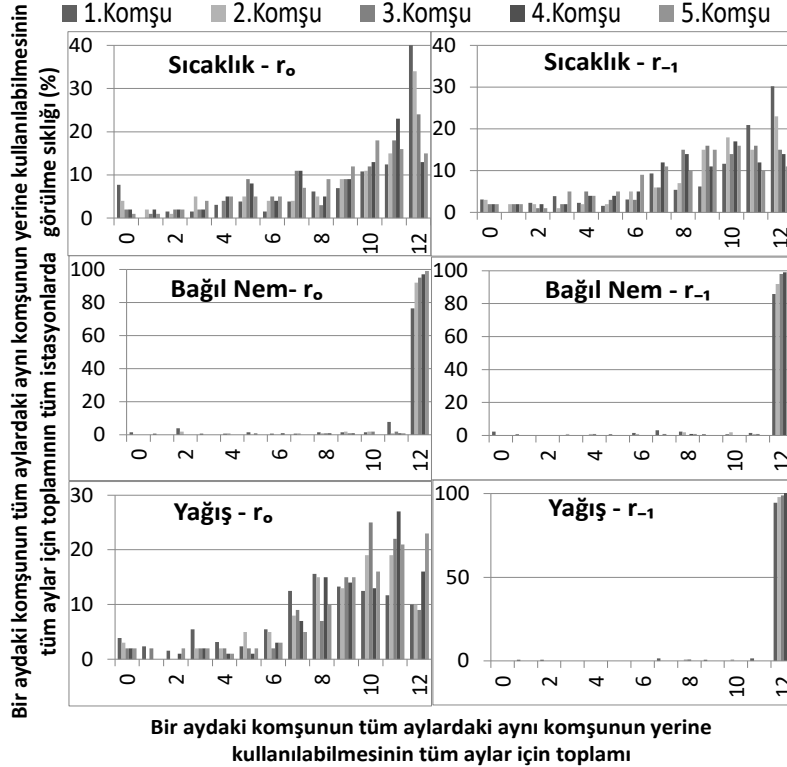
4.2.1 Benzerliğin Zamanla Birlikte Değişiminin Değerlendirilmesi

Korelasyon katsayısının yüksekliğine göre komşu seçildiğinde istasyonların sıcaklık için %40'ında, bağıl nem için %76,5'inde ve yağış için %10'unda herhangi bir aydaki 1.komşu tüm ayları temsil edebilir. 2. ve 3. komşuda bu oranlar düşmüştür.

Ama istasyonların sıcaklık için %8'inde, bağıl nem için %1,6'sında ve yağış için %4'ünde her ayın sadece kendi 1.komşusu o ay için kullanılabilir. 2. ve 3. komşuda sıcaklık için bu oran düşmüş, diğerleri için yükselmiştir. İstasyonların sıcaklık için %52'sinde, bağıl nem için %21,9'unda ve yağış için %86'sında belli

aylardaki 1.komşular tüm ayları temsil edebilir ama bunun hangi aylardaki komşular olduğu belirlenmelidir. 2. ve 3. komşuda sıcaklık için bu oran yükselmiş, bağıl nem için tamamen, yağış için büyük çoğunlukla düşmüştür. Sıcaklık ve bağıl nem değişkeninde r_0 ve r_{-1} birbirine yakın çıkar ama yağış değişkeninde belirgin bir fark gözlemlenmiştir (Şekil 13).

Yağış değişkeninde r_{-1} r_0 'a göre daha düşük çıkmıştır ve anlamsız korelasyonlar daha fazladır. Dolayısıyla yağış değişkeninin r_{-1} 'de anlamsız korelasyonların daha fazla olması korelasyonlar arası farkların daha yüksek çıkmasına neden olmuştur. Daha yüksek farklar, farkların dağılımındaki sınırları daha yukarı çekmiş ve böylece anlamlı olan sınırların dışındaki farklar azalmıştır. Çoğu fark anlamsız kabul edileceğinden bir istasyon için herhangi bir aydaki komşu diğer aylar için kullanılabilir olmuştur.



Şekil 13. Bir aydaki komşunun tüm aylardaki aynı komşunun yerine kullanılabilmesinin tüm aylar için toplamının tüm istasyonlarda görülme sıklığı (%).

Hesaplar r_{-1} 'e göre yapıldığında istasyonların sıcaklık için %30'unda, bağıl nem için %86'sında ve yağış için %94,5'inde herhangi bir aydaki 1. komşu tüm ayları temsil edebilir. 2. ve 3. komşuda bu oranlar düşmüştür. Ama istasyonların sıcaklık için %3'ünde, bağıl nem için %2,3'ünde ve yağış için %0'ında her ayın sadece kendi 1. komşusu o ay için kullanılabilir. 2. ve 3. komşuda sıcaklık için bu oran düşmüş, bağıl nem ve yağış için yükselmiştir. İstasyonların sıcaklık için %67'sinde, bağıl nem için %11,7'sinde ve yağış için %5,5'inde belli aylardaki 1.komşular tüm ayları temsil edebilir ama bunun hangi aylardaki komşular olduğu belirlenmelidir. 2. ve 3. komşuda sıcaklık için bu oran yükselmiş, bağıl nem ve yağış için düşmüştür (Şekil 13).

Şekil 3'te açıklandığı gibi tüm değişkenlerde, incelenen istasyon ile geriye kalan tüm istasyonların korelasyon katsayılarının ortalaması aydan aya değişmiştir. Şekil 13'teki aylık değişim de bu sonucu doğrulamaktadır.

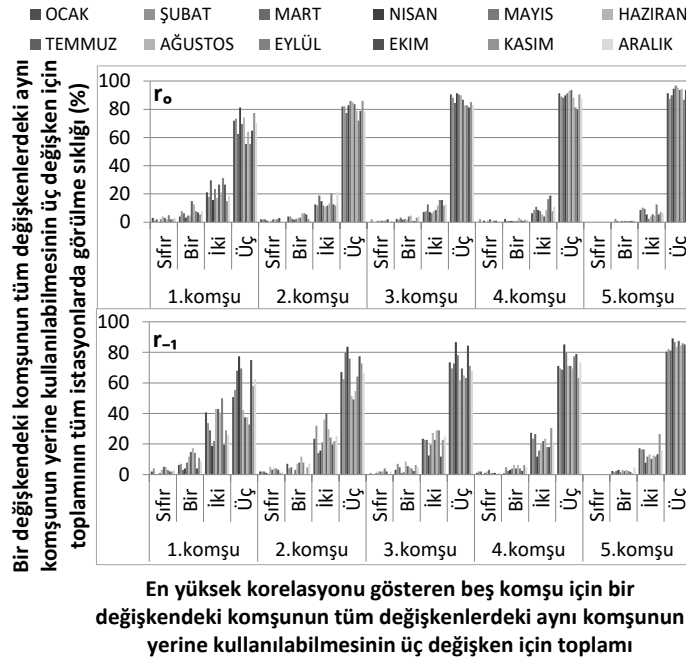
Şekil 4'te incelenen istasyon ile ona en yakından başlanarak sıralanmış istasyonların korelasyon katsayılarının eğimi kışın sıcaklıkta düşük, yağışta yüksektir. Yani uzaktaki komşulara doğru korelasyonun düşüşü kışın yağışta sıcaklığa göre fazladır. Bu durumla uyumlu olarak Şekil 13'te bir aydaki komşunun başka aylar için kullanılmaması uzaklara gidildikçe yağışta sıcaklığa göre daha fazla artmış; tam tersi olarak da birkaç aydaki komşunun tüm aylar için kullanılabilmesi uzaklara gidildikçe yağışta sıcaklığa göre daha fazla azalmıştır.

Bir aydaki komşunun tüm aylar için kullanılması zor denk gelebilecek bir durum olduğu için tüm aylarda uzak komşularda daha az görülmesi Şekil 4 ile çelişmez.

4.2.2 Benzerliğin Değişkenle Birlikte Değişiminin Değerlendirilmesi

Tüm ayların ortalaması olarak düşünüldüğünde, istasyonların 1.komşu için %68'inde, 2.komşu için %81'inde, 3.komşu için %86'inde, 4.komşu için %89'unda ve 5.komşu için %93'sinde [r_{-1} : 1.komşu için %56, 2.komşu için %67, 3.komşu için %72, 4.komşu için %73, 5.komşu için %83] herhangi bir değişkendeki komşu tüm değişkenlerde aynı komşu yerine kullanılabilir. 2. ve 3.komşuda bu oran düşmüştür.

İstasyonların 1.komşu için %2,4'ünde, 2.komşu için %1,4'ünde, 3.komşu için %0,8'inde ve 4.komşu için %0,7'sinde [r_{-1} : 1.komşu için %2,5; 2.komşu için %2,4; 3. ve 4. komşu için %1,3] tek bir değişkendeki komşu sadece kendi değişkeni için kullanılabilir. 2. ve 3. komşuda bu oranlar yükselmiştir. İstasyonların 1.komşu için %29'unda, 2.komşu için %18'inde, 3.komşu için %13'ünde, 4.komşu için %11'inde ve 5.komşu için %8'inde [r_{-1} : 1.komşu için %42, 2.komşu için %31, 3.komşu için %27, 4.komşu için %26 ve 5.komşu için %17] herhangi bir ya da iki değişkendeki komşu tüm değişkenlerde aynı komşu yerine kullanılabilir. Ama bu bir ya da iki değişkenin bu üç değişkenden hangisi olduğunu belirlemek gerekir. 2. ve 3. komşuda bu oranlar düşmüştür (Şekil 14).



Şekil 14. Üç değişkende, kendileri dışındaki değişkenlerdeki en yüksek korelasyonu gösteren ilk beş komşu yerine kullanılabilir komşu sayısının görülme sıklığı (%).

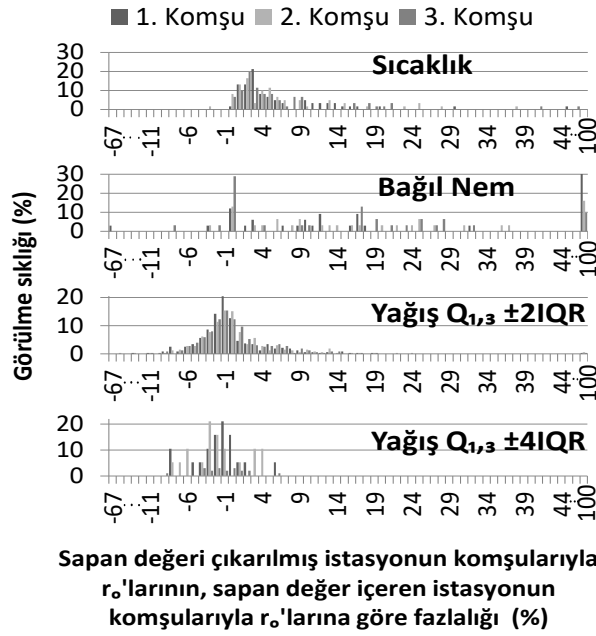
4.2.3 Benzerliğin Sapan Değerle Birlikte Değişiminin Değerlendirilmesi

$\mu \pm 3\sigma$ sınırlarının dışında kalmış sapan değerler sıcaklık değişkeni için 19, bağıl nem değişkeni için 26, yağış değişkeni için $Q_{3,1} \pm 4IQR$ sınırlarına göre 19, $Q_{3,1} \pm 2IQR$ sınırlarına göre 231 adettir.

Tespit edilen sapan değerleri çıkarılmış istasyonların komşularıyla korelasyonları, bunların çıkarılmadığı istasyonların komşularıyla korelasyonundan sıcaklıkta çoğunlukla %1 - 5 daha fazladır, az bir kısmı (%3) değişmez, daha az bir kısmı %1 daha azdır. Bağıl nemde bir kısmında (%18) değişmez, çoğunlukla %1 - 36 daha fazladır, çok az (%5,5) bir kısmında %67'ye kadar yükselen bir azalma görülmüştür. Bunun yanında sapan değer dizideyken komşularıyla korelasyonları anlamsız çıktığı için sıfır kabul edilen istasyonlar, sapan değer

çıkarılınca anlamlı çıkmaya başladıkları için, istasyonların %18'inde sapan değeri çıkarılmış istasyonun komşularıyla korelasyonları %100 daha fazla çıkmıştır.

Yağışta bir kısmında ($Q_{3,1} \pm 2IQR$ için %13, $Q_{3,1} \pm 4IQR$ için %11) değişmez $Q_{3,1} \pm 2IQR$ için üçte birinde $Q_{3,1} \pm 4IQR$ için dörtte birinde %1- 10 olan bir artış, yarısından çoğunda ($Q_{3,1} \pm 2IQR$ için %54, $Q_{3,1} \pm 4IQR$ için %67) %15'e kadar inen ama çoğunlukla %1-5 olan bir azalma vardır (Şekil 15). Az miktar bağıl nemde ve büyük çoğunlukta yağışta gözlemlenen sapan değer içeren istasyonun komşularıyla korelasyonlarının, sapan değeri çıkarılmış istasyonun komşularıyla korelasyonlarından %1 - 10 daha fazla olmasının sebebi çarpıklığa bağlanabilir. Çarpık istasyon sayısı, bağıl nemde az, yağışta çoktur. Sapan değer çıkarılmasının olumsuz etki etmesi durumu bu durumla paralellik gösterdiğinden birbiriyle ilgili olması beklenebilir.



Şekil 15. Sapan değeri çıkarılmış istasyonun komşularıyla korelasyonlarının, sapan değer içeren istasyonun komşularıyla korelasyonlarına göre fazlalığının görülme sıklığı (%).

5. Sonuç

Bu çalışmada k-en yakın komşular yöntemi ile komşu seçiminin kriterleri bu yöntemin en bilindik zorluğu olan k'nın miktarıyla değil [12], k sabit alındığında ortaya çıkan diğer problemler üzerinden değerlendirilmiştir.

Türkiye geneline yayılmış 129 meteoroloji istasyonundaki 3 farklı değişkenin her biri için 129x12 tane aylık dizinin, 87 yıllık zaman içinde 273,911 adet değerinin her birine 1, 2 veya 3 komşu karşılık gelecek şekilde 684,707 komşu kullanılarak ortaya çıkarılan problemlerden birincisi k-en yakın komşular yönteminde yakınlığa göre komşu seçildiğinde tüm tarihlerde her istasyonda veri bulunmadığından daha uzaktaki komşulara başvurulması dolayısıyla tüm komşuların %0,04 - %3'ünün incelenen istasyon ile mesafesinin 140 km'yi aşarak ve korelasyonunun 0,4'ün altına düşerek güvenilirliğin gerilemesidir.

İkinci problem, k-en yakın komşular yönteminde yakınlığa ve benzerliğe göre iki farklı şekilde seçilebilen komşular, yakınlığa göre seçildiğinde benzerliğe göre çelişki oluşturmaktadır. İncelenen dizilerin %0,1 - 3'ünde en yakın 5 komşudan daha uzak olan komşular daha yüksek korelasyon gösterdiğinden bunların yakınlığa göre mi korelasyona göre mi seçilmesi gerektiği belirsizdir.

Komşular benzerliğe yani korelasyon katsayısının yüksekliğine göre seçildiğinde ise istasyonların %2 - %8'inde her ayın sadece kendi 1.komşusu o ay için kullanılabilir. İstasyonların %25 - %86'sında belli aylardaki 1. komşular tüm ayları temsil edebilir ama bunun hangi aylardaki komşular olduğu belirlenmelidir. Aynı şekilde istasyonların %2,5'inde her değişkenin sadece kendi 1. komşusu o değişken için kullanılabilir. İstasyonların %29'unda belli değişkenlerdeki 1. komşular tüm değişkenleri temsil edebilir ama bunun hangi değişkenlerdeki

komşular olduğu belirlenmelidir. Tüm durumlar için 2. ve 3. komşularda bu oranlar değişmektedir. Görüldüğü gibi komşular k-en yakın komşular yönteminde komşular benzerlik ölçütüne göre seçildiğinde sabit komşular bulmak yerine değişkene ve aylara göre değişen komşular belirlemek gerekir. Ayrıca istasyonlar sapan değer barındırdıkları için korelasyon katsayısı sapan değersiz dizilerde çoğunda %1- 36 daha fazla, bazısında %1-5 daha az çıkmıştır.

Sonuç olarak diğer çalışmalarda korelasyon mesafe ile düşen bir katsayı olarak görülmüş [7, 24], ve bu düşüşün birebir olmayışıyla ilgilenilmemiştir. Fakat bu çalışmada genel düşüş içinde zaman zaman yükselen korelasyonların incelenmesiyle, uzaktaki komşuların yakındaki komşulardan anlamlı olarak yüksek korelasyona sahip olabileceği gösterilmiştir. Ayrıca diğer çalışmalarda komşu istasyon seçimlerinde bir korelasyon katsayısı aylık dizilerin hepsini temsil etmiştir [24]. Fakat bu çalışmada, korelasyon katsayısına bağlı komşu istasyon seçiminde farklı ayların ve farklı değişkenlerin anlamlı olarak farklı komşulara sahip olabileceği gösterilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma, birinci yazarın ikinci yazar danışmanlığında hazırladığı doktora tezi esas alınarak üretilmiştir. Tez çalışmasına katkıda bulunan jüri üyeleri Prof. Dr. Ercan Kahya'ya ve Prof. Dr. C. Melek KazezyılmazAlhan'a teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] Çubukçu, A., Demir, V., & Sevimli, M. F. (2019). Türkiye'nin uzun vadeli aylık sıcaklıklarının yapay sinir ağlarıyla tahmin edilmesi. 10. Ulusal Hidroloji Kongresi (p. 871). Muğla: Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi.
- [2] Teegavarapu, R. S. (2013). Statistical corrections of spatially interpolated missing precipitation data estimates. *Hydrological Process*, 3789-3808.
- [3] Raghunath, H. M. (2006). *Hydrology principles, analysis, design*. 4835/24, Ansari Road, Daryaganj, New Delhi - 110002: New Age International (P) Ltd.
- [4] Rafii, F., & Kechadi, T. (2019). Collection of Historical Weather Data: Issues with Missing Values. the 4th international conference on smart city applications, (pp. 1-8).
- [5] Teegavarapu, R. S. (2012). Spatial interpolation using nonlinear mathematical programming models for estimation of missing precipitation records. *Hydrological Science Journal*, 383 - 406.
- [6] Karagiannidis, A. F., & Feidas, H. (2014). Comparison of six spatial interpolation methods for the estimation of missing daily temperature and precipitation data. 12th Pan-Hellenic and International Conference on Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics.
- [7] Teegavarapu, R. S. (2007). Use of universal function approximation in variance-dependent interpolation method: An application in Hydrology. *Journal of Hydrology*, 332: 16 - 29.
- [8] O'Sullivan, D., & Unwin, D. (2010). *Geographical Information Analysis*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- [9] Teegavarapu, R. S. (2009). Estimation of missing precipitation records integrating surface interpolation techniques and spatio-temporal association rules. *Journal of Hydroinformatics*, 11(2), 133-146.
- [10] Ahrens, B. (2006). Distance in spatial interpolation of daily raingauged data. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 10, 197-208.
- [11] Bárdossy, A., & Pegram, G. (2014). Infilling missing precipitation records – A comparison of a new copula-based method with other techniques. *Journal of Hydrology*, 519, 1162-1170.
- [12] Rajakumari, D. (2020). Pearson correlation coefficient k-nearest neighbor outlier classification on real-time datasets. *ICTACT Journal on Soft Computing.*, 10, 2045-2053.
- [13] Rodriguez, Y. D. (2008). A Correlation-Based Distance Function for Nearest Neighbor Classification. In Ruiz-Shulcloper, J., Kropatsch, W.G. (eds) *Progress in Pattern Recognition, Image Analysis and Applications* (pp. Lecture Notes in Computer Science, vol 5197). Berlin, Heidelberg: Springer.
- [14] Doğan, Y. (2009). Outlier detection with K nearest neighbor clustering. Master's thesis, DEÜ The graduate school of natural and applied sciences, İzmir, 80.
- [15] Gürünlü Alma, Ö. (2009). Genetik algoritma tabanlı outlier detection using information criterion. Phd thesis, DEU The Graduate School of Natural and Applied Sciences, İzmir, 152.
- [16] Li, X., & Xiang, C. (2012). Correlation-based K-nearest neighbor algorithm. *IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering*, (pp. 185-187). doi:10.1109/ICSESS.2012.6269436
- [17] Mehrotra, R., & Sharma, A. (2006). Conditional resampling of hydrologic time series using multiple predictor variables: A K-nearest neighbor approach. *Advances in Water Resources*, 29, 987-999. doi:10.1016/j.advwatres.2005.08.007.
- [18] Meng, Q., Cieszewski, C. J., & Madden, M. (2007). K Nearest Neighbor Method for Forest Inventory Using Remote Sensing Data. *GIScience & Remote Sensing*, 44:2, 149-165. doi:10.2747/1548-1603.44.2.149.

- [19] Rajagopalan, B., & Lall, U. (1999). A k-Nearest Neighbour Simulator for Daily Precipitation and Other Weather Variables. *Water Resources Research*, 35, 3089-3101. doi:10.1029/1999WR900028
- [20] Aieb, A., Madani, K., Scarpa, M., Bonaccorso, B., & Lefsih, K. (2019). A new approach for processing climate missing databases applied to daily rainfall data in Soummam watershed, Algeria. *Heliyon*, 5.
- [21] Nemes, A., Rawls, W., & Pachepsky, Y. (2006). Use of the Nonparametric Nearest Neighbor Approach to Estimate Soil Hydraulic Properties. *Soil Science Society of America Journal*, 70, 327-336. doi:10.2136/sssaj2005.0128
- [22] Shabani, S., Samadianfard, S., Sattari, M., Mosavi, A., Band, S., Kmetz, T., & Varkonyi-Koczy, A. (2020). Modeling Pan Evaporation Using Gaussian Process Regression K-Nearest Neighbors Random Forest and Support Vector Machines; Comparative Analysis. *Atmosphere*, 11, 1-17. doi:10.3390/atmos11010066
- [23] Shi, J., & Yang, L. (2019). A Climate Classification of China through k-Nearest Neighbor and Sparse Subspace Representation. *Journal of Climate*, 33, 243-262. doi:10.1175/JCLI-D-18-0718.1
- [24] Vicente-Serrano, S., Beguería, S., López-Moreno, J., García-Vera, M., & Stepanek, P. (2010). A completed daily precipitation database for northeast Spain: reconstruction, quality control, and homogeneity. *Int. J. Climatol*, 30, 1146-1163. doi:https://doi.org/10.1002/joc.1850
- [25] Erdoğan, G. (2012). Spectral methods for outlier detection in machine learning. Master's thesis, Boğaziçi University Graduate Program in Computer Engineering, İstanbul, 110.
- [26] Gupta, M., Gao, J., Aggarwal, C., & Han, J. (2014). Outlier Detection for Temporal Data: A Survey. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 26:9, 2250-2267. doi:10.1109/TKDE.2013.184.
- [27] Bartolucci, A., Singh, K., & Bae, S. (2015). Introduction to statistical analysis of laboratory data. WILEY. Retrieved from <https://doi-org.divit.library.itu.edu.tr/10.1002/9781118736890>
- [28] TÜMAS. (2013). 01.01.2007 tarihinde "Otomatik İstasyon" olan Klima İstasyonları. Retrieved from Meteoroloji Genel Müdürlüğü TÜMAS: <http://tumas.mgm.gov.tr>
- [29] Yalçın, G. D. (2005). *Klimatoloji – I*. Ankara: DMİ Genel Müdürlüğü Matbaası.
- [30] Aguilar, E., Auer, I., Brunet, M., Peterson, T. C., & Wieringa, J. (2003). Guidelines on climate metadata and homogenization. Geneva: WMO/TD No. 1186.
- [31] Wang, X. L., & Feng, Y. (2010). RHtests V3 User Manual. Science and Technology Branch, Environment Canada, Climate Research Division, Atmospheric Science and Technology Directorate. Toronto: Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis.
- [32] NCDC. (1993). Report of the international workshop on quality control of monthly climate data. The international workshop on quality control of monthly climate data. Asheville, NC (United States), 5-6 Oct 1993: National Climatic Data Center.
- [33] Sönmez, İ. (2013). Quality control tests for western Turkey Mesonet. *Meteorological Applications*, 20(3), 1469-8080. doi:10.1002/met.1286
- [34] Bayazit, M. (1999). *Hidroloji*. İstanbul: İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası.
- [35] Bölük, E. (2016). Aydeniz, De Martonne, Erinc, Thornthwaite İklim Sınıflandırmasına Göre Türkiye İklimi. Araştırma Dairesi Başkanlığı Klimatoloji Şube Müdürlüğü. Ankara: T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı Meteoroloji Genel Müdürlüğü.
- [36] MGM. (2013). İstasyon Bilgileri Veritabanı. Retrieved from Meteoroloji Genel Müdürlüğü: <http://www.mgm.gov.tr/kurumsal/istasyonlarimiz.aspx>
- [37] Chiu, C.-A., Lin, P.-H., & Lu, K.-C. (2009). GIS-based tests for quality control of data and spatial interpolation of climate data. *Mountain Research and Development*, 29(4), 339-349. doi: <http://dx.doi.org/10.1659/mrd.00030>
- [38] Bayazit, M. (1981). *Hidrolojide İstatistiksel Yöntemler*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası.
- [39] Burn, D., & Boorman, D. (1993). Estimation of hydrological parameters at ungauged. *Journal of Hydrology*, 143, 429-454.
- [40] Hohmann, C., Kirchengast, G., O, S., Rieger, W., & Foelsche, U. (2021). Small Catchment Runoff Sensitivity to Station Density and Spatial Interpolation: Hydrological Modeling of Heavy Rainfall Using a Dense Rain Gauge Network. *Water*, 13, 1381. doi: <https://doi.org/10.3390/w13101381>
- [41] Teegavarapu, R. S., Aly, A., Pathak, C., Ahlquist, J., Fuelberg, H., & Hoode, J. (2018). Infilling missing precipitation records using variants of spatial interpolation and data-driven methods: use of optimal weighting parameters and nearest neighbor-based corrections. *International journal of climatology*, 38, 776-793. doi:10.1002/joc.5209
- [42] Lu, Y., Qina, X., & Mandapaka, P. (2015). A combined weather generator and K-nearest-neighbor approach for assessing climate change impact on regional rainfall extremes. *Int. J. Climatol*, 35, 4493-4508. doi:10.1002/joc.4301
- [43] Bartolucci, A., Singh, K. P., & Bae, S. (2015). Introduction to statistical analysis of laboratory data. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.

Y90 Radyoembolizasyon Tedavisinde Makine Öğrenmesi ile Aktivite Tahmini

Handan TANYILDIZI KÖKKÜLÜNK^{1*}, Emre ALATAŞ^{2,3}, Hilal TANYILDIZI^{4,5}

¹ Radyoterapi Programı, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Altınbaş Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

² Yönetim Bilişim Sistemleri, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Beykent Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

³ Yönetim Bilişim Sistemleri, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kadir Has Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

⁴ Uluslararası Ticaret ve Finansman, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Beykent Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

⁵ İşletme, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

*¹ handan.kokkulunk@altinbas.edu.tr, ^{2,3} emrealatas@beykent.edu.tr, ^{4,5} hilaltanyildizi@beykent.edu.tr

(Geliş/Received: 15/08/2022;

Kabul/Accepted: 11/12/2022)

Öz: İtiryum-90 (Y90) radyoembolizasyonu primer ve metastatik karaciğer kanseri tedavisinde kullanılan bir yöntemdir. Tedavide, Y90 aktivite miktarının (MBq) hastaya spesifik dozimetri ile hesaplanması gerekmektedir. Her bir hasta için dozimetrimin yapılması oldukça uzun sürmektedir. Klinikteki işleyişi hızlandırmak, kanser hastalarına daha hızlı tedavi sağlamak ve ilgili personelin iş yükünü azaltarak efektif çalışma düzeni oluşturmak adına dozimetrimin yerini alabilecek bir alternatifte ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle çalışmada, Y90 radyoembolizasyonu için hesaplanmış dozimetri sonuçları kullanılarak üç farklı makine öğrenmesi regresyon metodu modellenmesi sonucu Y90 terapötik aktivite miktarının tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Tümör kütlesi (g), karaciğer kütlesi (g), tümör/karaciğer sayım oranı (%), şant oranı (%), tümör tutulumu ve karaciğer tutulumu gibi nümerik parametreler girdi olarak, Y90 aktivite miktarı (MBq) çıktı olarak belirlenmiştir. Çoklu doğrusal regresyon (MLR), rassal orman regresyonu (RF) ve destek vektör regresyonu (SVM) kullanılarak tahminler gerçekleştirilmiştir. Tahmin yöntemlerinin performanslarını değerlendirmede ortalama mutlak yüzde hatası (MAPE), ortalama mutlak hata (MAE), ortalama karekök sapması (RMSE), ortalama karesel hata (MSE) ve doğruluk (%) ölçütleri kullanılarak optimal tahmin modeli belirlenmeye çalışılmıştır.

Anahtar kelimeler: Makine öğrenmesi, itiryum-90, çoklu lineer regresyon, rassal orman regresyon, destek vektör regresyonu.

Activity Prediction with Machine Learning in Y90 Radioembolization Therapy

Abstract: Yttrium-90 (Y90) radioembolization is a method used in the treatment of primary and metastatic liver cancer. In treatment, the amount of Y90 activity (MBq) should be calculated by patient-specific dosimetry. Dosimetry takes a long time to perform for each patient. There is a need for an alternative that can replace dosimetry to speed up the functioning of the clinic, provide faster treatment to cancer patients, and create an effective working order by reducing the workload of the relevant personnel. Therefore, the aim of this study was to estimate amount of Y90 therapeutic activity by modeling three different machine learning regression methods using calculated dosimetry results for Y90 radioembolization. Numerical parameters such as tumor mass (g), liver mass (g), tumor/liver count ratio (%), shunt rate (%), tumor involvement, and liver involvement were determined as input, and Y90 activity amount (MBq) was determined as output. Estimates were made using multiple linear regression (MLR), random forest regression (RF), and support vector regression (SVM). In evaluating the performance of estimation methods, the optimal estimation model was tried to be determined by using the mean absolute percent error (MAPE), mean absolute error (MAE), root mean square deviation (RMSE), mean square error (MSE) and accuracy (%).

Key words: Machine learning, yttrium 90, multiple linear regression, random forest regression, support vector regression.

1. Giriş

İtiryum-90 (Y90) radyoembolizasyonu 20 yıldan uzun süredir klinik uygulaması olan, primer ve metastatik karaciğer kanseri tedavisinde kullanılan bir tedavi yöntemidir [1]. Y90 radyoembolizasyonunda, radyoaktif mikro küreler hepatik arterden kateter ile giriş yapılarak karaciğerde bulunan tümör içine verilmektedir [2]. Saf β -radyasyonu yayıcısı olan Y90, 2.67 günlük (64,1 saat) fiziksel yarılanma ömrüne sahip olup, yarılanma sonucu stabil zirkonyum-90'a dönüşmektedir. Maksimum ve ortalama β - enerjileri sırasıyla 2.28 MeV ve 0.93 MeV olan Y90, yüksek enerjiye sahip olması nedeniyle doku eş değeri kabul edilen su içerisinde 11.0 mm kadar ilerleyebilmektedir [3, 4]. Y90 tedavisinde amaç, tümöre maksimum Y90 aktivitesinin verilmesi ile maksimum absorbe dozu oluşturmak, tümörlü hücrelerin imhasını sağlamak ve normal karaciğer parankimini mümkün olduğunca korumaktır. Bu sebeple uygulanacak Y90 aktivite miktarının hastaya spesifik hesaplanması, dozimetri yapılması önem kazanmaktadır [5, 6].

Farklı internal dozimetri çeşitleri olmasıyla birlikte, aralarında bulunan Medical Internal Radiation Dose (MIRD) yönteminin, hastaya ait tümör ve karaciğer kütlesi, şant oranı, tümör / karaciğer tutulum oranı, vb.

*Sorumlu yazar: handan.kokkulunk@altinbas.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0001-5231-2768, ^{2,3} 0000-0003-4579-5057, ^{4,5} 0000-0003-1522-0498

verilerin hesaplamaya dahil edilmesi, bilimsel bir temele oturması ve gerçeğe en yakın sonuçları vermesi nedenleriyle yaygın bir kullanımı bulunmaktadır [7].

MIRD yöntemiyle hesaplama yapabilmek için, medikal fizik uzmanı tarafından tedavi öncesi hasta görüntüleri incelenerek; bilgisayarlı tomografi (BT) görüntülerinden tümör ve karaciğer hacimleri hesaplanmaktadır. Belirlenen hacimler yumuşak doku eşdeğeri kabul edilen su yoğunluğu ile çarpılarak kütle çevrilmiştir. Benzer şekilde hastanın tek foton emisyonlu bilgisayarlı tomografi (SPECT) görüntülerinden akciğer, tümör ve karaciğere ait sayımlar elde edilerek tümör ve karaciğer tutulumu, şant oranı, tümör / karaciğer sayım oranları hesaplanmaktadır. Tüm hesaplanan parametreler Denklem 1 ve 2 aracılığıyla hastaya verilecek optimal Y90 aktivite miktarının belirlenmesinde kullanılmaktadır [5], [7].

$$\text{Doz}_{\text{karaciğer}} (\text{rad}) = \frac{\text{Aktivite}_{\text{toplam}}(\text{mCi}) \times 184.000 \times \text{Tutulum}_{\text{karaciğer}}}{\text{kütle}_{\text{karaciğer}}(\text{g})} \quad (1)$$

$$\text{Doz}_{\text{tümör}} (\text{rad}) = \frac{\text{Aktivite}_{\text{toplam}}(\text{mCi}) \times 184.000 \times \frac{\text{tümör}}{\text{karaciğer}} \text{ sayım oranı}}{\text{kütle}_{\text{tümör}}(\text{g})} \quad (2)$$

Formüllerde kullanılacak her parametrenin hastalar için ayrı ayrı hesaplanması göz önüne alındığında, dozimetri işleminin yapılması oldukça uzun sürmektedir. Klinikteki işleyişi hızlandırmak, kanser hastalarına daha hızlı tedavi sağlamak ve ilgili personelin iş yükünü azaltarak efektif çalışma düzeni oluşturmak adına dozimetrimin yerini alabilecek bir alternatifte ihtiyaç duyulmuştur. Bu noktada makine öğrenmesi, mevcut verilerden öğrenme yoluyla insan zekasını taklit edip yeni tahminlerde bulunan bir hesaplama algoritması dalıdır [8]. Makine öğrenmesi yöntemlerinin medikal alanda kullanılmasıyla birlikte birçok hastalık teşhisi yani sınıflandırma yapılmıştır [9-12]. Bunun yanı sıra kan biyokimya sonuçlarının analizi, kalp rahatsızlıkları tespiti, diyabet hastalarda glikoz seviyelerinin takibi, tümör lokalizasyon tespiti, görüntü üzerinden kanserli hücrelerin tespiti ve kanseri teşhis etmek gibi işlemlerde de kullanılmaktadır [13]. Bu çalışmada, Y90 radyoembolizasyonu için hesaplanmış dozimetri sonuçları kullanılarak üç farklı makine öğrenmesi regresyon metodu modellenmesi sonucu Y90 terapötik aktivite miktarlarının tahmin edilmesi amaçlanmıştır.

Çalışma dört bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, veri seti oluşturulmuş ve eğitim – test olarak bölünmektedir. İkinci bölümde farklı makine öğrenmesi algoritmaları ile tahminler elde edilmektedir. Üçüncü bölümde her bir algoritma için performans değerlendirme metrikleri hesaplanmaktadır. Dördüncü bölümde ise performans değerlendirme metriklerine göre karşılaştırma yapılarak Y90 terapötik aktivite miktarını en iyi tahmin eden makine öğrenmesi algoritması belirlenmektedir.

2. Yöntem

Makine öğrenmesinde kullanılmak üzere toplam 31 hastaya ait dozimetri kayıtları kullanılmıştır [14]. Çalışma retrospektif olarak gerçekleştirilmiştir.

2.1. Veri Seti ve Makine Öğrenmesi Hazırlığı

Tümör kütlesi (g), karaciğer kütlesi (g), tümör / karaciğer sayım oranı (%), şant oranı (%), tümör tutulumu ve karaciğer tutulumu nümerik parametreler girdi olarak, Y90 aktivite miktarı (MBq) çıktı parametresi olarak belirlenmiştir.

Çalışmada .xlsx uzantılı girdi sayfası Python programı aracılığıyla makine öğrenmesi algoritmalarını kodlamak için kullanılmıştır. Python için Numpy, Matplotlib, Pandas, Scikit-learn, statsmodels gibi kütüphaneler çalıştırılmıştır. Sklearn python kitaplığının model_selection sınıfından aktarılan train_test_split() işlevi ile veri setinin %80'i algoritmaların eğitilmesi, %20'si ise oluşturulan tahminlerin doğruluğunu denetlemek, performans değerlendirmesi yapabilmek için test setinde kullanılmıştır.

2.2. Tahminleme Modelleri

Makine öğrenmesine ait çok sayıda sınıflandırma ve regresyon tahmin yöntemi bulunmaktadır. Bununla birlikte bu çalışmada kullanılan veri setinde tahmin edilecek bağımlı değişken sayısal veri tipinde olduğundan makine öğrenmesi regresyon yöntemleri tercih edilmiş ve bu yöntemlerden çoklu doğrusal regresyon, rassal orman regresyonu ve destek vektör regresyonu kullanılarak tahminler gerçekleştirilmiştir.

2.2.1. Çoklu Doğrusal Regresyon (MLR)

Çoklu doğrusal regresyon (MLR), birden fazla bağımsız değişken (x_1-x_n) ile bir bağımlı değişken olan y arasındaki ilişkinin ortaya çıkarılması için kullanılan yöntemlerden biridir. MLR 'un iki ya da daha fazla değişkenin bilinen değerlerinden bir değişkenin bilinmeyen değerini tahminlemek için kullanılan yaygın bir

yöntem olduğu ifade edilmektedir [15]. Bir çok durumda bu ilişki, doğrusal ya da doğrusallaştırılabilecek şekilde n tane bağımsız değişken için oluşturulan aşağıdaki Denklem 3 ile ifade edilmektedir [16]. Bu çalışmada çoklu doğrusal regresyon “sklearn” kütüphanesinden linear_model sınıfı kullanılmıştır.

$$\boxed{y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n} \quad (3)$$

2.2.2.Rassal Orman Regresyonu (RF)

Rassal Orman Regresyonu (RF), karar ağaçlarının birleşiminden oluşmaktadır ve bu regresyon türünde kullanılan karar ağaçları arasında doğruluk ve bağımsızlığı en fazla olanlar tercih edilmektedir [17]. Sınıflandırma ve regresyon problemlerinde kullanılması ve hızlı bir şekilde eğitilmesi gibi sahip olduğu özelliklerden ötürü yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [18]. Bu çalışmada sklearn kütüphanesi ensemble sınıfından rassal orman analizi gerçekleştirilip, model parametrelerinden ağaç sayısı 10 (n_estimators=10) olarak belirlenmiştir.

2.2.3.Destek Vektör Regresyonu (SVM)

Destek vektör makineleri (SVM) ilk olarak Cortes ve Vapnik tarafından geliştirilmiştir [19, 21]. Doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon türleri için tahminleme yapmak adına sıklıkla kullanılmaktadır [22]. Bu regresyonun işleyiş prensibi tahmin hatasını en aza indirmeye çalışmaktır ve böylelikle eğitim veri setine en yaklaşan fonksiyonu bulmayı hedeflemektedir [23]. Bu çalışmada SVM, sklearn python kitaplığının svm sınıfından aktarılmıştır.

2.3.Performans Değerlendirme Ölçütleri

Tahmin yöntemlerinin performanslarını değerlendirmede ortalama mutlak yüzde hatası (MAPE), ortalama mutlak hata (MAE), ortalama karekök sapması (RMSE), ortalama karesel hata (MSE) ve doğruluk ölçütleri kullanılmıştır. Düşük hata oranı ve aynı zamanda yüksek doğruluk veren yöntem, optimal tahmin tekniği olarak belirlenmiştir. MAPE, MAE, RMSE ve MSE hatalarının hesaplandığı formüller Denklem 4-7 'de gösterilmiştir [24, 27].

$$\boxed{MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - y'_i}{y_i} \right|} \quad (4)$$

y_i : Gerçek değer y'_i : Tahmin edilen değer n : gözlem sayısı

$$\boxed{MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - y'_i|} \quad (5)$$

y_i : Gerçek değer y'_i : Tahmin edilen değer n : gözlem sayısı

$$\boxed{RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2}} \quad (6)$$

y_i : Gerçek değer y'_i : Tahmin edilen değer n : gözlem sayısı

$$\boxed{MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2} \quad (7)$$

y_i : Gerçek değer y'_i : Tahmin edilen değer n : gözlem sayısı

3.Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada karaciğer kanseri radyoembolizasyon tedavisinde uygulanacak hastaya özgü Y90 aktivite miktarının makine öğrenmesi aracılığıyla belirlenmesine yönelik hesaplamalar yapılmıştır. Tümör kütlesi (g), karaciğer kütlesi (g), tümör / karaciğer sayım oranı (%), şant oranı (%), tümör tutulumu ve karaciğer tutulumu girdi, aktivite miktarı (MBq) çıktı olmak üzere tahmin yöntemlerinden MLR, RF ve SVM algoritmaları ile eğitim ve test işlem basamakları tamamlanmıştır. 24 kişiye ait girdi verileri eğitim verisi olarak kullanılmış, model kurulup öğrenme yapıldıktan sonra, 7 kişiye ait veriler performans değerlendirmesi için kullanılmıştır. Dozimetriye ait girdiler aracılığıyla MLR, RF ve SVM algoritmaları ile tahmin edilen aktiviteler Tablo 1 'de gösterilmiştir.

Tablo 1. MLR, RF ve SVM algoritmaları ile tahmin edilen aktivite miktarları (MBq).

Gerçek aktivite (MBq)	Tahminler		
	MLR	RF	SVM
1805.6	1817.2	1601.1	1844.4
1295	1233.4	1598.1	1380.1
2738	2428.1	1602.1	2053.5
1498.5	1437.5	1598.2	1435.6
2072	1632.6	1599.1	1722.3
1239.5	1380.4	1597.8	1363.4
1554	1633.4	1600.8	1922.5

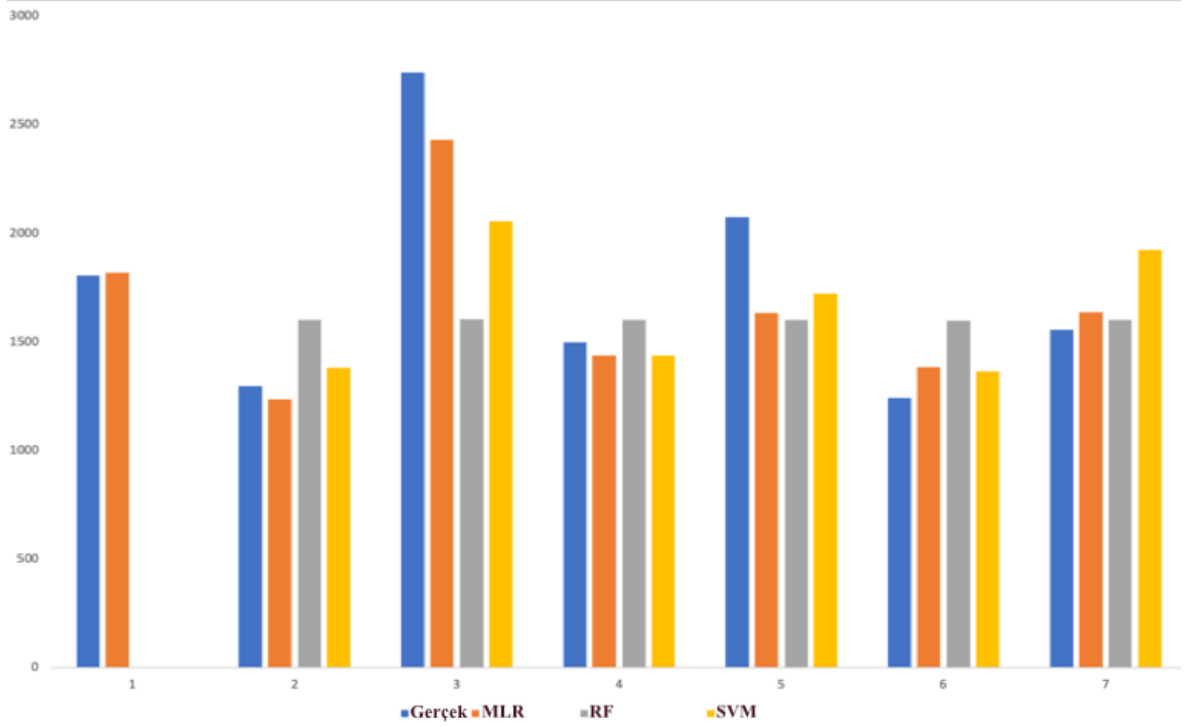
Nümerik sonuçlar incelendiğinde, gerçek aktivite değerlerine en yakın tahmin sonuçları MLR ile elde edilmiştir. RF tahmin yönteminin gerçek değerlere kısmen yaklaştığı, SVM yönteminin ise Y90 aktivite tahmini için ideal bir algoritma olmadığı ön değerlendirme ile görülmektedir. Tablo 2’ de çalışmada kullanılan algoritmaların hata değerleri (MAPE, MAE, RMSE, MSE) ve doğruluk (%) sonucu verilmiştir.

Tablo 2. MLR, RF ve SVM algoritmaları için hesaplanan hata ve doğruluk (%) sonuçları.

	MLR	RF	SVM
MAPE	8.3	12.6	19.6
MAE	157.6	244.7	374.4
RMSE	214.7	328.3	505.4
MSE	46115.5	107811	255442
Doğruluk (%)	91.6	87.3	80.3

Bir modelin başarısı incelendiğinde tek başına doğruluk (%), ya da tek başına hata oranı yeterli olmamaktadır. Bu sebeple her bir model için eş zamanlı olarak yüksek doğruluk (%) ve düşük hata oranı elde edilmesi gerekmektedir. MLR algoritmasında, test verisi ve tahmin değerleri karşılaştırıldığında elde edilen tüm hata oranları, diğer algoritmalar olan RF ve SVM ‘den oldukça düşük bulundu. Ayrıca doğruluk (%) araştırmasında yine 91.6 değeri ile MLR algoritmasının yüksek performans gösterdiği belirlendi. Bu yüzden, düşük hata değerleri ve yüksek doğruluk sonucu ile MLR algoritmasının, Y90 aktivite miktarı tahmininde kullanılacak ideal yöntem olarak öne çıkmaktadır. MLR algoritmasını takiben, alternatif olarak %87.3 doğruluk, %12.6 MAPE hata değeri ile RF yöntemi gelmektedir. Çalışmada kullanılan yöntemler arasında olan SVM, en yüksek hata değerlerini ve en düşük doğruluk oranını vermiştir. Bu sebeple aktivite miktarı tahmininde kullanımı uygun görülmemektedir.

Test verileri aracılığıyla gerçek ve 3 farklı tahmin yöntemiyle elde edilen sonuçlar Şekil 1 ‘de gösterilmiştir. Grafikte yine gerçek verilerle en iyi örtüşen tahminlerin MLR algoritması ile olduğu görülmektedir.



Şekil 1. Gerçek ve test verilerinden MLR, RF, SVM ile tahmin edilen çıktılar karşılaştırılması (Gerçek veriler mavi, MLR ile tahmin edilen veriler turuncu, RF ile tahmin edilen veriler gri, SVM ile tahmin edilen veriler sarı renk ile gösterilmiştir).

Akter ve d. (2021), karaciğer hastalıklarının sınıflandırma ile tahmininde biyokimyasal testler aracılığıyla rassal orman ve regresyon ağacı (CART) tekniklerini uygulamış ve doğruluğu sırasıyla %94 and %95 olarak bulmuştur [28]. Benzer bir şekilde Teke (2022) çalışmasında, karaciğere ait protein, albümin ve bilirubin gibi değerleri kullanarak lojistik regresyon ile karaciğer hastalığı var / yok tahmini yapmış ve eğitim doğruluğunu %87, test doğruluğu %84 bulmuştur [12]. Bu çalışmada, MLR tekniğiyle %91.6 doğruluk elde edilmesi sebebiyle sonuçlarımızın literatürle uyumlu olduğu bulunmuştur. Literatür karşılaştırması detaylı olarak Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Literatür karşılaştırması.

Literatür	Hedef	Yöntem	Doğruluk (%)
Akter ve d. (2021)	karaciğer hastalıklarının sınıflandırma	CART	95
Teke (2022)	karaciğer hastalıklarının sınıflandırma	LR	84
Bu çalışma	karaciğer radyoembolizasyon aktivite tahmini	MLR	91.6

Ayrıca, RF ve SVM algoritmalarının geniş sayıda gözlem içeren verilerde yüksek başarı oranıyla tahminler yaptığı bilinmektedir. Bu çalışmada kullanılan veri setindeki gözlem sayısının azlığından ötürü bu iki metodun nispeten düşük bir başarı oranıyla sonuç verdiği, MLR yönteminin başarı oranının daha yüksek olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte, sağlık alanında I. tip hatanın maksimum %5 'de [29] tutulduğu göz önüne alındığında, çalışmamızda MLR algoritması ile hesaplanan %8.3 (MAPE) değerinin yüksek olduğu görülmektedir.

4.Sonuçlar

Primer karaciğer kanseri veya kolorektal kanser, pankreas kanseri, melanom, akciğer kanseri ve meme kanseri dahil olmak üzere bir dizi malignitede yaygın olarak oluşan metastatik karaciğer kanseri hızlı teşhis ile tedavisi yapılması gereken kanser türlerindedir. Tedavide hastaya verilmesi planlanan Y90 aktivitesinin belirlenmesi için kliniklerde MIRD yöntemi temelli dozimetri yapılmaktadır. Fakat bu yöntem uzun bir hesaplama zamanı gerektirdiğinden, hastalara hızlı bir şekilde tedavi planlaması yapılması, daha kısa sürede terapötik aktivitenin tahmin edilmesi gerekmektedir. Literatürde terapötik aktivite gibi medikal alanda nümerik çıktılarının tahminlenmesine dair veriler sınırlı olmakla birlikte [30], kullanılan algoritma farklılıkları ve veri setleri gibi değişkenler hata ve doğruluk sonuçlarını etkilemektedir.

Çalışmamızda, farklı makine öğrenmesi yöntemleriyle Y90 terapötik aktivite tahminleri yaparak kullanılan yöntemler karşılaştırılmış, sonuçlar performans değerlendirmesi açısından değerlendirilmiştir. Dozimetri girdi veri setine uygulanan makine öğrenmesi algoritmaları içinde gerçek aktivite değerleri ve tahmin edilen aktivite değerlerinin en çok uyum gösterdiği yöntem %8.3 MAPE hata oranı ve %91.6 doğruluk oranıyla MLR olmuştur ve bunu sırasıyla RF ve SVM yöntemleri takip etmiştir.

Özellikle %8.3 MAPE hata oranının azaltılması, daha iyi bir tahmin mekanizmasının elde edilmesi için, Y90 aktivite tahmininde veri setindeki örneklem sayısının artırılması ek olarak nöral network, derin öğrenme gibi teknikler kullanılarak iyileştirmeye gidilecektir.

Etik Kurul Onayı ve Çıkar Çatışması Beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yazar Katkıları

Gerçekleştirilen çalışmada Yazar 1 makine öğrenmesi işlemleri, verilerin analizi, taslağın oluşturulması başlıklarında; Yazar 2, çalışma konsepti ve tasarım, veri toplama, içerik oluşturma, verilerin analizi, revizyon başlıklarında; Yazar 3 makine öğrenmesi işlemleri, yazım denetimi ve içerik oluşturma başlıklarında katkı sunmuşlardır.

Kaynaklar

- [1] A. Saini et al., "History and Evolution of Yttrium-90 Radioembolization for Hepatocellular Carcinoma," J Clin Med, vol. 8, no. 1, p. E55, Jan. 2019, doi: 10.3390/jcm8010055.
- [2] E. C. Henry et al., "Precision dosimetry in yttrium-90 radioembolization through CT imaging of radiopaque microspheres in a rabbit liver model," EJNMMI Physics, vol. 9, no. 1, p. 21, Mar. 2022, doi: 10.1186/s40658-022-00447-1.
- [3] H. L. Volchok and J. L. Kulp, "Half-Life of Yttrium-90," Phys. Rev., vol. 97, no. 1, pp. 102–102, Jan. 1955, doi: 10.1103/PhysRev.97.102.
- [4] E. Mainegra-Hing, D. W. O. Rogers, and I. Kawrakow, "Calculation of photon energy deposition kernels and electron dose point kernels in water," Med Phys, vol. 32, no. 3, pp. 685–699, Mar. 2005, doi: 10.1118/1.1861412.
- [5] H. Tanyildizi, M. Demir, and B. Akkuş, "Detecting the optimal patient-specific radiation dosimetry in Yttrium-90 microsphere therapy," İstanbul Bilim Üniversitesi Florence Nightingale Tıp Dergisi, vol. 4, no. 3, Art. no. 3, Oct. 2018.
- [6] H. T. Kökkülünk, M. Demir, A. K. Yıldırım, S. Özkorucuklu, B. Akkuş, and D. Yaşar, "Y-90 dosimetry with Monte Carlo method: GATE validation with STL formatted phantom," 2020, doi: 10.12693/APhysPolA.138.801.
- [7] S. A. Gulec, G. Mesoloras, and M. Stabin, "Dosimetric techniques in 90Y-microsphere therapy of liver cancer: The MIRD equations for dose calculations," J Nucl Med, vol. 47, no. 7, pp. 1209–1211, Jul. 2006.
- [8] I. El Naqa and M. J. Murphy, "What Is Machine Learning?," in Machine Learning in Radiation Oncology: Theory and Applications, I. El Naqa, R. Li, and M. J. Murphy, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2015, pp. 3–11. doi: 10.1007/978-3-319-18305-3_1.
- [9] A. Mujumdar and V. Vaidehi, "Diabetes Prediction using Machine Learning Algorithms," Procedia Computer Science, vol. 165, pp. 292–299, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.procs.2020.01.047.
- [10] K. Karthick, S. K. Aruna, R. Samikannu, R. Kuppusamy, Y. Teekaraman, and A. R. Thelkar, "Implementation of a Heart Disease Risk Prediction Model Using Machine Learning," Computational and Mathematical Methods in Medicine, vol. 2022, p. e6517716, May 2022, doi: 10.1155/2022/6517716.

- [11] A. Tyagi, R. Mehra, and A. Saxena, "Interactive Thyroid Disease Prediction System Using Machine Learning Technique," in 2018 Fifth International Conference on Parallel, Distributed and Grid Computing (PDGC), Dec. 2018, pp. 689–693. doi: 10.1109/PDGC.2018.8745910.
- [12] M. Teke, "Prediction of Liver Diseases with Machine Learning Method," SMUTGD, Jun. 2022, doi: 10.51764/smutgd.1106793.
- [13] Y. Li, Q. He, and J. Luo, "A Deep Learning Trial on Transient Elastography for Assessment of Liver Fibrosis," in 2018 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), Oct. 2018, pp. 1–4. doi: 10.1109/ULTSYM.2018.8579992.
- [14] "Ulusal Tez Merkezi | Anasayfa." <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp> (accessed Aug. 12, 2022).
- [15] M. M. Yee, E. E. Aung, and Y. M. Khaing, "Forecasting Stock Market using Multiple Linear Regression," International Journal of Trend in Scientific Research and Development, vol. Volume-3, no. Issue-5, Aug. 2019, Accessed: Aug. 15, 2022. [Online]. Available: <https://www.ijtsrd.com/computer-science/data-miining/27819/forecasting-stock-market-using-multiple-linear-regression/yee-mon-khaing>
- [16] A. Giacomino, O. Abollino, M. Malandrino, and E. Mentasti, "The role of chemometrics in single and sequential extraction assays: A Review. Part II. Cluster analysis, multiple linear regression, mixture resolution, experimental design and other techniques," Analytica chimica acta, vol. 688, pp. 122–39, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.aca.2010.12.028.
- [17] "Bagging predictors | SpringerLink." <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00058655> (accessed Aug. 15, 2022).
- [18] "The Elements of Statistical Learning | SpringerLink." <https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-84858-7> (accessed Aug. 15, 2022).
- [19] B. E. Boser, I. M. Guyon, and V. N. Vapnik, "A Training Algorithm for Optimal Margin Classifiers," in Proceedings of the 5th Annual ACM Workshop on Computational Learning Theory, 1992, pp. 144–152.
- [20] The Nature of Statistical Learning Theory. Accessed: Aug. 15, 2022. [Online]. Available: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4757-3264-1>
- [21] "A tutorial on support vector regression | SpringerLink." <https://link.springer.com/article/10.1023/B:STCO.0000035301.49549.88> (accessed Aug. 15, 2022).
- [22] D. Parbat and M. Chakraborty, "A python based support vector regression model for prediction of COVID19 cases in India," Chaos Solitons Fractals, vol. 138, p. 109942, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.chaos.2020.109942.
- [23] L. Demir and S. Akkaş, "A comparison of sales forecasting methods for a feed company: A case study," Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, vol. 24, no. 4, Art. no. 4, Aug. 2018.
- [24] T. Chai and R. R. Draxler, "Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature," Geoscientific Model Development, vol. 7, no. 3, pp. 1247–1250, Jun. 2014, doi: 10.5194/gmd-7-1247-2014.
- [25] Ö. O. Dursun and S. Toraman, "Uzun Kısa Vadeli Bellek Yöntemi ile Havayolu Yolcu Tahmini," Journal of Aviation, vol. 5, no. 2, Art. no. 2, Dec. 2021, doi: 10.30518/jav.1009331.
- [26] H. H. BiLgiÇ, H. Yağlı, A. Koç, And A. Yapıcı, "Deneysel Bir Organik Rankine Çevriminde Yapay Sınır Ağları (Ysa) Yardımıyla Güç Tahmini," Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim Ve Teknoloji Dergisi, Vol. 4, No. 1, Art. No. 1, Mar. 2016, Doi: 10.15317/Scitech.2016116091.
- [27] M. Gök, "Makine Öğrenmesi Yöntemleri İle Akademik Başarının Tahmin Edilmesi," p. 10, 2017.
- [28] S. Akter, H. U. Shekhar, and S. Akhteruzzaman, "Application of Biochemical Tests and Machine Learning Techniques to Diagnose and Evaluate Liver Disease," Advances in Bioscience and Biotechnology, vol. 12, no. 6, Art. no. 6, Jun. 2021, doi: 10.4236/abb.2021.126011.
- [29] S. Kul, "Interpretation Of Statistical Results: What Is P Value And Confidence Interval?," Plev Bult, Vol. 8, No. 1, Pp. 11–13, Mar. 2014, Doi: 10.5152/Pb.2014.003.
- [30] T. I. Götz, C. Schmidkonz, S. Chen, S. Al-Baddai, T. Kuwert, and E. W. Lang, "A deep learning approach to radiation dose estimation," Phys. Med. Biol., vol. 65, no. 3, p. 035007, 2020, doi: 10.1088/1361-6560/ab65dc.

İnsansız Sistemlerde Görsel Eş Zamanlı Haritalama ve Konumlandırma Tekniğinin Simulink Ortamında Uygulanabilirlik Analizi

Celal Çağrı ALTINDAŞ^{1*}, Hasan Şakir BİLGE^{1*}

¹ Elektrik Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye

² Elektrik Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye

*¹ cagri.altindas@tubitak.gov.tr, ² bilge@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 29/08/2022;

Kabul/Accepted: 30/11/2022)

Öz: Günümüzde insansız sistemler birçok alanda görevler almakta ve bu görevlerini başarıyla yerine getirmektedirler. Ancak bu insansız sistemler otonom bir şekilde uçarak görevlerini yerine getirdiklerinden ötürü hem çevresini hemde bulunduğu konumunu bilmesi gerekmektedir. Eş Zamanlı Konumlandırma ve Haritalama (SLAM) yöntemi sayesinde çevre bilgisini anlık olarak elde ederek bu çevrede bulunduğu konumu kestiriminde avantaj sağlayan bir yöntemdir. Ancak bu yöntem genellikle düşük hızlarda uçan insansız sistemler için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Windows'ta çalışmakta olan MATLAB 2021b Simulink UAVToolbox ve Unreal Engine v4.25 oyun motor platformu kullanılarak yüksek hızlarda uçan sistemler için Görsel Eş Zamanlı Konumlandırma ve Haritalama (vSLAM) tekniğinin benzetimi gerçekleştirilmiştir. Bu gerçekleştirilmede fotorealistik benzetim senaryosu Unreal Engine v4.25 aracılığıyla üretilerek MATLAB Simulink aracılığı ile benzetim yapılmıştır. Bu benzetimde kameralardan sağlanan görüntüler yardımı ile kamera tabanlı vSLAM yaklaşımı olan ORB-SLAM2.0 algoritması farklı hız, irtifa ve rotalarda senaryolar başarıyla koşturulmuştur. Benzetim testlerinin amacı olan yüksek hızlı sistemler için vSLAM algoritmasının çalıştırılabildiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler : Eş zamanlı konum belirleme ve haritalama, vSLAM, UAVToolbox, MATLAB Simulink, Unreal Engine

Analysis of the Applicability of Visual Simultaneous Localization and Mapping Technique for Unmanned Systems Using Simulink Environment

Abstract : Today, unmanned systems take on tasks in many areas and successfully fulfill these tasks. However, since these unmanned systems fly autonomously, they need to know both their surroundings and their location. Thanks to the Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) method, it is a method that provides an advantage in estimating its location in this environment by instantly obtaining environmental information. However, this method is commonly used for unmanned systems flying at low speeds. In this study, Visual Simultaneous Localization and Mapping(vSLAM) technique is simulated for high-speed flying systems with the help of MATLAB 2021b Simulink UAVToolbox and Unreal Engine v4.25 running on Windows. In this implementation, the photorealistic simulation scenario was produced using Unreal Engine v4.25 and the simulation was carried out via MATLAB Simulink. In this simulation, the ORB-SLAM2.0 algorithm which is camera based vSLAM approach was run with the help of the images obtained from the cameras, and the simulation was successfully carried out at different speed, altitude and paths. It has been observed that vSLAM algorithm can be executed for high speed unmanned systems which is the purpose of simulations.

Keywords : Simultaneous Localisation and Mapping, vSLAM, UAVToolbox, MATLAB Simulink,, Unreal Engine

1. Giriş

İnsansız hava araçları, üzerlerine yerleştirilmiş çeşitli bilgisayarlar ve elektronik sistemler ile çalışan ve bir çok alanda sıklıkla kullanılmakta olan insansız sistemlerdir [1,2]. İnsansız sistemler, gözlem, çevre yönetim, uzaktan algılama gibi yetenekler sayesinde istenilen görevleri icra edebilmesi için üzerlerine yerleştirilen sensörler aracılığı ile otonom hareket kabiliyeti kazanmaktadır. Bu yetenek ile birlikte buldukları çevreyi bilme yeteneğinin kazandırılması, bu sistemlerin görevlerini gerçekleştirmeleri için önemli bir kriterdir[3].

İnsansız hava araçlarının çevreyi bilmesi için konum ve yönelimlerini belirleyebilmesi gerekmektedir. Bunun içinde KKS, AÖB gibi sensörlere ihtiyaç duyulmaktadır.[4,5]. Ancak bu sensörlerin maruz kalabileceği çeşitli çevresel etkilerden dolayı hatalı veri üretme olasılıkları bulunmaktadır. Bu sebeple 1980'li yıllarda Eş Zamanlı

* Sorumlu yazar: cagri.altindas@tubitak.gov.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0003-0809-5211, ² 0000-0002-4945-0884

Konumlandırma ve Haritalama (Simultaneous Localization and Mapping - SLAM) ile ilgili çalışmalara başlanmıştır [7].

SLAM kavramı ortaya atıldıktan sonra gerçekleştirilen çalışmalar sonucu ilk olarak filtre tabanlı olan Genişletilmiş Kalman Filtresi ve Rao-Blackwellized Parçacık Filtreleri ortaya çıkarılmıştır [8][9]. Filtre tabanlı yöntemler ile birlikte lidar sistemlerin kullanılmaya başlanmasıyla 2D ve 3D ortamlarda haritalama alanlarında da çalışmalar gerçekleştirilmiştir [10][11]. Haritalama alanında gerçekleştirilen çalışmaların sonucu göstermiştir ki, SLAM daha sağlam ve güvenilir sonuçlar vermektedir [6]. Bütün bu önemli gelişmeler 2D ve 3D haritalama alanında çalışmaların daha da geliştirilmesi gereksinimini gündeme getirmiştir ve Lidar sistemler ile hem 2D SLAM hemde 3D SLAM alanında çalışmalara devam edilmiştir. Ancak teknolojinin hızlı bir şekilde gelişmesi ile lidarlı çözüm araçlarına alternatif olarak hem daha uygun hem daha kullanışlı olan kameralar çıkmıştır. Gerçekleştirilen çalışmalarda, lidar sistemlerin yerine kamera ile oluşturulan Görsel SLAM (vSLAM) tekniğinin mevcut tekniklere göre kabiliyetinin arttığı ve daha güvenilir sonuçlar ürettiği görülmektedir [12]. Ayrıca bu çalışmalarda vSLAM tekniğinin mevcut SLAM kabiliyetlerine göre daha modüler ve tasarruflu olduğu ve ekstra bir maliyet oluşturmadığı da gözlemlenmiştir [12]. Sonuç olarak vSLAM ile daha avantajlı bir şekilde 3D SLAM'in gerçekleştirilebildiği ispatlanmıştır [12][13].

Bütün bu önemli gelişmeler olmasına rağmen, literatürde vSLAM yönteminin yüksek hızda uçabilen insansız sistemler üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde sınırlı sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Nobis, Papanikolaou, Betz ve Lienkamp'ın 2020 yılında gerçekleştirdiği çalışmada [14], iç ve dış mekanlarda model araç üzerine yerleştirilen stereo kamera aracılığı ile hem kendi elde ettikleri veriler hemde KITTI veri seti [15] ile 8 mt/s ile 40mt/s aralığında ORB-SLAM2.0 tekniğini koşturmuşlardır. Çalışmaları sonucunda 36 mt/s hıza kadar hem iç mekan hem dış mekanda ORB-SLAM2.0 tekniğinin koşturulabildiğini ortaya koymuşlardır. [14]

Bu çalışmanın amacı, yüksek hızda uçabilen sistemlere SLAM'in uygulanabilirliğinin MATLAB Simulink benzetim ortamında gösterilerek vSLAM algoritmasının performans analizinin gerçekleştirilmesi ve bu bilgiler ışığında ilgili literatür çalışmalarına katkıda bulunmaktır. Bu makalenin Materyal ve Yöntem bölümünde bu çalışmaya özel olarak üretilmiş veri seti, ORB-SLAM2.0 tekniği ve deneysel ortamda kullanılmış olan platformlar açıklanmıştır. Deneysel Test Çıktıları bölümünde ORB-SLAM2.0 tekniği sonucu elde edilmiş olan harita ve konumlandırma bilgilerini içeren test sonuçlarına ait şekillere yer verilmiştir. Sonuç ve Öneriler bölümünde ise bu tekniğin başarı durumu ve yapılabilecek gelecek çalışmalara yer verilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem

2.1 Benzetim Veri Setleri

Benzetim ortamında gerçekleştirilmiş olan deneysel testlerde Şekil 4'de yer almakta olan 1. ve 2. rotalara uygun konum ve yönelim verilerini içeren 2 ayrı rota için veri setleri oluşturulmuştur. Bu rotalar için konum verileri zaman, x, y ve z eksen bilgilerini, yönelim verileri ise zaman, yuvarlanma, yunuslama ve dönme açı değerlerini içermektedir. Konum ve yönelim veri setlerinde yer almakta olan zaman bilgileri kısmında Simulink için gerekli örnekleme zaman değeri olan 0.05 saniyelik periyotları şeklinde aritmetik artacak şekilde tanımlanmıştır.

Konum bilgileri koordinat ekseninde yer almakta olan x, y ve z eksen bilgilerini içermektedir. Konum için gerekli olan x,y ve z eksen bilgileri rota, irtifa ve hız faktörleri ve 1 saniyelik veri setinde aşağıdaki Denklem 1'de yer alan formül dikkate alınarak oluşturulmuştur.

$$x^2 + y^2 + z^2 = \sqrt{hız} \quad (1)$$

Yönelim bilgileri yuvarlanma, yunuslama ve dönme açı değerleri benzetim uçuş test rotaları korunarak oluşturulmuştur. Bu kapsamda bilgisayar performans kısıtlamaları da göz önüne alınarak yaklaşık 10 mt/s (0.03 Mach) ile 40 mt/s (0.12 Mach) hız aralığı ile 100 metre ile 150 metre aralığında her iki rotada koşulabilmesi için toplamda 18 adet örneklem veri setleri oluşturulmuştur. Şekil 4'de yer alan 1. rota 1'den 9'a kadar olan veri setleri, 2. Rota için 10'dan 18'e kadar olan veri setleri oluşturulmuştur. Bu veri setlerine ilişkin detaylı bilgi Tablo 1.'de verilmiştir.

Tablo 1. Deneysel Testler İçin Oluşturulmuş Veri Setleri

Rota Numarası	Hız (m/s)	İrtifa (m)	Yol Nokta Sayısı	Süre (Sn)
1. Veri Seti	10	100	2005	100.2
2. Veri Seti	10	125	2005	100.2
3. Veri Seti	10	150	2005	100.2
4. Veri Seti	20	100	1017	50.8
5. Veri Seti	20	125	1017	50.8
6. Veri Seti	20	150	1017	50.8
7. Veri Seti	40	100	536	26.75
8. Veri Seti	40	125	536	26.75
9. Veri Seti	40	150	536	26.75
10. Veri Seti	10	100	1287	64.3
11. Veri Seti	10	125	1287	64.3
12. Veri Seti	10	150	1287	64.3
13. Veri Seti	20	100	673	33.6
14. Veri Seti	20	125	673	33.6
15. Veri Seti	20	150	673	33.6
16. Veri Seti	40	100	389	19.4
17. Veri Seti	40	125	389	19.4
18. Veri Seti	40	150	389	19.4

2.2 Görsel Eş Zamanlı Konumlandırma ve Haritalama Tekniği (vSLAM)

vSLAM, temel olarak görsel tabanlı haritalama ve konumlandırma algoritmalarıdır ve temel olarak ilkleme, takip ve haritalama olmak üzere 3 ana başlık altında incelenmektedir. Bu temellere ek olarak hesaplama karmaşıklığının indirgenmesi ve elde edilen harita çözünürlüğünün artırılması için döngü tamamlama yöntemleri de kullanılmaktadır. Barros, Michel, Moline, Corre, ve Carrel 2022 yılında gerçekleştirmiş oldukları, vSLAM yaklaşımını ve literatürdeki vSLAM tekniklerini geniş çapta ele aldıkları ve bir inceleme niteliğinde gerçekleştirdikleri çalışmalarında, [16] literatürde kamera tabanlı gerçekleştirilmekte olan toplamda 8 adet vSLAM tekniği olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu çalışma, ORB-SLAM2 tekniğinin, ilkleme, haritalama, takip, optimizasyon ve döngü tamamlama tekniklerini kullanan bunların yanı sıra mono ve stereo kamera kameralar gibi farklı kamera yaklaşımlarını içeren, literatürde gömülü sistem impementasyonları [17,18] gerçekleştirilebildiğini ortaya koymaktadır [16]. Bu faydalar göz önüne alınarak bu çalışmada kamera tabanlı vSLAM tekniği olan ORB-SLAM2.0 ile çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Literatürde ORB-SLAM2.0 tekniğini içeren ve son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalar üzerinde incelemeler gerçekleştirildiğinde yüksek hız ve irtifalarda görev yapmakta olan sistemler ile ilgili az sayıda çalışma olduğu ve bunların da genellikle savunma alanında gerçekleştirilen çalışmalar olması nedeniyle sınırlı sayıda bilgiye ulaşılabilmektedir. Literatürde çalışmalar incelendiğinde ise farklı benzetim platformlarında, iç mekan ve robot platformlarında [19], daha küçük sistemli insansız hava araçlarında [20] ORB-SLAM2.0 tekniği ile gerçekleştirilmiş ve başarılı sonuçlar elde edilen çalışmalar görülmüştür [14,19,20,21]. Bu çalışmaların yanı sıra literatür incelemesi sırasında MATLAB Simulink UAV Toolbox eklentisi ile gerçekleştirilmiş olan vSLAM çalışmasına rastlanamamıştır.

Daha yüksek hız ve irtifalarda vSLAM tekniğinin uygulanabilirliğinin gözlemlenebilmesi için gerçekleştirilmiş olan bu çalışmada kullanılmakta olan ORB-SLAM2.0 [21] tekniğinin akış şeması aşağıdaki Şekil 1'de verilmiştir.

Akışı dört ana metod altında ele alınmıştır. Bunlar;

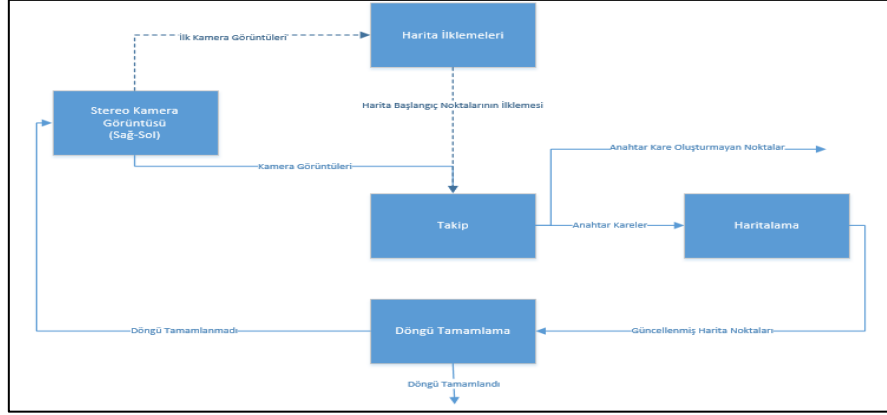
Harita İkleme : Stereo kameradan gelmekte olan ilk görüntüden başlangıçtaki konumdan elde edilmiş olan görüntünün üç boyutlu noktalarını oluşturarak haritanın ilk anahtar karesi (keyframe *.ing*) oluşturularak harita ilkleme gerçekleştirilmektedir.

Takip : Harita ilkleme tamamlandıktan sonra uçuş süresi boyunca stereo kameradan gelecek olan periyodik görüntüler takip aşamasında işlenerek bir önceki anahtar karedeki özellikler ile eşleştirilerek tahmin gerçekleştirilir ve yeni anahtar kareler elde edilmektedir.

Haritalama : Takip aşamasında elde edilen benzerlik bulunan her anahtar kareden üç boyutlu yol noktaları elde edilerek harita oluşturulmaktadır. Benzerlik bulunmayan anahtar kareler algoritma dışında tutulmaktadır.

Döngü Tamamlama : Elde edilmiş olan anahtar kareler birbirleri ile Kelime Çantası Yaklaşımı (Bag Of Features *.ing*) ile karşılaştırılarak anahtar karelerden bir tam tur döngüsünün algılanma aşamasıdır. Döngünün tamamlanmış olması haritalamanın tamamlandığı uçuş rotasının ilk noktasına tekrar dönüldüğünün bilgisini vermektedir.

Benzetim testleri sonrası algoritmanın başarımlı kriteri döngü tamamlamanın tamamlanarak haritanın oluşturulmuş olması, elde edilen haritanın rota irtifası ile uyumlu olması ve rota takibinin yapılmış olmasıdır.



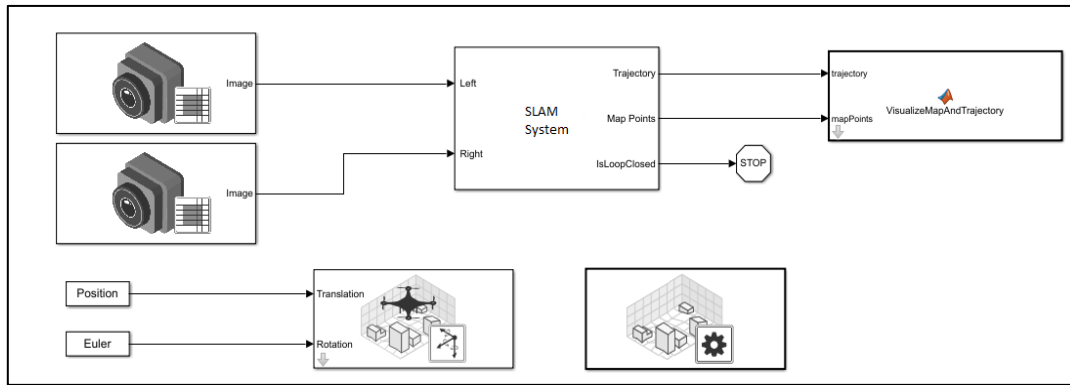
Şekil 1. vSLAM Tekniği MATLAB Kullanım Akış Şeması

2.2 Benzetim Ortam Ekipmanları

Deneyisel testlerde benzetim ortamı olarak Windows platformlarında sorunsuz çalışmakta olan Unreal Engine v4.25 ve MATLAB Simulink UAVToolbox eklentisi kullanılmıştır.

2.2.1 MATLAB Simulink UAVToolbox Eklentisi

UAVToolbox, MATLAB 2020b versiyonundan itibaren farklı işletim sistemlerinde Simulink üzerinden kullanıma açılmış olan bir eklentidir. Bu eklenti ile insansız hava araçları için algoritmalar, görev kontrolcileri tasarlamak, simüle etmek ve test etmek imkanları sağlamaktadır. Bunlara ek olarak Windows işletim sisteminde çalışabilme imkanı, MATLAB üzerinde yer almakta olan MATLAB Coder aracılığıyla farklı programlama dillerinde gerçek zamanlı sistemler üzerinde çalışabilecek kod üretme olanakları, UAV Toolbox'ta yer alan eklentiler aracılığıyla benzetim senaryolarını koşturabilmek için Mavlink gibi haberleşme protokollerine zaman harcama ihtiyacı gerektirmemesi, Unreal Engine platformu ile senkron ve sorunsuz bir şekilde çalışarak farklı senaryo oluşturma imkanı gibi avantajlar göz önüne alınarak bu çalışmada MATLAB 2021b sürümü kullanılmıştır. Şekil 2'de deney ortamı için kullanılmış olan benzetim senaryosunun Simulink ortamında diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 2. Simulink Benzetim Ortam Diyagramı

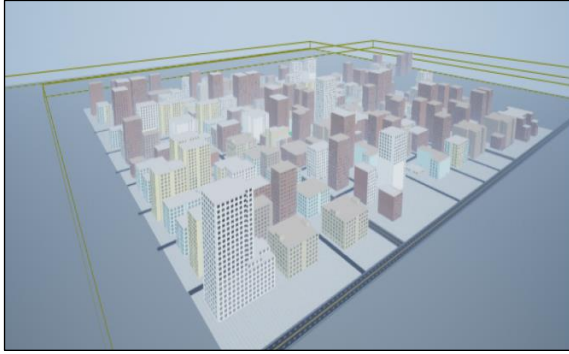
Şekil 2'de gösterilmekte olan Simulink benzetim ortamındaki ekipmanlar ve işlevleri aşağıdaki Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2. Benzetim Ortam Ekipmanları

Ekipmanlar	Benzetim Senaryosu İçin Kullanım Alanları
Kamera (2 Adet)	Senaryo içerisinde istenilen yörüngede uçuşu için konum ve yönelim bilgileri sağlanarak algoritmanın ihtiyaç duyduğu stereo görüntüyü algoritmaya istenilen periyotta iletmek için kullanılmaktadır.
İHA	Senaryoda benzetim uçuşu gerçekleştirerek algoritma test ekipmanıdır.
Senaryo	Unreal Engine v4.25 ile oluşturulan fotorealistik senaryonun MATLAB Simulink ile uyumlu koşması için kullanılmaktadır.
MATLAB Sistem Bloğu	vSLAM algoritmasının eş zamanlı olarak koşması için kullanılmaktadır.
Görselleştirme Ekipmanı	Test esnasında uçuş senaryosunu ve algoritma koştuktan sonra elde edilen haritanın görselleştirilmesi için kullanılmaktadır.
Konum ve Yönelim Verileri	Benzetim senaryosunda insansız hava aracının önceden planlanmış rotada yaklaşık 0.1 Mach hız, 150 metre irtifada uçuşu için hazırlanmış olan yol noktaları veri setidir.

2.2.2 Unreal Engine Oyun Motoru

Unreal Engine sanal bir oyun geliştirme motor platformudur. UAVToolbox ile birlikte gelen uyumluluk özelliği ile MATLAB Simulink'te eş zamanlı bir şekilde benzetim senaryosu koşulabilmektedir. Unreal Engine'nin çalışmalarda avantaj olarak bir özelliği ise fotorealistik yani gerçekçi bir benzetim ortamı oluşturulabilmesidir. Bu özellik sayesinde deneysel ortamlardaki benzetim senaryolarının hata payı azaltılabilmektedir. Unreal Engine v4.25 oyun motoru yardımı ile yaklaşık 0.5 km² boyutunda bir benzetim ortamı benzetim testleri için özel olarak oluşturulmuştur. Oluşturulmuş olan bu senaryoya ait bir örnek kesit Şekil 3 ile gösterilmektedir. Ayrıca benzetim testlerinde elde edilen kamera görüntülerine ait bir örnek görüntü de Şekil 3 ile gösterilmektedir.



a) Benzetim Senaryosu



b) Fotorealistik Örnek Kamera Görüntüsü

Şekil 3. Unreal Engine ile Oluşturulmuş Benzetim Senaryosu*

3. Deneysel Test Sonuçları

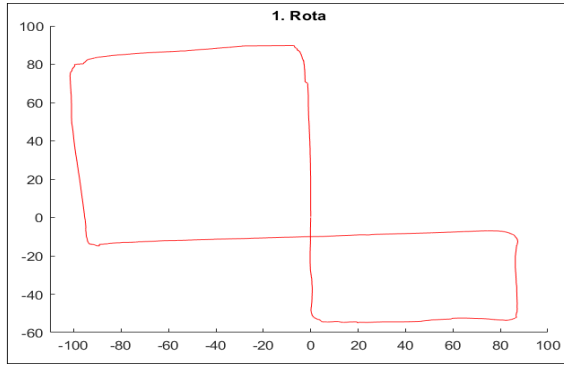
Benzetim ortam testleri için oluşturulmuş olan 18 adet veri setleri Tablo 1.'de yer almakta olan hız ve irtifaya göre hesaplanarak oluşturulmuştur. Ancak oluşturulmuş olan rota düz bir doğrultuda olmadığından sadece dönme noktalarında algoritmanın doğru bir şekilde koşabilmesi için 20mt/s'lik olan veri setlerinde %20, 40mt/s'lik olan veri setlerinde ise %25 yavaşlama payları mevcuttur. Oluşturulmuş olan veri setlerinden elde edilen rotalar Şekil 4'de gösterilmektedir. MATLAB ortamında sırasıyla gerçekleştirilmiş olan 18 adet benzetim testlerinin sonucu elde edilen veriler Tablo 3.'de verilmektedir. Burada yer alan döngü tamamlama, harita oluşumu, rota takibi ve irtifa takibi MATLAB Simulink ile elde edilmiş olan 3 boyutlu harita üzerinden gözlemlenmiştir. Ayrıca en düşük hız, en düşük irtifa profili ile en yüksek hız, en yüksek irtifa profilinde gerçekleştirilmiş olan deneysel testlere ait 3 boyutlu harita ve konumlandırma grafikleri ve 3 boyuta göre yükselti bilgi tablosu ise Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmiştir.

*Şekil 3'te yer ekran görüntüsü Unreal Engine platformu kullanılarak benzetim senaryosuna özel olarak tasarlanmıştır.

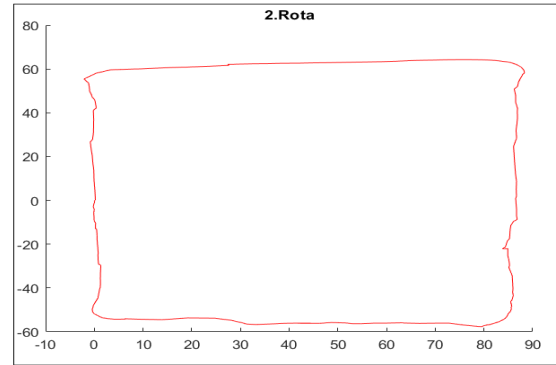
Tablo 3. 18 Adet Veri Seti ile Gerçekleştirilen Benzetim Test Sonuçları

Rota Numarası	Döngü Tamamlama	Harita Oluşumu	Rota Takibi	İrtifa Takibi
1. Veri Seti	Gerçekleştirildi	Gerçekleştirildi	Yapıldı	100 Metre
2. Veri Seti	Gerçekleştirildi	Gerçekleştirildi	Yapıldı	125 Metre
3. Veri Seti	Gerçekleştirildi	Gerçekleştirildi	Yapıldı	150 Metre
4. Veri Seti	Gerçekleştirildi	Gerçekleştirildi	Yapıldı	100 Metre
5. Veri Seti	Gerçekleştirildi	Gerçekleştirildi	Yapıldı	125 Metre
6. Veri Seti	Gerçekleştirildi	Gerçekleştirildi	Yapıldı	150 Metre
7. Veri Seti	Gerçekleştirildi	Gerçekleştirildi	Yapıldı	100 Metre
8. Veri Seti	Gerçekleştirildi	Gerçekleştirildi	Yapıldı	125 Metre
9. Veri Seti	Gerçekleştirildi	Gerçekleştirildi	Yapıldı	150 Metre
10. Veri Seti	Gerçekleştirildi	Gerçekleştirildi	Yapıldı	100 Metre
11. Veri Seti	Gerçekleştirildi	Gerçekleştirildi	Yapıldı	125 Metre
12. Veri Seti	Gerçekleştirildi	Gerçekleştirildi	Yapıldı	150 Metre
13. Veri Seti	Gerçekleştirildi	Gerçekleştirildi	Yapıldı	100 Metre
14. Veri Seti	Gerçekleştirildi	Gerçekleştirildi	Yapıldı	125 Metre
15. Veri Seti	Gerçekleştirildi	Gerçekleştirildi	Yapıldı	150 Metre
16. Veri Seti	Gerçekleştirildi	Gerçekleştirildi	Yapıldı	100 Metre
17. Veri Seti	Gerçekleştirildi	Gerçekleştirildi	Yapıldı	125 Metre
18. Veri Seti	Gerçekleştirildi	Gerçekleştirildi	Yapıldı	150 Metre

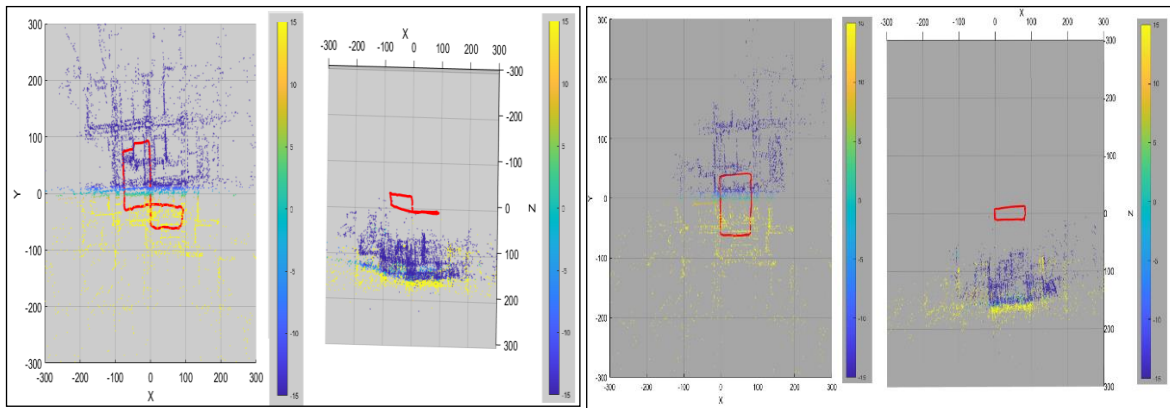
Elde edilen 18 adet test sonuçları incelendiğinde, benzetim senaryolarının istenilen kriterleri başarıyla tamamlamış olduğu gözlemlenmiştir. Harita sonuçları kıyaslandığında ise elde edilen 3 boyutlu haritalamanın hız ve irtifaya bağlı olarak hız ve irtifa arttıkça daha seyrelmekte olduğu gözlemlenmiştir.



a) 6 dönemeçten oluşan rota

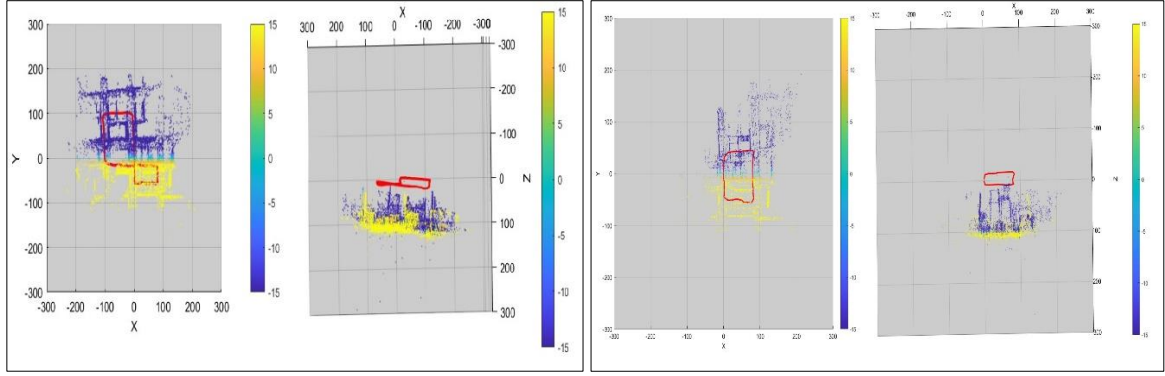


b) 4 dönemeçten oluşan rota

Şekil 4. Deneysel Test için Oluşturulmuş Rotalar

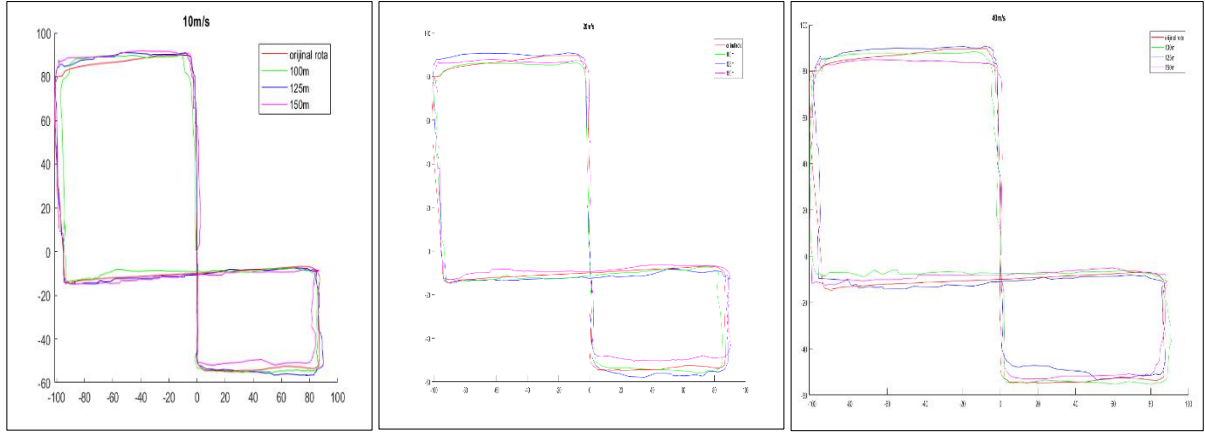
a) 9. Veri Seti Test Sonucu Elde Edilen Harita(X-Y,X-Z) b) 18. Veri Seti Test Sonucu Elde Edilen Harita (X-Y,X-Z)

Şekil 5. En Yüksek Hız ve İrtifadan Oluşan Veri Setlerinin Her İki Rota İçin Elde Edilen Test Sonuç Haritaları



a) 1. Veri Seti Test Sonucu Elde Edilen Harita(X-Y,X-Z) b) 10. Veri Seti Test Sonucu Elde Edilen Harita(X-Y,X-Z)

Şekil 6. En Düşük Hız ve İrtifadan Oluşan Veri Setlerinin Her İki Rota İçin Elde Edilen Test Sonuç Haritaları

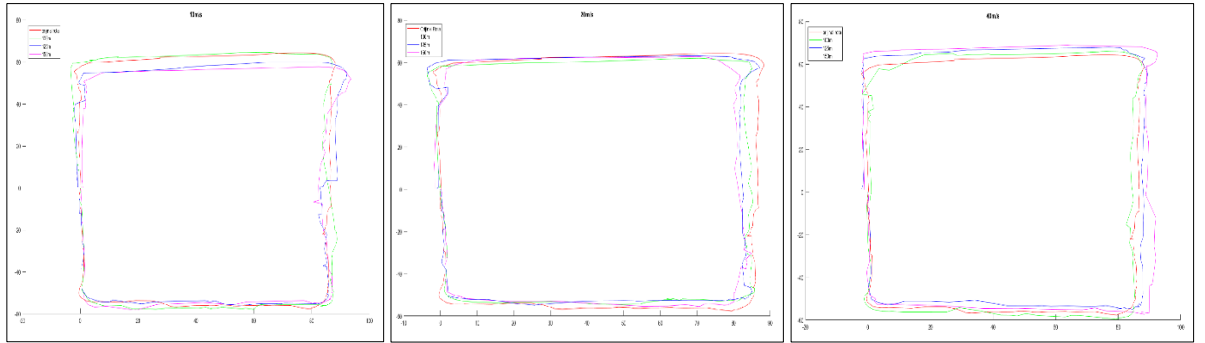


a) 10 mt/s

b) 20mt/s

c) 40mt/s

Şekil 7. 1.Rota İçin Farklı Hızlarda 100m, 125m, 150m İrtifada Rota Takibi İzdüşüm Haritaları

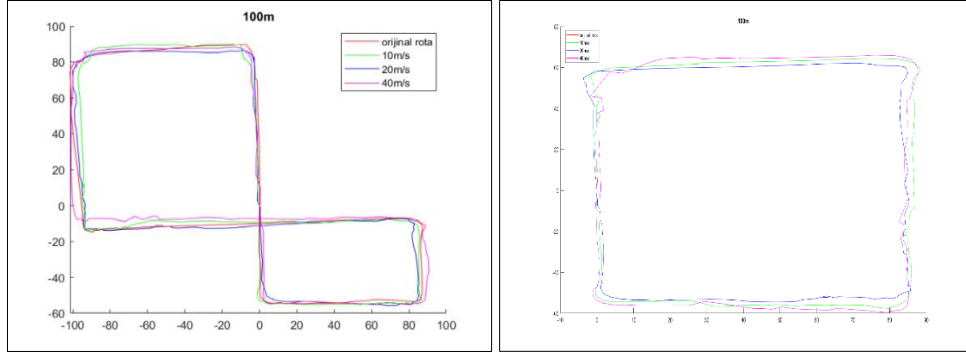


a) 10 mt/s

b) 20mt/s

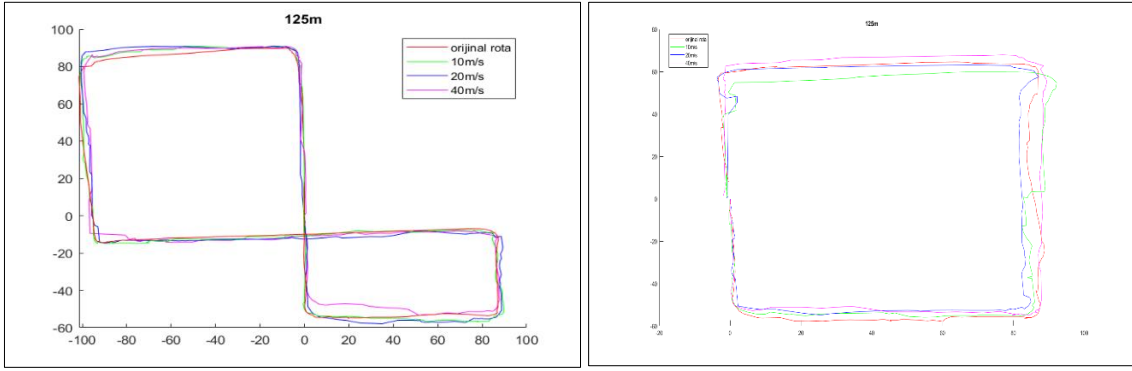
c) 40mt/s

Şekil 8. 2 Rota İçin Farklı Hızlarda 100m, 125m, 150m İrtifada Rota Takibi İzdüşüm Haritaları



a) 1.Rota için 10mt/s,20mt/s ve 40mt/s'de İzdüşümler b) 2.Rota için 10mt/s,20mt/s ve 40mt/s'de İzdüşümler

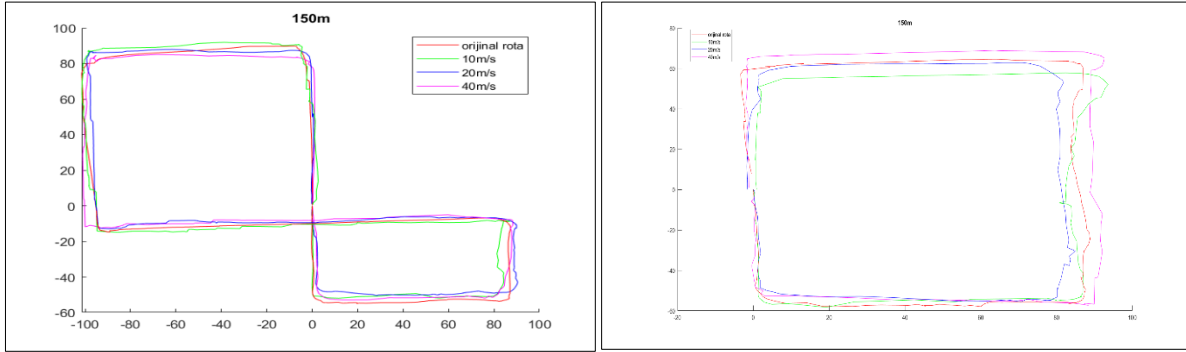
Şekil 9. Her İki Rota için 100m İrtifada Farklı Hızlarda Rota Takibi İzdüşüm Haritaları



a) 1.Rota için 10mt/s,20mt/s ve 40mt/s'de İzdüşümler

b) 2.Rota için 10mt/s,20mt/s ve 40mt/s'de İzdüşümler

Şekil 10. Her İki Rota için 125m İrtifada Farklı Hızlarda Rota Takibi İzdüşüm Haritaları



a) 1.Rota için 10mt/s,20mt/s ve 40mt/s'de İzdüşümler

b) 2.Rota için 10mt/s,20mt/s ve 40mt/s'de İzdüşümler

Şekil 11. Her İki Rota için 150m İrtifada Farklı Hızlarda Rota Takibi İzdüşüm Haritaları

Şekil 7a, Şekil 7b, Şekil 7c, Şekil 8a, Şekil 8b ve Şekil 8c'de yer almakta olan 100 m ile 150 m arası irtifa ile 10 mt/s ile 40 mt/s hız profillerindeki benzetim uçuş izdüşüm verileri incelendiğinde %90 üzerinde benzerlikle orijinal rotaların takip edildiği gözlemlenmektedir. Şekil 9a, Şekil 9b, Şekil 10a, Şekil 10b, Şekil 11a ve Şekil 11b'de yer almakta olan benzetim uçuş izdüşüm verileri MATLAB üzerinde incelendiğinde ise 100m irtifada yaklaşık %98.3, 125m irtifada %96.3 oranında, 150m irtifada ise %94.4 oranında benzerlikle orijinal rotaların takip edilmekte olduğu gözlemlenmektedir. Veriler sabit irtifa değişken hız profillerinde incelendiğinde ise 10mt/s'de yaklaşık %98, 20mt/s'de %95.1, 40mt/s'de ise %90.8 oranında orijinal rotaların takip edilmekte olduğu gözlemlenmektedir. Bu veriler üzerinden hız her iki katına çıkarıldığında rota takip benzerliğinin yaklaşık %3 oranında düştüğü, hız artırıldıkça rota takip benzerliğinin yaklaşık %2 oranında düştüğü gözlemlenmiştir.

Elde edilen izdüşümleri incelendiğinde, orijinal rotadan sapmaların genellikle oluşturulmuş rotaların dönemeçli bölümlerinde olduğu gözlemlenmektedir. Bu sapmaların sebebinin ise hız arttıkça algoritmaya girdi yapılan görüntülerin sayısının düşüş göstermesi olduğu düşünülmektedir. Algoritmaya beslenmekte olan veri sayısının düşüşü aynı zamanda haritalama için gerekli çevre görüntülerinin seyrelmesine ve görüntüler arası elde edilen anahtar karelerin daha az elde edilerek haritalama çözünürlüğünün düşüş göstermesine neden olduğu düşünülmektedir. Dönemeç noktalarında haritalama çözünürlüğünün düşüş göstermesi nedeniyle rota takibinde sapma payının yükseldiği ve hızın arttıkça bu sapma paylarının daha da artacağı hatta döngü tamamlama açısından bir kısıt oluşturabileceği öngörülmektedir. Oluşturulmuş rotaların düz bölümlerinde ise sapmaların çok düşük miktarda veya dönemeçten ötürü oluşan sapmanın düzeltilmesi için geçen süreçte olduğu görülmektedir. Ayrıca gerçekleştirilen bu çalışmada benzetim senaryo ortamı anahtar kare oluşturabilmek için pek çok bina, yerleşke gibi nesnelere bulunması sebebiyle 25 metre irtifa artışlarının rota takip benzerlik oranlarına dönemeçlerdeki gibi ciddi bir etkisi gözlemlenmemiştir. Ancak kameradan gelmekte olan görüntülerde anahtar kare elde etmek için kullanılmakta olan nesnelere daha az olması durumunda irtifa artışının anahtar kare elde etmek için bir kısıt olabileceği düşünülmektedir.

Nobis, Papanikolaou, Betz ve Lienkamp'ın gerçekleştirdiği çalışmada[20], hem iç mekan hem dış mekanda farklı hızlarda ORB-SLAM2.0 performanslarını elde etmişlerdir. Bu çalışma her ne kadar benzer irtifada ve benzer platformlarda gerçekleştirilmemiş olsa da benzer hızlar için dış mekan rota takip benzerlik verileri ile kıyaslanmıştır. Çalışmada dış mekan deneysel testleri için 6 mt/s ile 42 mt/s aralığındaki testlerde 10mt/s'de yaklaşık %99,93, 20 mt/s'de %99,87 ve 40 mt/s'de yaklaşık %93,88 olmak üzere %93,88'in üzerinde rota takibi elde edildiği verilmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışmada ise yukarıda verildiği üzere 10mt/s'de yaklaşık %98, 20mt/s'de %95.1, 40mt/s'de ise %90.8 oranında olmak üzere rota takip benzerlik oranı %90'in üzerindedir.

4. Sonuç ve Öneriler

Gerçekleştirilen bu çalışmada, daha yüksek irtifa ve hızda uçmakta olan ve konumlandırma ihtiyacı bulunan insansız sistemlere vSLAM algoritmalarından ORB-SLAM2.0 tekniğinin ön analiz çalışması yapılmıştır. Bu kapsamda, Unreal Engine platformunda önceden hazırlanmış olan 0.5 km²'lik benzetim senaryo ve bu senaryo üzerinde planlanmış 2 farklı rota ve 18 adet veri seti bulunmaktadır. Bu rotaların ilki 6 adet dönemeçten oluşmakta, ikincisi ise 4 adet dönemeçten oluşmaktadır. Her iki rota içinde oluşturulan veri setleri, MATLAB Simulink benzetim ortamında otonom test uçuşlarını başarıyla tamamlamışlardır. Veri setleri sırasıyla otonom test uçuşlarında stereo kameralardan gelmekte olan fotorealistik benzetim görüntüleri ORB-SLAM2.0 algoritmasına beslenmiş olup algoritma tarafından döngü tamamlaması algılanmış ve 3 boyutlu harita ve harita üzerinde konumlandırma planlanan rotaya uygun şekilde başarıyla gerçekleştirilmiştir. Ayrıca benzetim testlerinin %90 in üzerinde rota takibinin gerçekleştirildiği gözlemlenmiştir.

Bu çalışma, literatür taraması sonucunda yüksek hız ile gerçekleştirilen vSLAM uygulamalarına rastlanmış olsa da yüksek hız ve irtifada uçmakta olan insansız sistemler için vSLAM uygulamalarına rastlanamaması sebebiyle vSLAM tekniklerinin yüksek hız ve irtifada görev yapmakta olan platformlarda da kullanılabilir olduğunu göstermeyi hedeflemektedir. Çalışma sonucunda elde edilen veriler vSLAM tekniklerinden olan ORB-SLAM2.0 algoritmasının yüksek irtifa ve hızda görevini icra etmekte olan gerçek zamanlı sistemler açısından uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Bunlara ek olarak, daha önce MATLAB platformunda benzer bir konumlandırma ve haritalama gerçekleştirilmemiş olması sebebiyle bu tür benzetim çalışmalarının farklı bir işletim sistemi ve protokoller ile çalışma gereksinimi olmadan MATLAB platformunda gerçekleştirilebileceği ve MATLAB'in sunmakta olduğu kullanım kolaylığı, benzetim ortam kolaylığı ve gerçek zamanlı çalışmakta olan sistemler için sunduğu imkanlardan faydalanılabileceğini ortaya koymayı amaçlamaktadır.

Gerçekleştirilmiş olan bu benzetim çalışması, maliyet ve kullanım kolaylığı açısından i7 işlemci performanslı bir dizüstü bilgisayarda Windows platformunda gerçekleştirilmiştir. İşlemci kapasitesinin sınırlı olmasından dolayı benzetim senaryolarında kısıtlamalar yapılmak durumunda kalmıştır. Bu nedenle, hız ve irtifa arttıkça SLAM algoritma sonuçlarının daha yüksek çözünürlükte elde edilebilmesi için hesaplama kapasitesi daha güçlü olan sistemlere ihtiyaç olduğu düşünülmektedir.

Gerçekleştirilmiş olan çalışmanın ışığında, gelecek çalışmalar açısından yapılabilecekler değerlendirildiğinde, deneysel çalışmalar için farklı benzetim senaryo ortamları üretilerek benzetim haritalarının farklı rota, irtifa ve hızlar ile çeşitlendirilmesi, farklı görüntü tabanlı vSLAM teknikleri ile performans kıyaslama testlerinin yapılmasının algoritma iyileştirmelerine ve daha yüksek çözünürlüklü sonuçların elde edilmesine katkıda bulunacağı düşünülmektedir.

Kaynaklar

- [1] Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied geomatics*, 6(1), 1-15.
- [2] Cracknell, A. P. (2017). UAVs: regulations and law enforcement. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10), 30543067.
- [3] Rieke, M., Foerster, T., Geipel, J., & Prinz, T. (2011). High-precision positioning and real-time data processing of UAV systems. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38(1/C22).
- [4] Huang, B., Liu, J., Sun, W., & Yang, F. (2019). A robust indoor positioning method based on Bluetooth Low Energy with separate channel information. *Sensors*, 19(16), 3487.
- [5] Liu, J., Chen, R., Chen, Y., Pei, L., & Chen, L. (2012). iParking: An intelligent indoor location-based smartphone parking service. *Sensors*, 12(11), 14612-14629.
- [6] Aulinas, J., Petillot, Y., Salvi, J., & Lladó, X. (2008). The SLAM problem: a survey. *Artificial Intelligence Research and Development*, 363-371.
- [7] Castellanos, J. A., & Neira, J. ve Tardos, JD, 2006. *Lecture Notes on SLAM and Consensus in Data Association*, Department of Informatics and System Engineering, University. Zaragoza.
- [8] Bailey, T., & Durrant-Whyte, H. (2006). Simultaneous localization and mapping (SLAM): Part II. *IEEE robotics & automation magazine*, 13(3), 108-117.
- [9] H. F. Durrant-Whyte and T. Bailey, "IEEE Robot. Autom. Mag.", vol. 13, no. 2, pp. 99–110, Jun. 2006.
- [10] Särkkä, S., Vehtari, A., & Lampinen, J. (2007). Rao-Blackwellized particle filter for multiple target tracking. *Information Fusion*, 8(1), 2-15.
- [11] Globally Consistent Range Scan Alignment for Environment Mapping(Lu, Millos 1997)
- [12] Davison, A. J., Cid, Y. G., & Kita, N. (2004). Real-time 3D SLAM with wide-angle vision. *IFAC Proceedings Volumes*, 37(8), 868-873. [13] Thrun, S., & Montemerlo, M. (2006). The graph SLAM algorithm with applications to large-scale mapping of urban structures. *The International Journal of Robotics Research*, 25(5-6), 403-429.
- [13] Lemaire, T., Berger, C., Jung, I. K., & Lacroix, S. (2007). Vision-based slam: Stereo and monocular approaches. *International Journal of Computer Vision*, 74(3), 343-364.
- [14] Nobis, F., Papanikolaou, O., Betz, J., & Lienkamp, M. (2020, September). Persistent map saving for visual localization for autonomous vehicles: An orb-slam 2 extension. In *2020 Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)* (pp. 1-9). IEEE.
- [15] A. Geiger, P. Lenz, C. Stiller, and R. Urtasun, "Vision meets robotics: The kitti dataset," *International Journal of Robotics Research (IJRR)*, 2013.
- [16] Macario Barros, A., Michel, M., Moline, Y., Corre, G., & Carrel, F. (2022). A comprehensive survey of visual slam algorithms. *Robotics*, 11(1), 24.
- [17] Abouzahir, M.; Elouardi, A.; Latif, R.; Bouaziz, S.; Tajer, A. Embedding SLAM algorithms: Has it come of age? *Robot. Auton. Syst.* 2018, 100, 14–26.
- [18] Yu, J.; Gao, F.; Cao, J.; Yu, C.; Zhang, Z.; Huang, Z.; Wang, Y.; Yang, H. CNN-based Monocular Decentralized SLAM on embedded FPGA. In *Proceedings of the 2020 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops (IPDPSW)*, New Orleans, LA, USA, 18–22 May 2020; pp. 66–73.
- [19] Yang, G., Chen, Z., Li, Y., & Su, Z. (2019). Rapid relocation method for mobile robot based on improved ORB-SLAM2 algorithm. *Remote Sensing*, 11(2), 149.
- [20] Tang, E., Niknam, S., & Stefanov, T. (2019, August). Enabling cognitive autonomy on small drones by efficient on-board embedded computing: An ORB-SLAM2 case study. In *2019 22nd Euromicro Conference on Digital System Design (DSD)* (pp. 108-115). IEEE.
- [21] Mur-Artal, Raul, and Juan D. Tardós. "ORB-SLAM2: An open-source SLAM system for monocular, stereo, and RGB-D cameras." *IEEE Transactions on Robotics* 33, no. 5 (2017): 1255-1262.

Cevher Hazırlama Tesislerinden Çıkan Atıklar ve Yönetimi

Hasan HACİFAZLIOĞLU^{1*}, Hilal ŞAHİN²

^{1,2} Maden Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İstanbul, Türkiye
^{*1} hasanh@iuc.edu.tr, ² hilaalsahin99@gmail.com

(Geliş/Received: 02/09/2022;

Kabul/Accepted: 29/11/2022)

Öz: Cevher hazırlama tesisleri kompleks tesisler olup, bu tesislerden katı, sıvı ve gaz halinde çeşitli atıklar çıkabilmektedir. Genellikle sulu proseslerden geçen atıkların içerisinde çoğu zaman çeşitli kimyasallar bulunabilmektedir. Proseste kullanılan zenginleştirme yönteminin türüne göre atıkların içerikleri de değişmektedir. Kimi atıklar tamamen zararsız doğal taşlardan oluşurken, kimi atıklar ise siyanür, sülfür, yağ asidi, alkol ve kostik gibi zararlı kimyasallar içerebilir. Böyle durumlarda atıklara muamele de farklılık gösterir. Her maden türü için farklı bir atık bertaraf metodu izlenmelidir. Bu çalışmada, yasal müeyyidelerle de kontrol altına alınmış olan cevher hazırlama tesislerinden çıkan atıklar ve atıkların yönetimi ele alınmıştır.

Anahtar kelimeler: Cevher hazırlama, Atık, Gürültü, Toz, Gaz

Wastes from Mineral Processing Plants and Its Management

Abstract: Ore preparation facilities are complex facilities and various wastes in the form of solid, liquid and gas can come out of these facilities. Generally, various chemicals can be found in the wastes that pass through the aqueous processes. According to the type of enrichment method used in the process, the contents of the wastes also change. While some wastes consist entirely of harmless natural stones, some wastes may contain harmful chemicals such as cyanide, sulfur, fatty acid, alcohol and caustic. In such cases, the treatment of waste also differs. A different waste disposal method should be followed for each mine type. In this study, the wastes from the ore preparation facilities, which are also under control with legal sanctions, and the management of wastes are discussed.

Key words: Mineral Processing, Waste, Noise, Dust, Gas

1. Giriş

Madencilik sektörü dinamik bir sektör olup, itici gücüyle birçok ülkenin ekonomik zenginliğinin ve gelişiminin temelini oluşturmaktadır. Madencilik, katma değeri en yüksek olan sektörler arasındadır. Günümüzün ileri teknolojisi, madencilğe getirdiği avantajlarla sektörün büyümesinde önemli bir rol oynamıştır. Yeni yöntemlerin geliştirilmesiyle birlikte madenin yeraltından çıkarılması, kırılıp öğütülmesi, zenginleştirilmesi, susuzlandırılması, kurutulması ve nakliyesi gibi işlemlerde verimlilik giderek artmış ve bu sayede üretimde gözle görülür artışlar ve kârlar elde edilmiştir. Ancak, üretimlerin artmasıyla birlikte maden atıklarında da hızlı bir artış görülmüştür. Çünkü maden ocaklarından çıkarılan cevherler bilindiği gibi doğrudan piyasaya sürülememekte, “cevher hazırlama” dediğimiz, içerisinde kırma, öğütme ve sınıflandırmayı da içeren bir dizi boyut küçültme ve zenginleştirme işleminden geçmektedir. Bu tesislerde genellikle sulu prosesler bulunmakta ve cevher sulu bir ortam içerisinde “pasa” denilen taşından ayrıştırılmaktadır. Cevher hazırlama tesislerinde atık oluşumu kaçınılmaz olarak vardır ve bertaraf edilmesi zaruridir. Bu işlemlerin sonucunda, ister istemez birtakım atıklar ortaya çıkmaktadır. Çıkan atık miktarı ve tehlikesi, çıkarılan cevherin türüne, tenörüne, içeriğine ve tane boyutuna bağlı olarak değişmektedir. Örneğin Siyanür liçi uygulanan altın ve gümüş zenginleştirme tesislerinde (dünyadaki tesislerin %80’inde siyanür liçi uygulanır) işlenen cevherin hemen % 99’u atık olarak çıkmakta ve bu atıklar genellikle önemli oranlarda siyanür kimyasalı içermektedir. Çünkü altın ve gümüş madenlerinde değerli mineral yüzdesi %0.1’den bile çok daha azdır. Geri kalan kısım daha çok

* Sorumlu yazar: hasanh@iuc.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0003-1651-7779, ² 0000-0002-0168-389X

taşlardan oluşan atıktır. Demir, mangan, antimon ve krom gibi madenlerde ise atık oranı %40'lara kadar düşebilmektedir. Çünkü bu cevher tiplerinde değerli mineral içeriği %60'lara kadar çıkabilmektedir. En tehlikeli atıklar ise; uranyum ve toryum gibi radyoaktif minerallerin işlendiği tesislerdir ve bu tesislerde ilave radyasyon güvenlik önlemleri alınmalıdır [1-3]. İnşaat imalatında kullanılan; kum, çakıl, kırma taş, çimento ve seramik gibi hammaddelerin üretiminde ise atık olarak genellikle zararsız kil, çamur, toprak ve doğal taşlar ortaya çıkmaktadır. Bunlar kimyasal içermedikleri için zararsız atıklardır. Kömür madenciliğinde ve kömür yıkama tesislerinde kimyasal kullanılmadığı için (gravite ile zenginleştirme) çoğunlukla zararsız atıklar oluşmaktadır. Önemli oranlarda kükürt içeren kömürlerde ise asidik maden drenajı oluşabileceği için ilave güvenlik önlemleri alınmalıdır. Yine kömür madenlerinde yan taş silisyumlu ve killi kayalardan oluşmakta olup, bu malzemeler inert malzemeler olarak bilinmektedir.

Türkiye'de 1000'e yakın cevher hazırlama tesisi bulunmaktadır. Bunlar endüstriyel hammaddeler (kalsit, barit, kuvars, bor, feldispat, olivin, kaolen, bentonit, perlit vb), metalik madenler (altın, bakır, gümüş, çinko, krom, manganez, demir vb) ve kömür-linyit gibi enerji hammaddelerini işleyen tesislerdir. Çimento, cam ve seramik sektörleri de entegre tesisler olup, prosesin herhangi bir bölümünde cevher hazırlamayı gerektiren işlemler barındırırlar. TÜİK verilerine göre maden işletmelerinden oluşan atık miktarı 2020 yılı için 27 milyon 581 bin 875 tondur [4]. Bu rakama dekapaj malzemesinin de dahil edilmesiyle birlikte atık miktarının 50 milyon tona yaklaşacağı tahmin edilmektedir. Cevher hazırlama tesislerinden açığa çıkan atığın türüne göre alınacak önlemler de değişiklik gösterir. Bunun için oluşan atık iyi tanımalı ve ne gibi zararlara sebep olacağı iyi bilinmelidir. Atığın düzenli olarak takibi ve kimyasal analizi yapılmalıdır. Ayrıca alınacak önlemlerin çeşitli faktörlerden etkilenebileceğini göz önünde bulundurmalı ve bertaraf şekli buna uygun bir şekilde yürütülmelidir. Bu bağlamda ülkemizde 2015 yılında Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından 29417 sayılı "Maden Atıkları Yönetmeliği" yayınlanmıştır [5]. Bu yönetmeliğin amacı; madenlerin aranması, çıkarılması, hazırlanması/zenginleştirilmesi veya depolanması sonucunda ortaya çıkan atıkların üretiminden nihai bertarafına kadar çevre ve insan sağlığına zarar vermeyecek şekilde yönetilmesine ilişkin usul ve esasları düzenlemektir. Tesislerden çıkan atıklar bu yönetmeliğe uygun olarak bertaraf edilmelidir.

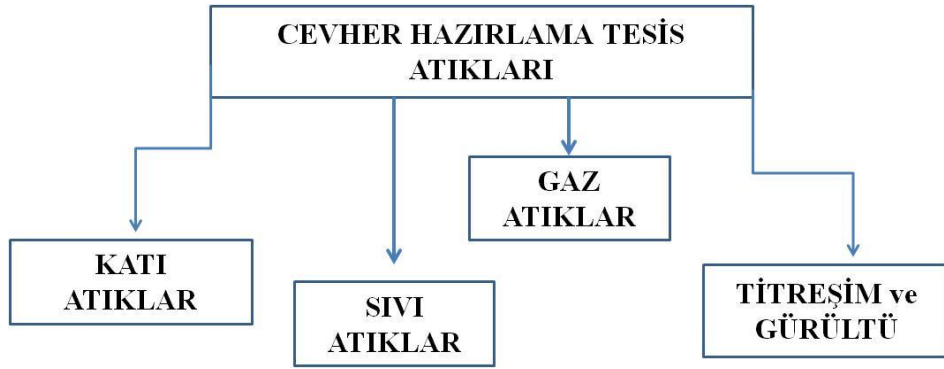
Cevher hazırlama tesislerinden katı, sıvı, gaz atıklar ile birlikte önemli derecede titreşimle birlikte gürültü de oluşmaktadır. İşlenen madenin türüne bağlı olarak oluşan atıklar da doğal olarak değişiklik gösterir. Zenginleştirme yöntemi seçimini; cevherdeki minerallerin türleri ve serbestleşme tane boyutları belirler. Ayrıca, ayırıştırma cihazının ekonomikliği ve verimi de yöntem seçiminde etkilidir. Flotasyon, aglomerasyon, seçimli flokülasyon, agloflotasyon, amalgamasyon ve liç ile zenginleştirme yöntemleri sulu ortamda çeşitli kimyasallar kullanılarak yapılır. Bu kimyasallardan en tehlikelileri siyanür ve civadır. Siyanür ve civa zehirli kimyasallardır ve kullanımında ilave tedbirler gerektirir. Civa ile altın ve gümüş kazanımı terk edilmiş olsa da, özellikle siyanür tüm dünyada altın madenciliğinin %80'inde güvenli bir şekilde kullanılmaktadır. Civa ile altın ve gümüşün kazanımı sadece gelişmemiş bazı ülkelerde, yoksul halk tarafından pilot ölçekte uygulanmaktadır. Gravite (yoğunluk farkına göre ayırıştırma), manyetik ve elektrostatik zenginleştirme yöntemlerinde ise herhangi bir kimyasal kullanılmaz ve prosten zararlı atıklar çıkmaz. Yine benzer şekilde kuru zenginleştirme yapan tesislerden de zararlı atıklar çıkmaz. Ayrıca proses kuru olduğu için sulu atık da oluşmaz. Kuru tesislerde genellikle katı atık, toz ve gürültü kaçınılmaz olarak oluşur. Yine, inert bir cevherden (örneğin kuvars, silis kumu kil mineralleri vb gibi) gaz atık oluşumu ya da suyla kimyasal tepkime ya da asit oluşumu mümkün değildir. Ancak hemen hemen her tesisten katı atık çıkabilir. Madencilikte katı atıkların çoğu doğal taşlardan oluşan inert atıklar iken, bazıları kimyasal içeren ya da reaksiyona meyilli atıklardan oluşabilir. Örneğin sülfür içeren cevherler (bakır, kurşun, çinko mineralleri) açık alanlarda su ile temas ettiğinde AMD (Asidik Maden Drenajı) denilen asit ve ağır metaller oluşturabilmektedir [6]. Bu asidin bertarafı için genellikle kireçle nötralizasyon yapılır ancak ağır metallerin tutulması için aktif karbon adsorpsiyonu gibi bazı teknolojilerin uygulanması gerekir.

Bu çalışmanın konusu; mevzuatı da dikkate alarak madenciliğin bir dalı olan cevher hazırlama tesislerinden çıkan atıklar ve bu atıkların yönetimi hususudur. Çoğunluğu zararsız olan maden atıkları katı, sıvı ve gaz formunda olabilir ve her biri ayrı bir bertaraf yöntemi gerektirir. Bu çalışmada bu yöntemler genel olarak ele alınmış ve bir takım güvenlik önlemlerinden bahsedilmiştir.

2. Cevher Hazırlama Tesislerinde Oluşan Atıklar

Klasik bir cevher hazırlama tesisinde, değerli mineral alındıktan sonra geriye katı bir atık ile sulu bir çamur kalır. Bu çamur çoğunlukla zararsız olup, kil, silt, toprak ve kum gibi ince parçacıklardan oluşur. Ancak tesiste ayırıştırma "liç" ya da "flotasyon" gibi yöntemlerle yapılıyorsa bu çamurun içerisine kimyasal reaktifler de

bulunur. Bu reaktifler, zenginleştirilen cevherin türüne bağlı olarak ksantat, alkol, yağ asidi, siyanür, asit, amin, kostik ya da çeşitli polimerler (anyonik, katyonik, noniyonik) olabilir. Kullanılan bu kimyasalları tekrar kullanmak çoğu zaman mümkün değildir. Ancak bozundurulması ya da bertaraf edilmesi yasal olarak zorunludur. Cevher hazırlama tesislerinden çıkan atıklar Şekil 1’de şematize edilmiştir. Buna göre, atıklar 4’e ayrılır. Katı atıklar; değersiz minerallerden oluşur, kısmen değerli mineral içerir, iri, ince veya toz halinde olabilirler. Toz ise bir diğer katı atık tipi olup, askıda kalan ince tanelerden oluşur ve cevher hazırlamanın kuru işlem gören kısımlarında sıklıkla bulunur. Sıvı atıklar ise su ve suyun içerisinde bulunan çeşitli iyonlar, çözülmüş kimyasallar ve koloidal tozlar ihtiva edebilirler. Çoğu zaman çamur formunda bulunurlar ya da çamurdan filtrasyonla süzülerek oluşurlar. Gaz atıklar ise; genellikle entegre tesislerden çıkan baca gazlarından oluşur. Örneğin kalsinasyon ve kavurma işlemleri sonucunda gaz oluşumu (CO, CO₂, NO vb.) kaçınılmazdır. Yine metal eritme fırınlarından çok değişik zehirli gazlar (H₂S, SO₂ vb.) çıkabilmektedir. Titreşim ve gürültü kirliliği ise cevher hazırlama tesislerinin olmazsa olmazıdır. Özellikle kırma, eleme ve öğütme gibi işlemlerde yüksek desibel değerlerinde (> 80dB) gürültü ve titreşim oluşur [7-9].



Şekil 1. Cevher hazırlama tesislerinde oluşan atıkların sınıflandırılması

3. Cevher Hazırlama Tesislerinde Atık Yönetimi

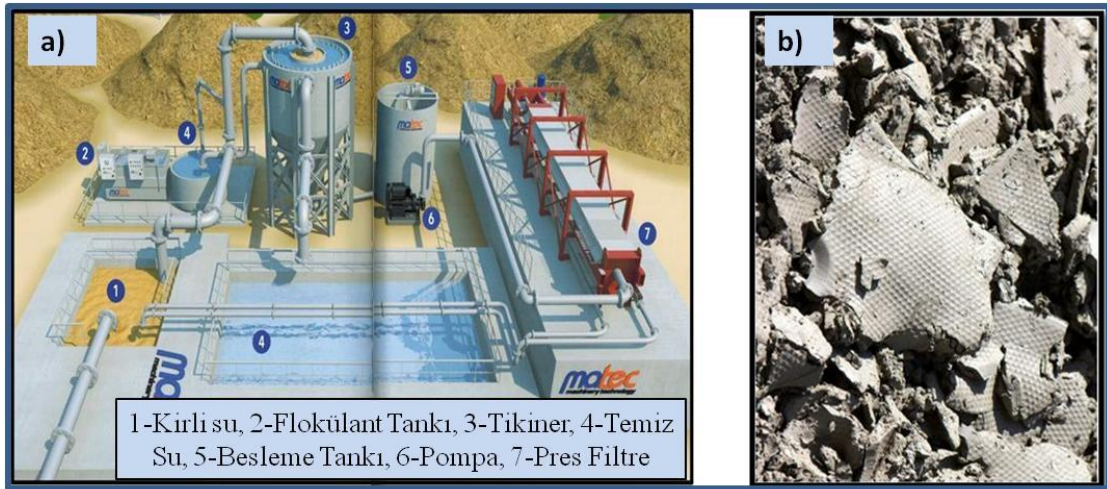
Atık yönetimi, atıkların özelliklerine göre kaynağında azaltılması, geri dönüştürülmesi, depolanması ve bertarafı gibi süreçleri içeren yönetim şeklidir. Cevher hazırlama tesislerinde atık yönetimi ise atığın fiziksel ve kimyasal özellikleri ile atık alanının iklimine, topografyasına, jeolojisine ve ülkenin yasal düzenlemeleri gibi çeşitli kriterlere bağlıdır. Uygulanan atık bertaraf yöntemleri; atık türüne, amaca, konuma ve drenajına göre değişiklik göstermektedir. Cevher hazırlama atıkları genellikle mevcut sahaların yüzeylerinde istifleme ya da barajlama yöntemi ile depolanmaktadır. Son zamanlarda katı atıkların yeraltında, maden boşluklarında depolandığı uygulamalar da mevcuttur. Atıkların yer altı boşluklarında dolgu olarak kullanılması, zemin veya duvarlara destek sağlama ve çökmeyi önleme açısından büyük avantajlara sahiptir. Ayrıca, derin deniz deşarjı denilen yöntemle çok ince çamur atıklar derin deniz diplerine basılarak bertaraf edilebilmektedir [2,10,11].

3.1 Katı atıklar ve yönetimi

Cevher hazırlama tesislerinden çıkan katı atıklar; iri ve ince boyutlu olmak üzere iki gruba ayrılır. İri boyutlu atıklar birkaç mm’den daha büyük olan atıklardır ve genellikle rüzgar, su gibi etkilerle daha az çevreye yayılan sorunsuz atıklardır. İstiflendikleri yerde hareketsiz olarak durabilirler. Genellikle iri boyutlarda yapılan fiziksel zenginleştirme işlemleri sonucunda açığa çıkarlar. Örneğin Jig ya da ağır ortam tesisi atıkları iri boyutludur. İri atıkların yığın halinde istiflenmesi kolaydır ve yüzey alanları daha küçük olduğu için daha az miktarda suyu absorbe ederler. Ancak yığındaki atık zamanla çözülebilir ve çeşitli kimyasal reaksiyonlara neden olabilir. Özellikle sülfürlü cevherlerin suyla temas sonucu asit ve ağır metaller oluşabilmektedir [12,13].

İnce atık olarak bilinen 1 mm’nin altındaki atıklar (genellikle 150 mikron boyutuna kadar) ise daha zor ve sorunlu istiflenir. Kurudukça tozuma ve akma riskleri vardır. Ayrıca büyük ve aktif yüzey alanları nedeniyle kimyasal tepkimelere de daha yatkındır. Rüzgar ve yağmurdan daha fazla etkilendiği için istiflenmesinde ekstra

önlemler gerektirir. Tane boyutu 150 mikronun altında olan şamlar ise en sorunlu atıklar olup, genellikle suyun içerisinde askıda ya da balçık halinde bulunurlar. Şamlar için özel barajlar yapılmalıdır. İstiflenmesi uygun değildir. Tesiste bulunan tikinerin alt akımını ya da hidrosiklonun üst akımını oluşturan bu şamların ileri derecede susuzlandırılması için filtreler kullanılır. Filtreden çıkan şamların nem içerikleri cevherin cinsine göre %10'lara kadar düşebilmektedir. Filtrede susuzlandırılıp kek haline getirilen şamların istiflenmesi daha kolaydır. Ancak filtrelerin ilk yatırım, bakım ve işletme maliyetleri fazla olduğu için işletmeciler tarafından çok tercih edilmemektedir. Bu durumda şamlar susuzlandırılmadan direkt atık barajlarına gönderilmekte ve devasa atık (şlam) barajları oluşmaktadır. Bu şamlar da çevre için ciddi tehdit oluşturur. İdeal olan şamların filtre edilip kek haline getirilmesidir. Ayrıca filtrasyon tesisi sayesinde su geri dönüşümü sağlanır ve tesislerde daha az temiz suya ihtiyaç duyulur. Klasik bir filtrasyon tesisinin akım şeması Şekil 2'de, üretmiş olduğu şlam keki ile birlikte gösterilmiştir. Filtrasyonlu tesislerde atıklar daha kolay bertaraf edilebilmekte ve baraj yenilmeleri daha az yaşanmaktadır. Bu yüzden yasalarla filtrasyon tesisi zorunlu kılınmıştır, ancak uygulamada halen sıkıntılar bulunmaktadır. Madencilik uygulamalarında en yaygın kullanılan filtreler düşey levhalı pres ve disk filtrelerdir. Pres filtrelerin ilk kurulum ve işletme maliyetleri daha düşük olup, kek nemleri de disk filtrelere göre daha düşüktür. Ancak, pres filtreler kesikli çalışır ve kapasiteleri düşüktür. Disk filtrelerin tercih edilmesinin nedeni kapasitesinin yüksek ve sürekli (sürekli) çalışabilmesidir. Şekil 2'de filtrasyon ünitesinin elemanları ve filtreden çıkan susuzlandırılmış çamur (şlam) kekin görüntüsü verilmiştir. Bu kekin ortalama nem içeriği cevherin tipine ve kil oranına bağlı olarak %10 ile %25 arasındaki değişmektedir. Şekil 2'de gösterilen kek, kömür şlamı (<math><38\mu\text{m}</math>) olup, nem içeriği %18'dir [14].

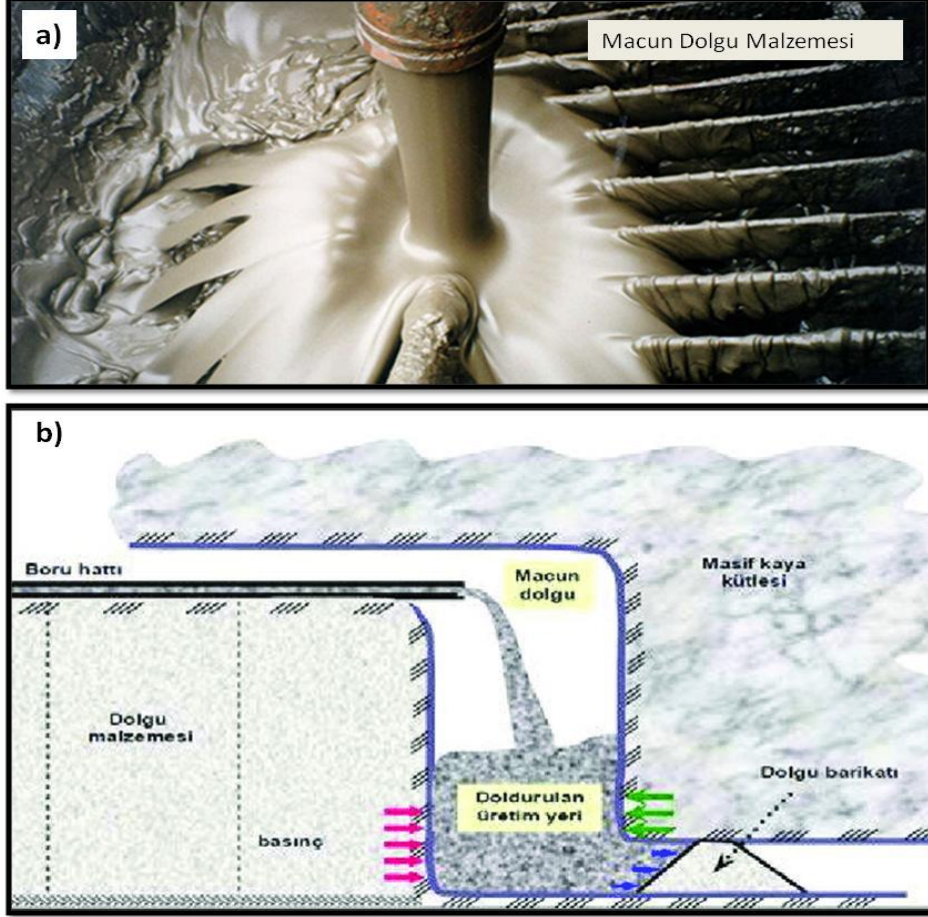


Şekil 2. (a) Filtrasyon ünitesi ve (b) üniteden çıkan şlam kekinin görüntüsü [14]

İri cevher atıklarının yeraltında açılan boşluklarda dolgu malzemesi olarak kullanılması oldukça yaygındır. Son yıllarda yeni teknolojilerin geliştirilmesiyle birlikte ince ve şlam atıkların da yeraltına depolanabileceği anlaşılmış ve bu alanda çalışmalar yürütülmüştür. Macun dolgu olarak bilinen bu yöntemde ince taneli malzeme belli katkı maddeleri (çimento, kireç, polimer vb) ile sulu bir ortamda karıştırılmakta ve borular vasıtası ile yeraltına gönderilmektedir. Özellikle Avustralya ve Kanada'da kazı-dolgu ve oda-topuk maden işletme yöntemleri için "macun dolgu" uygulaması yaygındır. Macun dolgu sisteminde, %10-15 bağlayıcı madde (çimento, uçucu kül, kireç vb) ve %30-40 aralığında su bulunur. Geri kalan kısım katı ince malzemeden ya da şlamdan oluşur. Bu karışım bir tank içerisinde homojenize edildikten sonra pompalarla basılarak yeraltındaki boşluklara doldurulur [10,11]. Macun dolgu malzemesi ve macun dolgu ile yer altı boşluklarının tahkim edildiği bir uygulama Şekil 3'de gösterilmiştir.

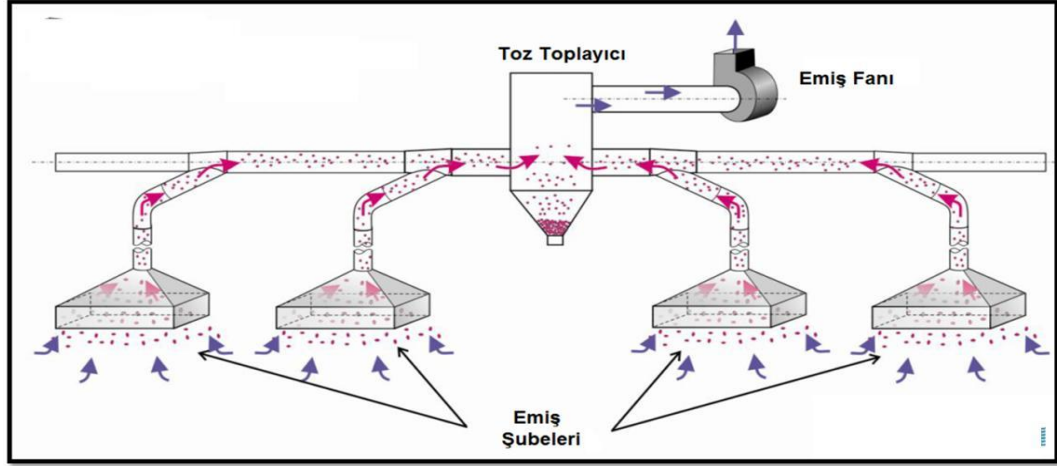
Katı atıklardan çok ince ve kuru olanları havada askıda kalmaktadır. Bunlar toz olarak bilinir ve genellikle boyut olarak 100 mikronun altındadır. Özellikle, tesislerde kırma-eleme ve öğütme gibi işlemler sonucunda yoğun miktarda toz ortaya çıkar. Kuru öğütme tesisleri en fazla tozun oluştuğu cevher hazırlama tesisleridir. Özellikle kalsit, bentonit, zeolit, feldspat ve barit gibi endüstriyel hammaddelerin mikronize öğütülmesinde yoğun miktarda toz oluşur. Ayrıca, cevherin bir yerden başka bir noktaya nakliyesi sırasında da tozuma olabilir. Pirometalurjik işlemlerden olan kurutma ve kalsinasyon işlemleri sonucunda da toz oluşur. Toz çalışanların, ciğerlerine yapışarak pnömokonyoz, silikozis ve kanser yapabilir. Tozu önlemek için, toz oluşturan makinelerin

yalıtılması ya da kapalı tutulması en basit yöntemdir. Bu mümkün değil ise su veya sis püskürtülerek tozuma önlenebilir. Eğer su cevherin yapısı için zararlı ise ve mekanik yapışmalara neden oluyorsa endüstriyel kuru toz toplama sistemleri kurulmalıdır. Bu sistemde tozlar bir aspiratör yardımı ile mikronize delik çaplı torba filtrelerle çekilerek bertaraf edilir. Genellikle 2 mikrondan daha büyük çaplı taneler tutulabilir. Bir endüstriyel toz toplama sistemi Şekil 4’de gösterilmiştir. Tozların boşaltılması ise basınç etkili pnömatik işlemlerle yapılır.

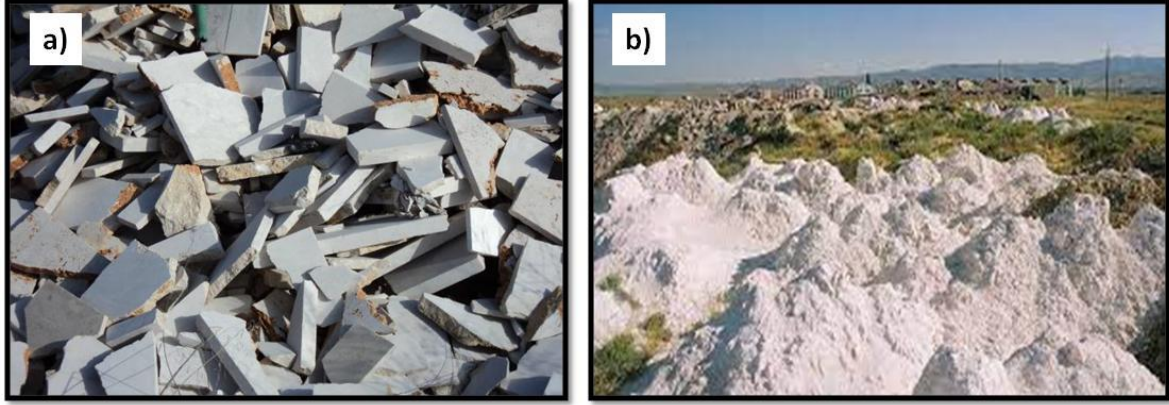


Şekil 3. (a) Macun dolgu malzemesi ve (b) yeraltında boşluk doldurma uygulaması[10]

Özellikle ülkemizde toz katı atıkların önemli tonajlarda çıktığı bir diğer alan mermer madenciliği ve mermer işleme fabrikalarıdır. Bu tozlar sulu katı ya da kuru katı uçucu formda olabilmektedir. Türkiye’de 2 bine yakın mermer ocağı ve 10 bine yakın mermer fabrikası ve atölyesi bulunmaktadır. Bu işletmelerde toz atık oranı %30'lara kadar çıkabilmektedir [16]. Özellikle mermer plakalarının üretildiği tesislerde önemli miktarlarda toz sulu atık oluşur. Bu atıklar için en verimli bertaraf yöntemi alternatif kullanım alanı yaratmaktır. Keza ülkemizde de mermer atıkları başta inşaat, cam, çimento ve seramik sanayisi olmak üzere pek çok alternatif alanda kullanılabilir [17,18]. Şekil 5’de Mermer işletme tesislerinden ortaya çıkan iri ve ince mermer atıklarının görüntüsü verilmiştir [19].

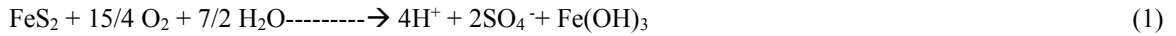


Şekil 4. Toz toplayıcı ve emiş şubelerinden oluşan endüstriyel fabrika toz toplama sistemi [15].



Şekil 5. (a) Mermer işletme tesislerinden ortaya çıkan iri ve (b) ince mermer atıklarının görüntüsü [19]

Katıların bertarafı ve depolanması çoğu zaman kolayken, sülfür içeren katıların depolanması ilave önlemler gerektirir. Sülfürlü mineralleri içeren bir artık, depo sahasında su ve oksijenle reaksiyona girerek çeşitli ağır metaller (Fe, Al, Mn, Cu vb.) ve asidik sular oluşturabilmektedir. Ayrıca pH'nın düşmesi (<7) ve çözülmüş iyon sayısının artması (SO₄, Ca⁺, Cl⁻ vb.) sularda gözlenen en önemli tehlikelerdir. Asidik maden drenajı karmaşık ve çok kademeli reaksiyonlarla gerçekleşir. Bu reaksiyonlarda bakteriler de önemli rol oynar. Asit üreten reaksiyonları basite indirgeyerek aşağıdaki tepkime yazılabilir [20].



Asitli suların tehlikesinin azaltılması ve bertarafı için öteden beri bilinen aktif arıtma veya son yıllarda giderek yaygınlaşan pasif arıtma yöntemlerinden biri uygulanabilir. Ortam koşullarına ve cevherin mineralojik yapısına bağlı olarak, hem oksidasyon hem de nötürleştirme reaksiyonları gerçekleşebilir. Aktif arıtma yöntemlerinde çeşitli kimyasallar (kostik soda, soda külü, kireç, amonyak) kullanılırken, pasif arıtma yönteminde kimyasal kullanılmaz. Asitli su doğal ya da yapay bir bataklıktan geçirilerek bakterilerin de yardımıyla arındırılır. Bu bağlamda bataklıklarda çeşitli bitki, hayvan ve yosunların bulunması önemlidir. Bir diğer pasif yöntem ise asitli suyun kireçtaşı havuzuna pompalanması ya da kireçtaşı kanallarından geçirilmesi yöntemidir [21-25]. Pasif arıtma yöntemleri doğal ortamda gerçekleştiği için daha çevreci bir uygulamadır.

3.2. Sıvı atıklar ve yönetimi

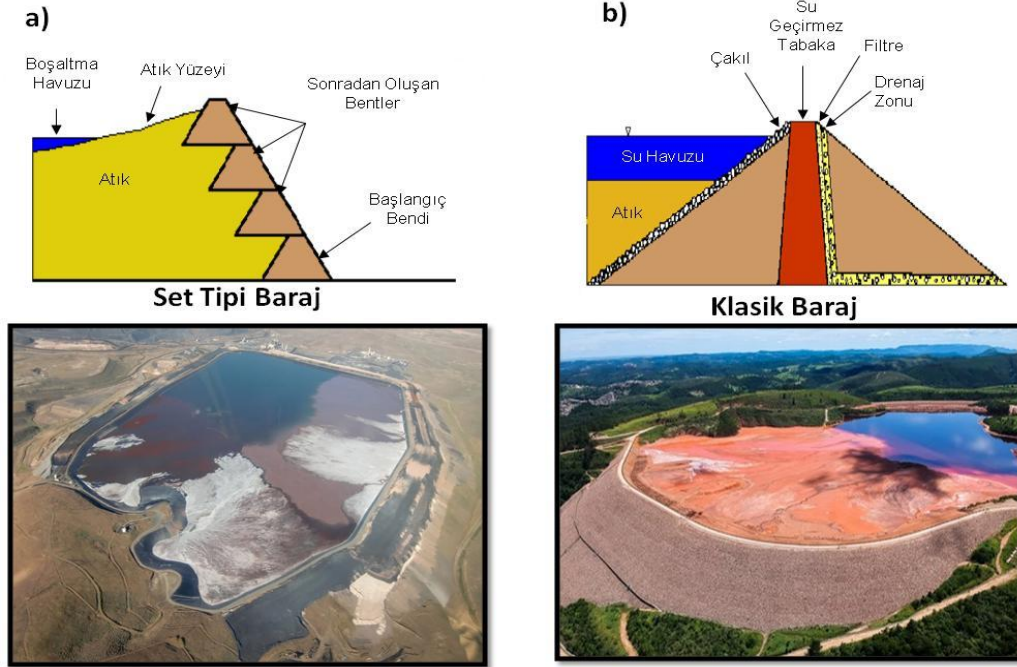
Cevher hazırlama tesisleri genellikle sulu proseslerden oluştuğu için oluşan atıklar katı-sıvı karışımı şeklindedir. Katılar filtrasyon ekipmanları ile sıvıdan ayrılırsa da, sıvının içerisinde çeşitli iyonlar, ağır metaller ve kimyasallar kalabilmektedir. Bu yüzden tesis atıkları direkt alıcı ortama/doğaya bırakılmamalıdır. Sudaki iyon konsantrasyonu düşürülerek ve kimyasallar bozundurulmuş alıcı ortama bırakılmalıdır. Jig, spiral, sallantılı masa, Falkon, Knelson, Icon gibi gravite yöntemleri ile zenginleştirme yapan tesislerin proses suları genellikle kimyasal içermemekte ve direkt alıcı ortama bırakılabilmektedir. Çünkü bu yöntemlerin hiç birinde kimyasal madde kullanılmamaktadır. Ancak, altın, gümüş, bakır, kurşun, nikel, alüminyum gibi metalik ve sülfürlü madenlerin işletildiği tesislerden zararlı ve zehirli sular çıkabilmektedir. Proseste oluşan ve kimyasal içermeyen katı-sıvı karışımları önce bir tükine (çöktürme tankına) gönderilmektedir. Tükine üzerinden taşan temiz su alınıp, tekrar tekrar kullanılırken, tükine altı sulu çamur filtreler beslenerek ilave susulandırma işlemine tabi tutulur. Filtreden kek halinde çıkan çamur katı bertaraf yöntemlerine göre muamele edilirken, elde edilen sıvı tekrardan proseste kullanılır. Ancak, sıvının içerisinde zararlı kimyasallar varsa sıvı geçirimsiz tabakası olan bir atık barajına alınır ve bu havuzda çeşitli yöntemlerle (doğal, biyolojik ya da kimyasallarla) bozundurulur. Yani, baraj içerisinde tesiste kullanılan kimyasallar zararsız hale getirilir.

Sıvı ya da katı-sıvı karışımı atıkların tutulması ve bertarafı için en yaygın kullanılan yöntem atık barajı yöntemidir. Atık barajları, katı-sıvı karışımları için en çok kullanılan yerüstü bertaraf alanlarıdır. Atık barajları tükinelere göre daha yüksek kapasitelidir ve binlerce ton suyu tutabilir. Yüksek hacimlere sahip suyun tutulması için idealdir. Atık barajlarında katılar çökerken sıvılar taşarak üstten alınır ya da bir bölümü alıcı ortama verilir. Barajlar çok değişik tip ve şekillerde inşa edilebilmektedir. Genel olarak barajlar, klasik ve set tipi olmak üzere iki çeşittir (Şekil 6). Set tipi barajlar genellikle düz topografyalarda uygulanır. Bu yöntemde atıkların depolanacağı bölgenin etrafı birkaç metrelik bir dolgu seti (genellikle kaya malzemesi) ile çevrilir, ya da topografya derinleştirilir (Şekil 6a). Kapasitenin dolması ile birlikte dolgu set üzerine tekrar dolgu yapılarak kademeli kapasite artışı sağlanır. Klasik baraj ise akış halinde olan bir sıvının önüne set çekilmesi ile oluşturulur (Şekil 6b). Baraj yapılırken dikkat edilmesi gereken en önemli husus setin sağlamlığı ve zemininin geçirimsiz olmasıdır. Kaya dolgululu ve betonarme barajlar en sağlam barajlardır. Ancak maliyetleri yüksektir. Bazalt, andezit, granit gibi sert magmatik kayalar zemin sızdırmazlığı için uygun kayalardır. Kil taşı, kum taşı, jips ve kireçtaşı suda çözünen kayalar olduğu için bu kayalar üzerine yapılan barajlarda zamanla sızmalar ve su kaçakları meydana gelebilir. Tabakalı kayalar üzerinde baraj kurulacaksa, tabaka doğrultularının barajın eksenine paralel ve suyun çıkış noktasına eğimli olması gerekir [2, 26, 27].

Atık barajlarının yerinin seçiminde, bölge topografyası önemli bir rol oynar. Genellikle atık barajları tesisten daha düşük kotta uygun bir vadiye kurulur ve atıklar doğal akışı ile atık barajına gönderilir. Ancak iklim ve arazi koşullarının uygun olmadığı bölgelerde kot farkından bağımsız olarak bölgenin en yüksek kesimlerine atık barajlarının yapılması olası yağışlardan kaynaklanabilecek sel ve baraj kaymalarının önlenmesi açısından önemlidir. Setlendirilme yapılan barajlar, açık ocak çukurları, özel kazılan çukurlar ve bataklık bölgeleri yerüstü atık bertarafı için kullanılan alanlardır. Maliyet açısından, atık bertarafı için en uygun yer, üretim yapılmış açık ocaklardır. Ancak, böyle yerler kullanılacak ise devam eden diğer maden üretim faaliyetlerini engellememeli ve ocak şevlerinin stabilitesi bozulmamalıdır. Atık barajlarının stabilitesi, topografya ve barajın su dengesi ile ilişkilidir. Barajlar atıklara ek olarak çevreden gelen yağış ve suyu da tutarlar. Ayrıca bir barajın su toplama havzasının alanı baraj gölü alanının 10 katından fazla olmamalıdır. Vadilerdeki su geliri diğer bölgelere oranla daha fazladır. Vadiye baraj inşa ederken, taşkınları engellemek amacıyla bir su tutma barajı yapılabileceği gibi, su akışının yönünü değiştirmek için engel ve kuşaklama kanalları gibi bazı önlemler de alınabilir. Eğer vadinin su girdisi yüksek ise bu durumda baraj yeri yamaç veya vadi dibi seçilmelidir. Ancak baraj yapılacak arazinin eğimi %15'i geçmemelidir. Bu tarz barajlar için iyi su yolu düzenlenmesi şarttır. Atık toplamaya uygun doğal çöküntüler ve benzeri topografya oluşumlarının olmadığı durumlarda düz alanlar üzerine inşa edilen atık barajları zorunlu bir seçenektir [2, 27].

Atıkların bertarafında yaygın kullanılan barajlar beraberinde tehlikeli durumları da getirmektedir. Baraj yenilmesi diye bilinen barajın yıkılması veya patlaması sık rastlanılan bir durumdur. Barajlar fazla suyun etkisi ile yıkılabilmekte ve tüm sıvı atık madde çevreye yayılabilmektedir. Örneğin 2010 yılında Macaristan'da meydana gelen bir baraj yenilmesi olayında tüm Tuna nehri kırmızı çamurla kızıla boyanmıştır (Şekil 7). Kırmızı çamur; alümina üretim tesislerinden çıkan demirli bileşikler ve ağır metalleri içeren bir atık türüdür. Boksitten alüminyum üretiminde Bayer Prosesi kullanılır ve bu proseste kullanılan kimyasallar sonucunda üretilen her ton alümina için yaklaşık 1 ila 1.5 ton kırmızı atık çamur oluşur. Dünyada ortalama her yıl 150 milyon tonun üzerinde kırmızı çamur oluşur ve bu çamurun depolandığı atık mevzuatlara uygun olarak inşa edilmezse tüm çevre ve canlılar bu çamurdan büyük ölçüde zarar görür. Ülkemizde de; Seydişehir/Konya Eti Alüminyum

tesislerinde boksitten alüminyum üretilirken kırmızı çamur açığa çıkmaktadır. Bu çamur barajlarda tutulmakta ve içeriğinde kalmış olan bazı metallerin (demir, titanyum, vanadyum, skandiyum vb.) geri kazanımı için çeşitli çalışmalar yürütülmektedir.



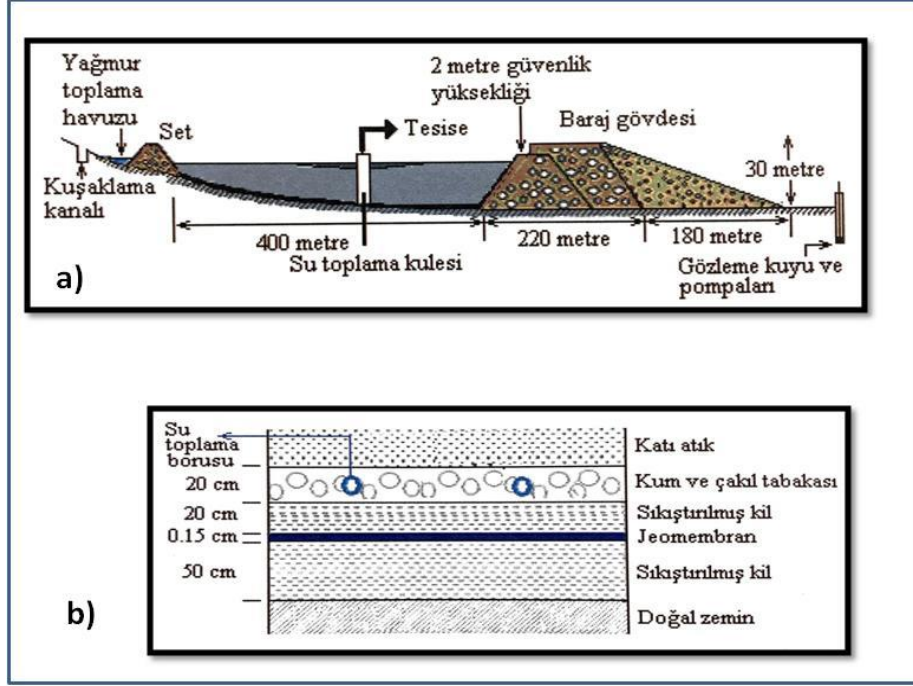
Şekil 6. En yaygın baraj tipleri (a) set tipi baraj görüntüsü (b) klasik baraj görüntüsü [27]



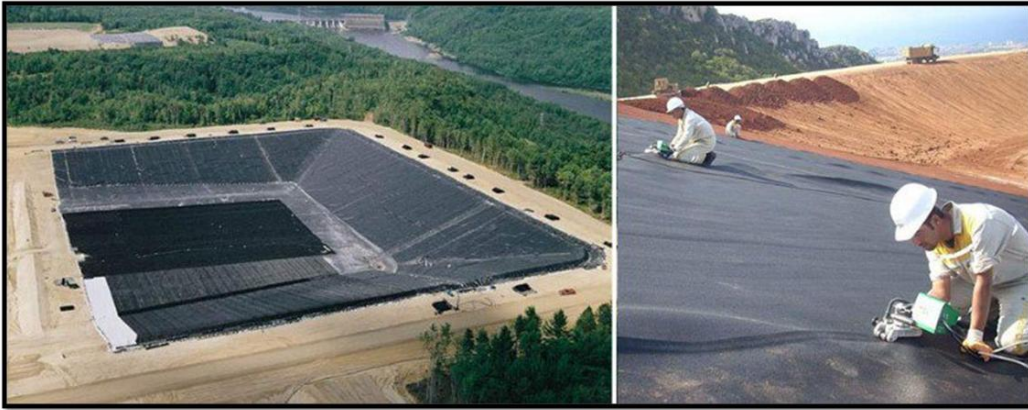
Şekil 7. Macaristan'da baraj yenilmesi sonucu kırmızı çamurun Tuna nehrine yayılışı

Türkiye'deki bir altın madeni için tekniğe ve mevzuata uygun olarak yapılan bir atık barajının kesit görüntüleri Şekil 8'de verilmiştir. Atık havuzunun geçirimsizliğini arttırmak için tabana kil serilip sıkıştırılmıştır. Tabanın çok iyi geçirimsizliğe sahip olması istendiğinde ise tabana sentetik bir polimer astar

serilir [2]. Toprak, kaya veya diğer zeminlerde suyun aşağıya geçmesini önleyen ve sızdırmazlığı sağlayan bu polimer malzemelere geomembran veya jeomembran adı verilir. Genellikle 3 mm kalınlığında olan bu geomembranlar; HDPE (High Density Polyethylene), LLDPE (Linear Low Density Polyethylene), PVC (Polivinil Klorür) ve EPDM (Etilen Propilen Dien Monomer) gibi çeşitli malzemelerden üretilmektedir. Şekil 9'da bir geomembran uygulaması gösterilmiştir. Çoğu cevher hazırlama tesisinde atık barajları öncesinde tikinerler bulunur. Tikinerlerin kapasiteleri daha düşük olup, suyun ön arıtımı için kullanılır. Tikinerler, atık barajlarına göre suyu daha hızlı arındırıp tesise gönderirler. Bu bakımdan hemen hemen her tesiste bir tikiner bulunması suyun hızlı bir şekilde geri kazanımı için zaruridir.



Şekil 8. Altın madeni barajı, (a) yeryüzü kesiti, (b) taban kesiti [2]

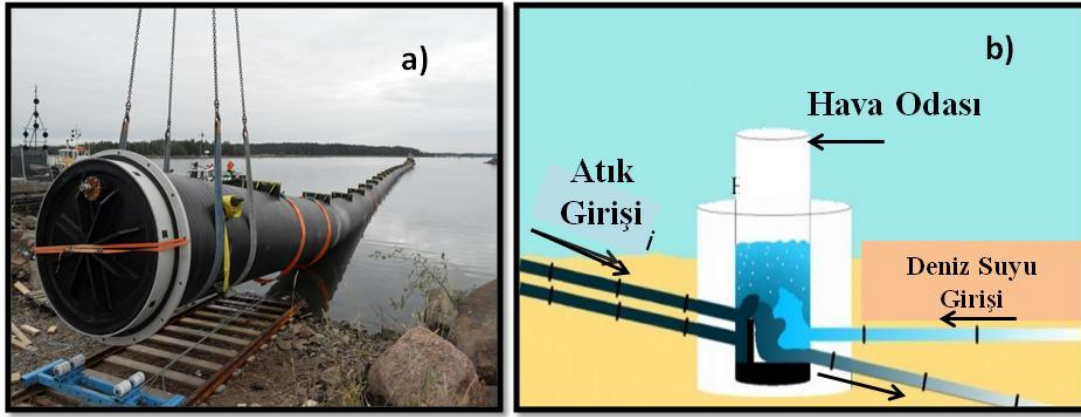


Şekil 9. Bir atık barajı için geomembran ile geçirimsiz alt tabakanın oluşturulmasının görüntüsü

Cevher hazırlama tesislerindeki atık çamurları için kullanılmakta olan bir diğer yöntem derin deniz deşarjı atık yönetimi sistemidir (Şekil 10). Dünyada atık çamurlarının %99.4'ü yerüstü atık barajlarında depolanırken sadece %0.6'sı deniz ortamında depolanmaktadır[28,29]. Denizin yakın ve derin, yağışın fazla, buharlaşmanın az, yerüstü atık bertaraf yöntemlerinin riskli olduğu bölgelerde uygulanır. Son zamanlarda önemi giderek artan bu yöntem, asit maden drenajı potansiyeline sahip atıklar için de geçerlidir. Atıklar genellikle sahilden deniz

tabanına döşenen yüksek yoğunluklu polietilen borular vasıtasıyla canlı yaşamının olmadığı mesafelerde ve derinliklerde deniz yatağına bırakılır [2].

Tesis atığı çamurunun denizaltında depolanmasıyla ilgili ilk uygulamalar 2012 yılında başlamıştır. Bu uygulamalardan 5 adedi Norveç'te, 3 adedi Papua Yeni Gine'de, 1'er adette Türkiye (Çayeli-Rize), Fransa, Yunanistan, Şili, İngiltere ve Endonezya'da bulunmaktadır. Çayeli Bakır İşletmesi tesis atık bertaraf yöntemi bu uygulamanın güzel bir örneğidir. Çayeli Bakır İşletmeleri'nde oluşan atıklar ön arıtma yapılmadan derin deniz deşarjı ile Karadeniz tabanına verilmektedir. Karadeniz'de yüzeyden -175 metrenin altındaki su kütleinin oksijen değerlerinin tamamen minimize olması ve ortamın kükürtlü hidrojen gazı ile doymuş hali tesis atığı çamurun Karadeniz'e deşarj edilmesine imkân sağlamaktadır. Bu katmanda sıcaklık ve tuzluluğun son derece homojen olduğu ve mevsimsel değişimlerden etkilemediği yapılan çeşitli araştırmalarda görülmüştür. Karadeniz'in derin sularındaki hidrojen sülfürün varlığı, çözünebilir ağır metallerin metal sülfite indirgenerek pirit veya benzeri mineraller halinde çökmesini sağlamaktadır. Diğer taraftan deniz tabanındaki kil özelliğindeki ince materyal çözünebilir ağır metallerin tutulmasını sağlayan bir ortam oluşturmaktadır [29,30]. 1994 yılında 350 metre derinliğe derin deniz deşarj izni alan Çayeli Bakır İşletmeleri, 2002 yılında Çevre Bakanlığı'ndan aldığı izinle deşarj uzunluğunu 273 metreye indirmiştir [8]. Çayeli Bakır İşletmeleri'nde kullanılmakta olan sistem Şekil 10'da gösterilmiştir.



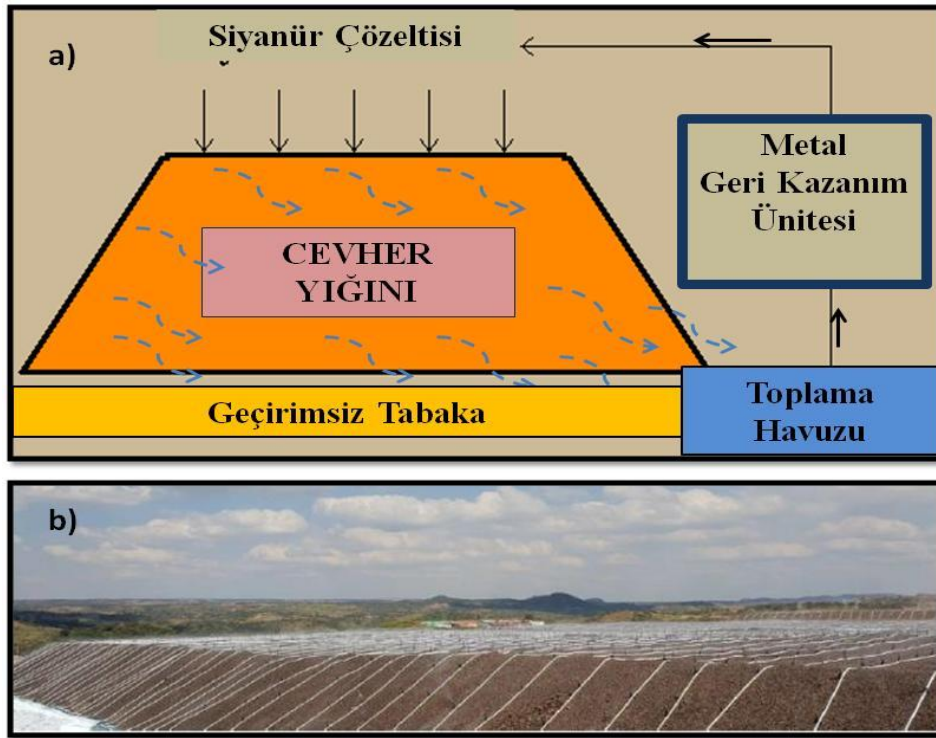
Şekil 10. (a) Derin deniz deşarjı boru döşeme sistemi ve (b) uygulamasına ait bir görüntü [8]

3.3. Gaz atıklar ve yönetimi

Tesis çalışırken ya da atık bertaraf işlemi sırasında bazı gaz atıklar oluşabilmektedir. Suda çözünen gazlar, ortam sıcaklığına, pH'sına ve gazın kısmi basıncına bağlı olarak sudan gaz formunda ayrılabilirler. Buna en iyi örnek siyanürlü altın madenciliğinde de sıkça rastlanan HCN (hidrojen siyanür) gazıdır. Bu gazın oluşmasını önlemek için atık suların pH değeri 10'un üzerinde tutulmalıdır. Aksi takdirde hidrojen siyanür gazı oluşur. Siyanür bertarafı için bir başka yöntem ise ortamı asidik yaparak HCN gazı çıkışı sağlamak ve bu gazı alkali bir ortamda geri kazanmaktır. Yine biyolojik (bakteriyel) ve ışınal tepkimeler sonucunda da SO₂ gibi çeşitli gazlar oluşabilmektedir. Bu gazın oluşumunun önlenmesi için bakteriyel aktivite durdurulmalı ve mümkünse ışıkla bağlantısı kesilmelidir. Ayrıca, entegre tesislerde bir takım ısısal işlemler sonucunda CO, CO₂ gibi sera gazları oluşabilmektedir. Özellikle, kalsinasyon işlemleri sonucunda yoğun miktarda karbon emisyonu oluşmaktadır. Bu karbon emisyonunun bertarafı için çok çeşitli metotlar uygulanabilmektedir. Bunlar, yakma öncesi yakalama (pre-combustion CO₂ capture), yakma sonrası yakalama (post-combustion CO₂ capture) ve Oksi-yakıt yakma tutumu (oxy-fuel) teknikleridir. Bu teknikler halen gelişim ve geliştirme aşamasındadır [31,32].

Altın ve gümüşün özütleme (liçinde), altın ve gümüş kazanım verimi düşük olmasına rağmen proses ekonomikliği nedeniyle yığın liçi tercih edilmektedir. Bu yöntemde, cevher bir tankın içerisine alınıp kapalı bir ortamda işlem görmez. Yığın liçi işlemi tamamen açık havada, açık doğal bir ortamda yapılır. Açık alanda bulunan cevher yığını üzerine bir pompa ve borularla düşük konsantrasyonda siyanür çözeltisi püskürtülür. Her ton çözelti içerisinde ortalama 1-2 kg civarında çözülmüş sodyum siyanür bulunur. Püskürtülen siyanür çözeltisi

yığındaki altın ve gümüşü çözeltiliye alarak geçirimsiz tabana doğru akar. Çözelti tabandaki havuzdan metal geri kazanım ünitesine gönderilir ve burada altın ve gümüş aktif karbon ünitesinden geçerken karbona adsorplanır. Siyanürlü sıvı ise ayarlanarak tekrardan yığın liçi işlemine gönderilir. Her ne kadar yığın liçi kontrollü yapılsa da, yığın üzerine aşırı yağışların gelmesi sonucunda kontrolsüz akışlar ve taşmalar meydana gelebilmektedir. Bu taşmaların çevreye yayılma riski vardır. Dolayısıyla yığın liçi, düşük yağış alan yerler için daha elverişlidir. Yığın liçi işlemi bittiğinde de, siyanürle kirletilmiş atıklar olduğu gibi kalmakta, yığındaki siyanür konsantrasyonu düşük de olsa yağışlarla çevreye yayılma riski bulunmaktadır. Ayrıca, ortamın pH'sı düştüğü için hidrojen siyanür gazı da oluşabilir ve canlılara zarar verebilir. Bu bakımdan mümkün olduğunca yığın liçinden kaçınılmalı, tank içerisinde kapalı ortamda kontrollü ve yalıtımlı liç yapılmalıdır [33-35]. Bu sayede hem altın ve gümüşün kazanım verimi artırılabilir, hem de çevresel sorunlar daha kolay bertaraf edilebilir. Şekil 11'de gösterilen yığının ortalama yüksekliği 10 metre, kapladığı alan ise birkaç dönüm olabilmektedir. Diğer yandan, madenin üretim ve tesisin işletme kapasitesine bağlı olarak hem yığın yüksekliği hem de kapladığı alan verilen değerlerin çok daha üzerine çıkabilir [36].



Şekil 11. (a)Yığın liçi işlemi ve (b) yığına çözeltiliyi püskürten boruların görüntüsü

Altın ve gümüş liç yöntemi ile kazanıldıktan sonra, içerisinde çeşitli ağır metalleri de içeren siyanürlü bir su kalır. Bu suyun pH değerinin sürekli olarak 10 ile 11 arasında tutulması gerekir, aksi takdirde düşük pH değerlerinde sodyum siyanür bozunur ve hidrojen siyanüre dönüşür. Bu gaz son derece zehirli ve öldürücü bir gazdır. Ayrıca, siyanür içeren tüm su havuzları doğru yönetilmezse, insan, bitki ve hayvanlar için son derece tehlikelidir. Özellikle göçmen su kuşları siyanürlü havuzlardan su içmeye meyillidir ve bu nedenle binlerce su kuşunun öldüğü bilinmektedir. Böyle kazaların yaşanmaması için siyanürlü havuzların üstü kuş topları ile kapatılmalıdır. Böyle bir uygulama ABD Cortez altın madeninde yapılmış ve Şekil 12'de gösterilmiştir. Atık havuzlarında biriktirilen siyanür bozundurulduktan sonra doğaya deşarj edilir. Doğal ortama boşaltılan sudaki siyanür içeriği en fazla 0.5 mg/l olmalıdır. Bozundurma işlemi doğal yolla, kimyasallarla veya biyolojik yöntemlerle gerçekleştirilebilir. Doğal bozundurmada güneş ışınları (ultraviyole ışınlar) kullanılır. Kimyasal yöntemlerde ise hidrojen peroksit, kükürt dioksit, alkali klorlama ve çeşitli asitler kullanılabilir. Biyolojik bozundurmada ise bakteriler kullanılır[37, 38].



Şekil 12. Siyanürlü atık havuzu yüzeyini örten yüzer kuş toplarının görüntüsü [38].

3.4. Gürültü ve yönetimi

Gürültü; hoş gitmeyen, istenmeyen, rahatsız ve hasta edici ses olarak tanımlanabilir. Bu bağlamda “Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği” hükümleri doğrultusunda belirtilen sınır değeri aşmayacak şekilde önlemler alınmalıdır. Cevher hazırlamada kullanılan makinelerin (kırıcılar, değirmenler, elekler vb.) çıkardığı sesler, yeterli ve etkin önlemler alınmadığı takdirde özellikle o iş kolunda çalışanlara önemli ölçüde zarar verebilmektedir. İnsan için 35-65 dB sesler normaldir. 65-90 dB arasındaki sesler ise gürültü olarak tanımlanabilir ve uzun süreli duyulduğunda çeşitli organlara zarar verebilir. Genel olarak değişik ülkelerde yürürlükte olan yönetmeliklere göre, gürültünün zararlı olmaya başladığı sınır 8 saatlik maruziyet için 90 dB, 4 saat için 93 dB ve 2 saat için 96 dB’dir. Cevher hazırlama tesislerindeki üniteler genellikle 60-100 dB arasında bir gürültü seviyesine sahiptir. Kullanılan makine ve ekipmanlara göre gürültü seviyesi de değişir. En gürültülü cihazlar değirmenler, kırıcılar ve eleklerdir. Kompresörler, Jeneratörler ve motorlar da önemli ölçüde gürültü oluşturur. Bu cihazlar, mümkün olduğunca stabil yerleştirilmeli, titreşim ve gürültü izolasyonu yapılmalıdır. Yine de önlem alınamıyorsa, çalışanlar kulak koruyucu kullanmalıdır. Eti Gümüş Maden İşletmesinin gürültü ölçüm değerleri Tablo 1’de verilmiştir [9]. Bu tablodan da görülebileceği gibi tesisin bazı ünitelerinde gürültü oluşumu sağlığı olumsuz etkileyebilecek düzeyde yüksektir.

Tablo 1. Eti Gümüş Maden İşletmesinin gürültü ölçüm değerleri [9]

Tesisteki Ölçüm Yeri	Gürültü Düzeyi (dB)
Konik kırıcı katı	93-94
Konik kırıcı besleyici katı	101-102
Pano odası	68-69
Dinlenme odası	57-58
Çeneli kırıcı yanı	90-91
Öğütme ünitesi (giriş)	95-96
Öğütme ünitesi dinlenme odası	70-71
Değirmen katı	97-98
Değirmen üst katı	97-98
Öğütme ünitesi giriş katı	98-99
Değirmen alt katı	107-108
Kompresör odası	89-90
Jeneratör odası	107-108
İzabe fırını	92-93
Regülatör	90-91
Dinlenme odası	78-79
Isı santrali	94-95
Dinlenme odası	47-48

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma sonucunda ulaşılan çıkarımlar aşağıda özetlenmiştir:

-Cevher hazırlama tesislerinden, değerli mineral kazanıldıktan sonra geriye “pasa” denilen bir atık çıkar. Bu atık, sadece doğal taştan oluşabileceği gibi, çeşitli kimyasalları da bünyesinde barındırabilir. Kimyasal içeren atıklar için ekstra güvenlik önlemleri alınması şarttır. Örneğin bu atıklara nötralizasyon veya indirgeme reaksiyonları uygulanabilir. Kimyasal içermeyen atıklar ise atık sahasında kontrollü olarak depolanabilir. Bunlar inert atık olarak bilinir ve yağmur, su ve rüzgar gibi dış etkilere etkilenmezler. Yani durdukları yerde zararlı kimyasallar üretmez veya çevreyi kirlenmeye bileşenler oluşturmazlar. Endüstriyel hammaddelerin (kil, pomza, kireç, silis kumu, mermer, perlit vb) atıkları genellikle bu tipte zararsız atıklardır.

-Cevher hazırlama tesislerinin yüzde 90’ında sulu prosesler kullanılır ve bu prosesler sonucunda sulu atıklar oluşur. Sulu atıkların bertarafı katı atıklara göre daha zor ve maliyetlidir. Çünkü katıların bazıları su içerisinde askıda kalabilir, çözünebilir ya da zararlı ağır metaller veya bileşikler oluşturabilir. Bu bileşikler birbiri ile tepkimeye girerek çeşitli kimyasallara ve zararlı maddelere dönüşebilir. Bu bakımdan, sulu atıklar için mevcut tesislere çöktürme tankları, atık barajları ve filtrasyon üniteleri kurmak gerekir.

-Cevher hazırlama tesislerinde, sulu atıklardan suyun geri kazanımı ve proseste tekrar tekrar kullanımı mümkündür. Bu işlemler için başta tükener ve akabinde çeşitli bez filtrelerden (disk ya da pres filtre) faydalanılır. Cevher içerisindeki kil oranına bağlı olarak, suyun hemen hemen %80’e yakın bir kısmı geri kazanılabilir ve tekrardan proseste kullanılabilir. Ancak kil oranının yüksek olduğu cevherlerde, suyun geri kazanım oranı azalabilir. Çünkü kil mineralleri hacimlerinin birkaç katı suyu absorbe eder ve bu su atılan killi kayaçla birlikte atığa gider ve oradan buharlaşarak yok olur.

-Cevher hazırlama tesislerinde büyük hacimlerde ortaya çıkan katı-sıvı karışımların, çamurların ya da sadece suyun tutulması amacıyla atık barajı inşası zorunludur. Atık barajları aynı zamanda kimyasal bozundurma da yapıldığı yerlerdir ve tehlikeli maddeler içerebilir. Bu bakımdan, mevzuata uygun olarak sağlam ve geçirimsiz inşa edilmelidir. Ayrıca, atık barajı yenilmeleri sıklıkla görülen olaylar olup, büyük ölçüde çevre felaketlerine neden oldukları için düzenli takip gerektirir.

-Siyanür, asit ve baz gibi çeşitli kimyasallarla zenginleştirme yapan liç tesisleri için atık barajı kaçınılmaz olarak inşa edilmelidir. Atık barajları mevzuata uygun olarak inşa edilmeli, taşma veya yenilme olaylarına karşı risk etütleri yapılmalıdır. Dünya genelinde cevher hazırlama tesislerinde baraj yenilmeleri sıklıkla görülen olaylardır. Bu durum, barajların yeterince sağlam yapılmadığının bir göstergesidir.

-Cevher hazırlama tesislerinde; kırma, öğütme ve eleme gibi işlemlerinde gürültü seviyesi 100 dB’in üzerine kadar çıkabilmektedir. Bu ses seviyesi insan sağlığı için zararlı olup, gerekli yalıtımlar yapılmalı ya da bu bölgelerde çalışanlara kişisel koruyucu ekipmanlar verilmelidir. Ayrıca, bu kısımlarda toz ve taş sıçraması olayları gerçekleşebileceği için baret ve koruyucu gözlük de kullanılmalıdır. Sesin olduğu yerde titreşimin de olacağı kaçınılmazdır ve titreşim için de gerekli önlemler alınmalıdır.

-Tesiste kullanılan kimyasallar, su ve bazı diğer elementlerle birleştiği zaman zararlı gazlar oluşturabilmektedir. Örneğin, siyanürle işlem gören altın ve gümüş madenlerinde zehirli bir gaz olan hidrojen siyanür oluşur. Bu gazın oluşumunu önlemek için ortamın pH’sı soda veya kireçle arttırılabilir ve gaz çıkışı önlenir. Bu reaksiyon sonucu sodyum siyanür elde edilebilir. Gaz çıkışının önlenmesi için pH 10-11 aralığında tutulmalıdır.

-Flotasyon tesislerinde çok çeşitli ve kompleks kimyasallar kullanılmaktadır [39]. Özellikle sülfür içeren kimyasallardan SO₂ gazı çıkması kaçınılmazdır. Benzer şekilde, diğer kimyasallardan da çeşitli koku ve gazlar çıkabilir. Bu bakımdan, flotasyon tesislerinde mutlaka gaz tipi tespiti ve ölçümü yapılmalı ve gerekli ise buralarda gaz maskesi kullanılmalıdır.

-Uranyum ve toryum gibi radyoaktif minerallerin zenginleştirildiği tesislerde ekstra güvenlik önlemi alınmalı Radyasyon Güvenliği Yönetmeliği’ne [40] uygun olarak çalışılmalıdır. Tesislerde düzenli olarak radyasyon ölçümleri yapılmalı, toz maskesi kullanılmalı ve çalışanların izolasyonu en yüksek seviyede tutulmalıdır. Ayrıca bu tesislerde radon gazı ölçümleri de yapılmalı ve seviyesi 1000 Bq/m³’e ulaşan tesislere ilave havalandırma tesisatı kurulmalıdır.

-Tesislerde toz ve gürültü kaçınılmaz olarak oluşur. Bu bağlamda, cihazların yalıtımı önemlidir. Kırma, öğütme, eleme makineleri ve taşıma bantlarının üstünün kapalı olması gerekir. Açık olan kısımlara, tozumanın bastırılması için sprey su verilebilir. Gürültü ve titreşimin azaltılması için makine ve ekipmanlar sağlam betonarme zeminlere oturtulmalı, gürültüyü kesici veya azaltıcı parçalardan kullanılmalıdır. Örneğin eleme makinelerindeki çelik yaylar çok fazla gürültüye neden olurken, lastik ya da kauçuktan imal edilen Rosta gibi süspansiyon sistemleri tercih edilmelidir.

-Cevher hazırlama atıklarının farklı sektörlerde kullanılabilmesi için alternatif kullanım alanları araştırılmalıdır. Günümüzde çoğu cevher hazırlama atığı başta inşaat, çimento ve seramik olmak üzere pek çok sektörde kullanılabilir [41]. Bu sayede, hem atıklar bertaraf edilmekte hem de katma değeri yüksek ürünlere dönüşmektedir. Bu yüzden atıklar iyi karakterize edilmeli ve üzerine bilimsel çalışmalar yürütülmelidir. Bu çalışmalar yasal müeyyidelerle zorunlu hale getirilmelidir.

Sonuç olarak, cevher hazırlama tesis atıklarının hepsi zararlı olmasa da, özellikle zararlı atıkların mevzuata uygun olarak bertaraf edilmesi gerekir. Maliyetlerden kaçma amacıyla, atıkların kontrolsüz olarak yayılması çevreye, canlılara ve daha birçok şeye ciddi zararlar verebilir. Oluşabilecek bu tehlikeler göz ardı edilmemeli ve gerekli önlemler mevzuatlar çerçevesinde alınmalıdır. Ayrıca, devlet tarafından düzenli denetimler yapılmalı ve mevzuatın uygulanması için azami çaba gösterilmelidir. Aksi takdirde, geçmişte olduğu gibi, madencilik kaynaklı pek çok çevre felaketi ile birlikte önemli ölçüde maddi kayıplar da gündeme gelecektir.

Kaynaklar

- [1] Dold, B. Sustainability in metal mining: from exploration, over processing to mine waste management, *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 2008; 7(4): 275-285.
- [2] Yıldız N. Atık Yönetimi, Cevher Hazırlama ve Zenginleştirme Kitabı, Ertem Basım Yayın Dağıtım Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti. 2010; 457.
- [3] Ashton, P., Love D., Mahachi H. Appendix 2: Environmental and social impacts of mining, environmental key, 2003; https://pdf.wri.org/mining_background_literature_review.pdf.
- [4] TÜİK. Atık İstatistikleri, <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Atik-Istatistikleri-2020-37198>, Türkiye İstatistik Kurumu, 2020; Ankara,
- [5] Maden Atıkları Yönetmeliği, <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2015/07/20150715-3.htm>, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2015; Resmi Gazete, Ankara,
- [6] Johnson D.B., Hallberg K.B. Acid mine drainage remediation options: a review, *Science of The Total Environment* 2005; 338 (1-2): 3-14.
- [7] Gürtekin, G., Maden atık karakterizasyonunda proses mineralojisi uygulaması, Doktora Tezi, 2020, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [8] Karaca, E. Metalik maden zenginleştirme tesislerinin proses atıklarının atık barajlarında depolanması, Uzmanlık, 2010, Çevre ve Orman Bakanlığı Yayını. Ankara.
- [9] Ediz, G., Beyhan, S., Akçakoca, H., Sarı, E. Madencilikte gürültü sorunu ve gürültüye bağlı işitme kayıpları, Türkiye 13. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı, 29-31 Mayıs 2002, Zonguldak, Türkiye.
- [10] Erçikdi, B. Mineral ve kimyasal katkı maddelerinin macun dolgu performansına etkisi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, 2009; Trabzon.
- [11] Uğurlu, Ö.F. Metal madenciliğinde yer altı açıklıkları için macun dolgu malzemesinin araştırılması, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2013; İstanbul.
- [12] Smith R.W. Liquid and solid wastes from mineral processing plants, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* 1996; 16 (1): 1-22.
- [13] Lu, Z., Cai, M., Disposal methods on solid wastes from mines in transition from open-pit to underground mining, *The 7th International Conference on Waste Management and Technology*, Beijing, SciVerse Science Direct, 2012; 715-721.
- [14] Hacifazlıoğlu, H. Kömür yıkama tesis atıklarının susuzlandırılmasında eski ve yeni teknolojiler, *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 2016; 55 (3):17-26.
- [15] Teknoconvey, Toz toplama sistemleri, <http://www.teknoconvey.com/blog/2019/05/03/toz-toplama-sistemleri-hakkinda-genel-bilgi/>, 2022.
- [16] Yıldız, Ö., Eşikaya, Ş., Afyon Doğaltaşı Toz Atıklarının Değerlendirilmesi, Türkiye Birinci Doğaltaş Sempozyumu, 1995; 1, 4552. 252
- [17] Erdemoğlu, M., Göktaş, M. Mermer artıklarından katma değeri yüksek ileri seramik tozların üretimi, Mermer Madenciliğinde Çevresel Yaklaşımlar (1. Basım), Yayınevi : Muğla Büyükşehir Belediyesi, 2018; ISBN : 978- 605-4839-14-8, 235-252.
- [18] Göktaş, M., Erdemoğlu, M. Aşırı öğütme ile mekanik olarak aktifleştirilmiş atık mermer tozları kullanarak yapay vollastonit üretimi ve kullanımı, *Bilimsel Madencilik Dergisi*, TMMOB Maden Mühendisleri Odası Dergisi, 2014; 54 (1-2) 39-42.
- [19] Yılmaz, A. Sürdürülebilirlik açısından mermer atıklarının karayolu inşaatında değerlendirilmesi: Ekonomik Analiz Örneği, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2020; 24 (2) 402-410.
- [20] Karadeniz, M. Asit maden (kaya) drenajında aktif ve pasif çözüm yöntemleri, *Madencilik ve Çevre Sempozyumu*, 5-6 Mayıs 2005, 91-97, Ankara.
- [21] Gray, N.F. Environmental Impact and Remediation of Acid Mine Drainage: A Management Problem, *Environmental Geology*, 1997; 30, (1/2): 62-71.

- [22] Gazea, B., Adam, K. Kontopoulos, A. A review of passive systems for the treatment of acid mine drainage, *Minerals Engineering* 1996; 9 (1): 23-42.
- [23] Ferris, F.G., Tazaki, K., Fyfe, W.S. Iron oxides in acid mine drainage environments and their association with bacteria, *Chemical Geology* 1989; 74 (3-4): 321-330.
- [24] Akcil, A., Koldas, S. Acid mine drainage (AMD): causes, treatment and case studies, *Journal of Cleaner Production*, 2006; 14 (12-13): 1139-1145.
- [25] Barrie Johnson, D., Kevin, D., Hallberg, B. Acid mine drainage remediation options: a review, *Science of The Total Environment*, 2005; 338 (1-2): 3-14.
- [26] Başçetin A., Özdemir O., Tüylü S., Adıgüzel D., Akkaya U.G. Proses atıklarının macun teknolojisi kullanılarak yerüstünde depolanması, *Yer Altı Kaynakları Dergisi*, 2015; 4 (7): 33-49.
- [27] Arslan V., Bayat O., Vapur H., Uçurum, M. Cevher hazırlama atık barajlarında taşma ve güvenlik önlemleri, *Uluslararası Maden İşletmelerinde İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Sempozyumu 2017*; 1-11, Adana.
- [28] Trannum H.C., Gundersen H., Escudero-Oñate C., Johansen J.T., Schaanning M.T., Effects of submergine tailings on macrobenthic community structure and ecosystem processes, *Science of the Total Environment*, 2018; 630, 189-202.
- [29] Sezgin, N. Maden Atık Çamurlarının Denizaltı Depolama Yöntemi ile Bertarafı, *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 2020; 6(1): 209-217.
- [30] İzdar E. Karadeniz'in hidrografik, biyolojik, fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle oluşturduğu tabakalaşmanın anoksik ortamında sülfür içeren atıkların depolanabilirliği, *Piri Reis Denizcilik ve Eğitim Vakfı*, 2009, İzmir.
- [31] Gibbins J. Chalmers H., Carbon capture and storage, *Energy Policy* 2008; 36 (12): 4317-4322.
- [32] Pires, J.C.M., Martins F.G., Alvim-Ferraz, M.C.M., Simões, M. Recent developments on carbon capture and storage: An overview, *Chemical Engineering Research and Design*, 2011, 89 (9): 1446-1460.
- [33] Yıldız, N. Altın madenciliği, Online yayınlanmış not. 2022. https://www.researchgate.net/publication/284186106_Altin_Madenciligi
- [34] Petersen, J. Heap leaching as a key technology for recovery of values from low-grade ores – A brief overview, *Hydrometallurgy*, 2016, 165 (1): 206-212.
- [35] Kurşun, İ. Determination of mineral processing induced environmental impacts, *Asian Journal of Chemistry*, 2006, 18 (3): 2376-2384.
- [36] Ghorbani, Y., Franzidis, J., Petersen, J. Heap Leaching Technology—Current State, Innovations, and Future Directions: A Review, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review An International Journal*, 2016; 37 (2): 73-119.
- [37] Çelik, H., Mordoğan, H., İpekoğlu, Ü., Siyanürlü altın üretim tesisi atıklarını arıtma yöntemleri, *Madencilik*, 1997; XXXVI (1). 33-45.
- [38] Logsdon, M.J., Hagelstein, K., Mudder, T.İ. Altın üretiminde siyanür yönetimi, *Normandy Madencilik A.Ş.* 2001; 44, Ottawa, Ontario CANADA.
- [39] Bulut, G., Göktepe, F. Madencilik ve Cevher hazırlama işlemlerinde kullanılan kimyasallar, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 2012; XXV (1): 37-56.
- [40] Radyasyon güvenliği yönetmeliği, Resmi gazete 24.3.2000. Sayı 23999, <https://www.mevzuat.gov.tr/>
- [41] Korkmaz, A.V. Perlit ve traverten atıkları ile üretilen puzolanik çimentoların mühendislik özelliklerinin incelenmesi, *MT Bilimsel, Yeraltı Kaynakları Dergisi*, 2020; 17: 32-50.

Yamadağı Volkanizmasının Kangal-Divrığı (Sivas) Arasında Kalan Kuzey Kesimlerinin Petrolojisi

Ahmet MAVİ¹, Taner EKİCİ^{2*}

¹ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas, Türkiye

² Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye

¹ ahmetmavi058@gmail.com, ² tanere7@gmail.com

(Geliş/Received: 06/09/2022;

Kabul/Accepted: 26/11/2022)

Öz: Orta Anadolu'da Torid Tektonik Kuşağı üzerindeki Anatolid levhası üzerinde yeralan Yamadağı Volkanitleri, Malatya ilinin kuzey-kuzeybatısından Sivas ilinin güneydoğusu arasında oldukça geniş bir alanda yüzlekler sunmaktadır. Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı Yamadağı Volkanitleri en altta andezitik ve bazaltik aglomera seviyeleri ile başlamakta üzerine çoğunlukla bazalt, trakibazalt ve daha az oranda da andezit ve dasit'lerden oluşan bir istifte gelmektedir. Yamadağı Volkanitlerinin alt seviyelerini oluşturan aglomeralar çoğunlukla bazaltik ve nadiren de andezitiktir. Andezitik aglomeralar açık mor renkli bazaltik aglomeralar ise siyah-mor renkli olarak gözlenmektedir. Aglomeratik seviyeler geçişli olup bunların üzerine de bazalt ve andezitlerden oluşan lav akıntıları gelmektedir. Yamadağı Volkanitleri içerisinde gözlenen andezitik kayalar grimsi mor renkli olup orta-ince tane boyutludur. Bazaltlar ise siyah ve siyahımsı mor renklerde ve ince tanelidirler. Yamadağı Volkanitleri içerisinde gözlenen dasitik kayalar ise grimsi beyaz renki olup, orta ince tanelidirler. Jeokimyasal olarak Yamadağı Volkanitlerinden trakibazaltların alkalın; bazalt, bazaltik andezit ve dasit'lerin ise subalkalin alanda yerleştikleri görülmektedir. Subalkali kayaların toleyitik-kalkalkalin alt gruplarını belirlemeye yönelik AFM üçgen diyagramında ise kalkalkalin karakter gösterdikleri görülmektedir. Yamadağı Volkanitlerinde fraksiyonel kristalleşme etkilerinin yanı sıra dasitik kayalardan bazaltik kayalara doğru kısmi ergime miktarlarında artış olduğu ve hafif nadir toprak elementlerin ağır nadir toprak elementlere göre daha fazla zenginleşmiş olması kabuksal malzeme etkisinin de önemli olduğunu göstermektedir. Yamadağı volkanizmasının Üst Kretase-Eosen döneminde Neotetis okyanusunun kapanmasını izleyen evrede Neotetisin yitimi sonucu litosferik dilimden açığa çıkan akışkanlar tarafından metasomatizmaya uğratılmış bir manto kaynağından itibaren Üst Miyosen-Pliyosen yaş aralığında oluşmuş olabileceği öne sürülmektedir.

Anahtar kelimeler: Orta Anadolu, Volkanizma, Miyosen, Pliyosen

Petrology of the North Sections Between the Kangal-Divrığı (Sivas) of Yamadağı Volcanism

Abstract: The Yamadağı volcanics located on the Anatolide plate on the Tauride Tectonic Belt in Central Anatolia which is outcrop in a very large area between the north-northwest of Malatya province and the southeast of Sivas province. Upper Miocene-Pliocene Yamadağı volcanics start with andesitic and basaltic agglomerate levels at the bottom and are overlain by a succession consisting mostly of basalt, trachybasalt and to a lesser extent andesite and dacite. Agglomerates forming the lower levels of Yamadağı volcanics are mostly basaltic and rarely andesitic. Andesitic agglomerates are observed as light purple colored basaltic agglomerates, black-purple colored. The agglomeratic levels are transitional and overlying these are lava flows composed of basalts and andesites.

Geochemically, trachybasalts from Yamadağı volcanics are alkaline; basalt, basaltic andesite and dacite are observed to be located in the subalkaline area. In the AFM triangle diagram for determining the tholeiitic-calcalkaline subgroups of subalkaline rocks, it is seen that they show calc-alkaline character. In addition to the fractional crystallization effects in Yamadağı volcanics, there is an increase in the amount of partial melting from dacitic rocks to basaltic rocks and the enrichment of light rare earth elements more than heavy rare earth elements shows that the crustal material effect is also important.

It is suggested that the Yamadağı volcanism may have formed in the Upper Miocene-Pliocene age range from a mantle source metasomatized by the fluids released from the lithospheric slice as a result of the subduction of Neotethys in the phase following the closure of the Neotethys ocean during the Upper Cretaceous-Eocene period.

Key words: Central Anatolia, Volcanism, Miocene, Pliocene

1. Giriş ve Stratigrafi

Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı Yamadağı Volkanitleri, Torid Tektonik kuşağı üzerindeki Anatolid levhası içerisinde Anatolid-Pontid [1] levhalarının birleşim kuşağında oldukça geniş alanlarda yüzlekler sunmaktadır.

* Sorumlu yazar: tanere7@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0001-5593-8475, ² 0000-0002-7420-3877

Yamadağı Volkanitlerinin en kuzeyindeki lav akıntıları Sivas ilinin Kangal ve Divriği ilçelerine kadar ulaşmaktadır (Şekil 1).

Çalışma alanındaki en yaşlı birimler Üst Kretase yaşlı Güneş Ofiyoliti ile başlamaktadır. Güneş Ofiyoliti genellikle çalışma alanının kısmen orta ve kuzeybatı kesimlerinde yüzeylenmişlerdir. Güneş Ofiyolitini intrüzif sokulumla kesen Maestrihtien yaşlı Yellice Plütону ise çalışma alanının kuzeydoğu kesimlerinde yer almaktadır. Çalışma alanının güneydoğusunda görülen Alt-Orta Miyosen yaşlı Divriği Formasyonu ile Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı Yamadağı Volkanitleri genellikle çalışma alanının orta kesimlerinde yüzlekler sunmaktadır (Şekil 2, 3).

Malatya ilinin kuzey-kuzeybatısı ile Sivas ilinin güneydoğusu arasında oldukça geniş bir alanda yüzlekler sunan Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı Yamadağı Volkanitleri en altta andezitik ve bazaltik aglomera seviyeleri ile başlamakta üzerine çoğuklukla bazalt, trakibazaltik ve daha az oranda da andezit ve dasit'lerden oluşan bir istif gelmektedir (Şekil 4a). Çalışma alanının büyük bir kısmında yayılım gösteren Yamadağı Volkanitlerinden daha önce yapılan Jeokronoloji çalışmalarında 12-15 Milyon yıl [2], [3], [4], 8.9-14.7 Milyon yıl [5] yaşları saptanmıştır. Saptanan tüm jeokronolojik yaş verileri sadece üst Miyosen yaşını vermiş olsa da Yamadağı Volkanitlerinin Arguvan ilçesi ve civarındaki bazı lav seviyelerinin stratigrafik olarak Pliyosen yaşlı olabilecekları de belirtilmiştir [2].

Yamadağı Volkanitlerinin alt seviyelerini oluşturan aglomeralar çoğunlukla bazaltik ve nadiren de andezitiktir (Şekil 4b). Andezitik aglomeralar açık mor renkli bazaltik aglomeralar ise siyah-mor renkli olarak gözlenmektedir (Şekil 4c). Aglomeratik seviyeler kendi içerisinde geçişli olup bunların üzerine de bazalt ve andezitlerden oluşan lav akıntıları gelmektedir.

Yamadağı Volkanitleri içerisinde gözlenen andezitik kayalar grimsi mor renkli olup orta-ince tane boyutludur. Bazaltlar ise siyah ve siyahımsı mor renklerde ve ince tanelidirlir. Yamadağı Volkanitleri içerisinde gözlenen dasitik kayalar ise grimsi beyaz renkli ve orta ince tanelidirlir.

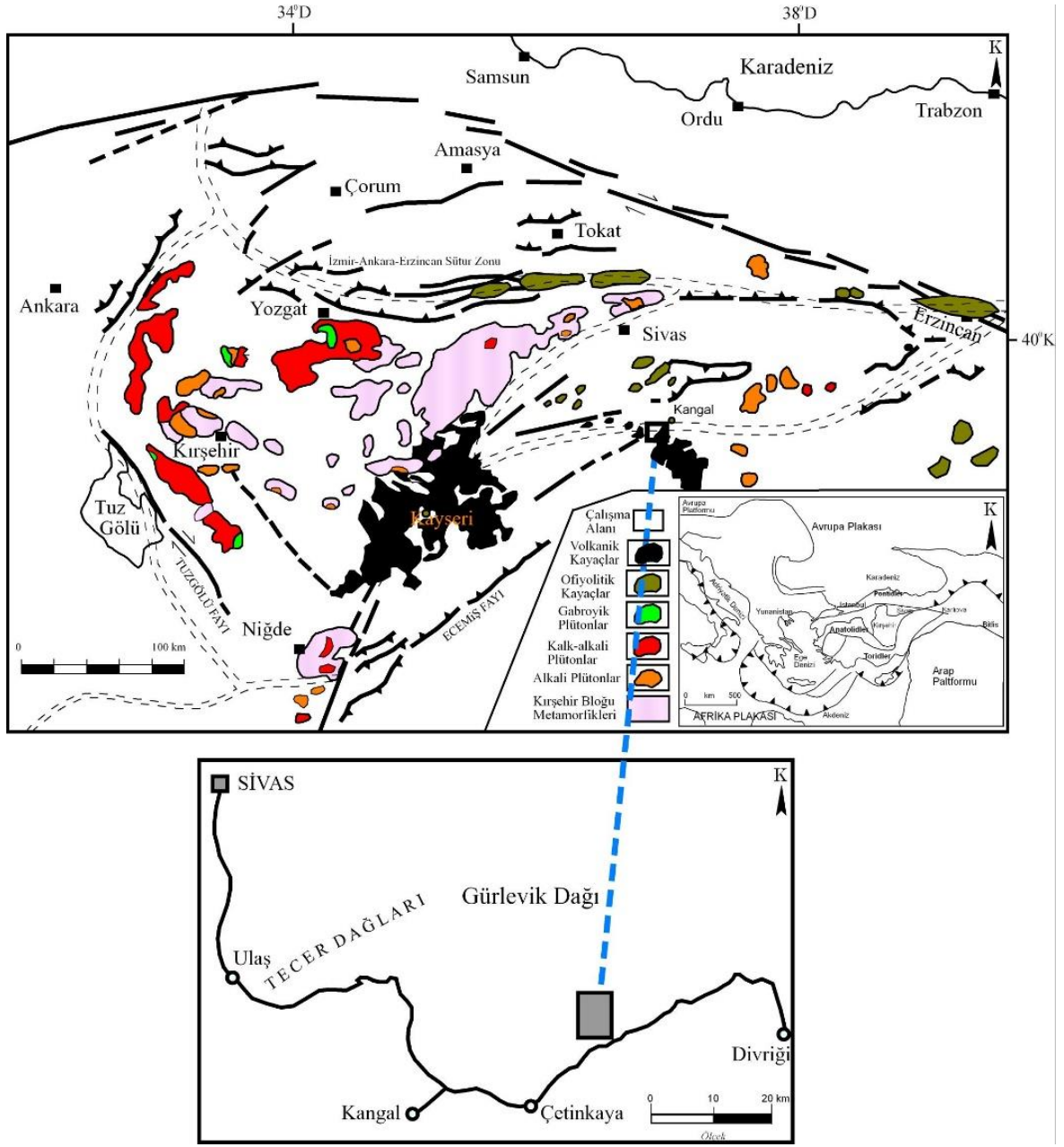
2. Analitik Yöntemler

Arazi çalışmaları kapsamında Sivas ilinin Kangal ve Divriği ilçeleri arasındaki J39 paftasına (1/100.000 ölçekli) ait olan b3 (1/25.000 ölçekli) paftası içerisinde kalan yaklaşık 150 km²'lik alanın jeolojik haritası yapılmıştır (Şekil 3). Bu haritalama çalışması sırasında aynı zamandan bölgede yüzlekler sunan kayaların birbirleriyle olan ilişkileri tanımlanmış ve çalışma sahasında değişik kayalardan toplam 78 tane kayaç numunesi toplanmıştır.

İnceleme alanından toplanan 78 adet kayaç örneğinin tamamının petrografik amaçlı ince kesitleri Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü incekesit laboratuvarında yapılmıştır. İnce kesitlerin mineralojik-petrografik incelemeleri Nikon H 550S Eclipse 50iPOL tipi binoküler alttan aydınlatmalı araştırma mikroskopunda [7], [8], [9], [10] tarafından tanımlanan optik mineralojik özelliklere göre gerçekleştirilmiştir.

Jeokimyasal olarak yorumlanacak olan kayaç numunelerinin altere kısımları çekikle kırılarak temizledikten sonra 3-5 cm'lik parçalar halinde kırılmıştır. Bu örnekler daha sonra Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü kırma-öğütme laboratuvarında Fritsch marka çeneli kırıcı ile 0,5 cm'den daha küçük tane boyuna gelinceye kadar kırılmıştır. Sonrasında bu örnekler aynı laboratuvarında bulunan silikon-karbid havanlı titreşimli değirmen ile 200 mesh elek altına geçebilecek tane boyutuna ulaşınca kadar öğütülmüştür. Elde edilen toz numuneler plastik numune torbalarına konularak jeokimyasal ana, eser ve nadir toprak elementi analizleri ile Kanada Acme laboratuvarına gönderilerek analizleri yapılmıştır.

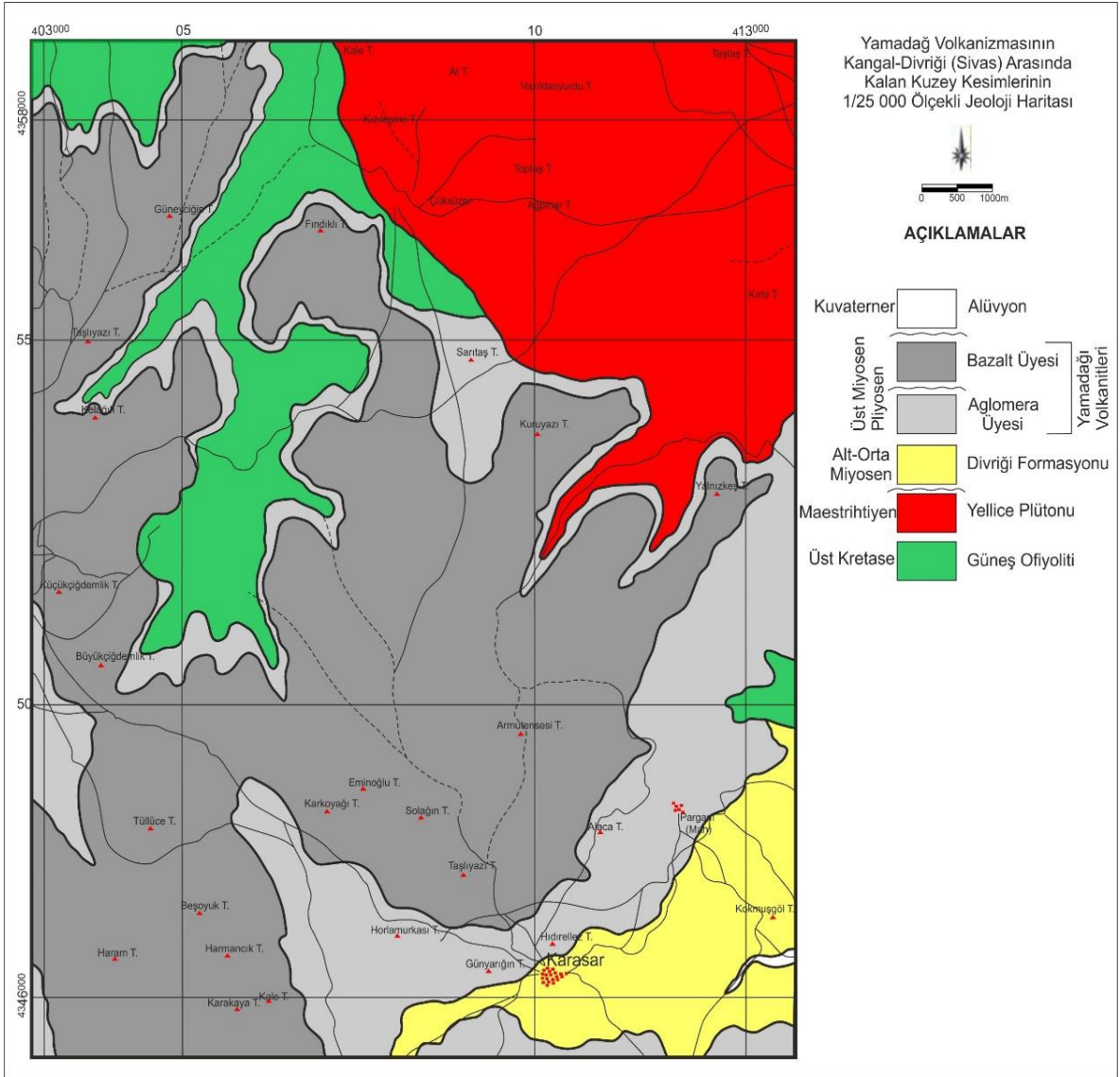
Alterasyon bakımından oldukça iyi durumda oldukları tespit edilen 18 adet kayaç numunesinin ana, eser ve nadir toprak elementi analizleri Acme Analytical Laboratories'de (Vancouver-Kanada) ICP-MS (Inductive Couple Plasma-Mass Spectrometry) yöntemiyle gerçekleştirilmiştir.



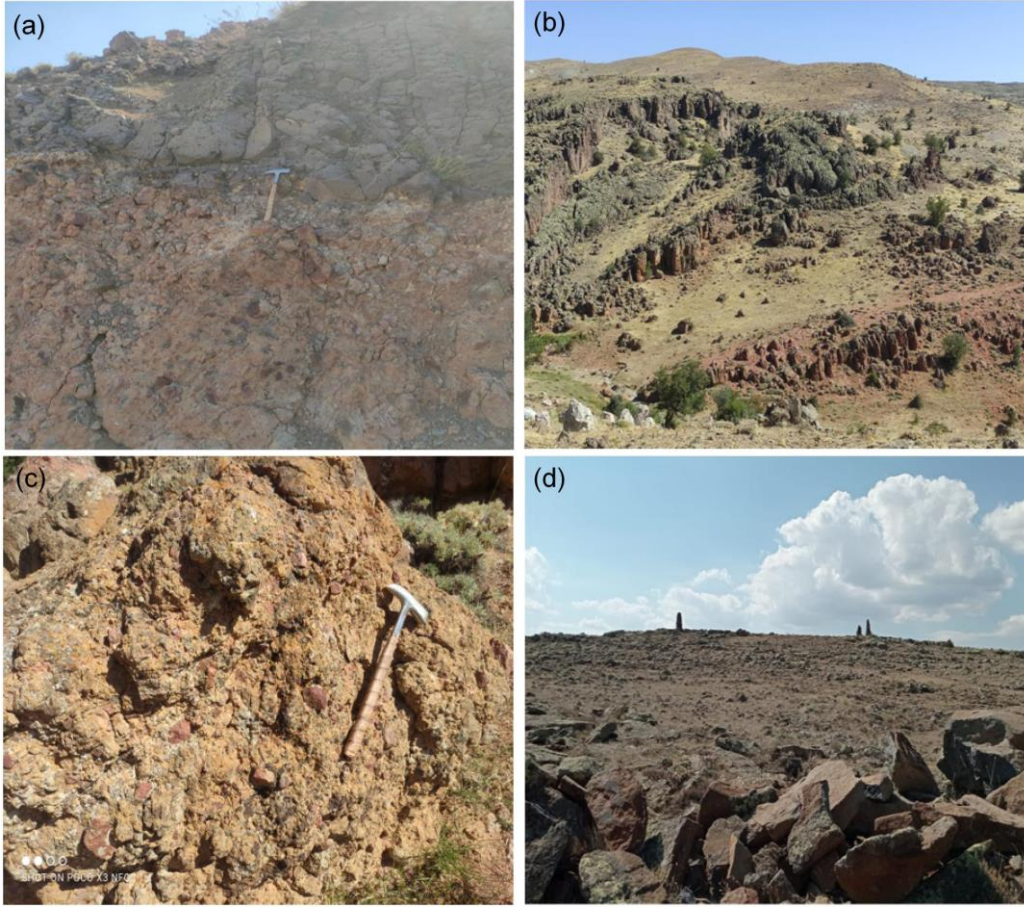
Şekil 1. Çalışma alanının yerbulduru haritası [6].

Jeolojik Yaş	Formasyon Litodem	Litoloji	Açıklamalar
Kuvaterner			Alüvyon
NEOJEN	Pliyosen	Yamadağı Volkanitleri	Bazalt, Andezit, Aglomera
	Miyosen		
	Üst		
	Alt Orta	Divriği Fm.	Kireçtaşı, Konglomera, Kumtaşı
ÜST KRETASE	Maestrihtiyen	Yellice Plütonu	Granitoidler: Siyenit, Granit, Granodiyorit, Diyorit
	Üst Kampaniyen	Güneş Ofiyoliti	Serpantinit, Peridotit, Gabro, Dunit

Şekil 2. Çalışma alanının geliştirilmiş stratigrafik kolon kesiti.



Şekil 3. Çalışma alanının jeoloji haritası



Şekil 4. Çalışma alanının arazi görüntüleri; a) Yamadağı Volkanitlerini oluşturan aglomera seviyeleri ve üzerine gelen bazalt seviyelerinin ilişkileri, b) Yamadağı Volkanitlerinde içerisinde gözlenen bazaltik ve andezitik aglomera seviyelerinin genel görünüşleri, c) Yamadağı Volkanitlerinin taban seviyelerini oluşturan aglomeraların yakın görünüşleri, d) Yamadağı Volkanitlerini oluşturan bazalt lavlarının genel görünümü.

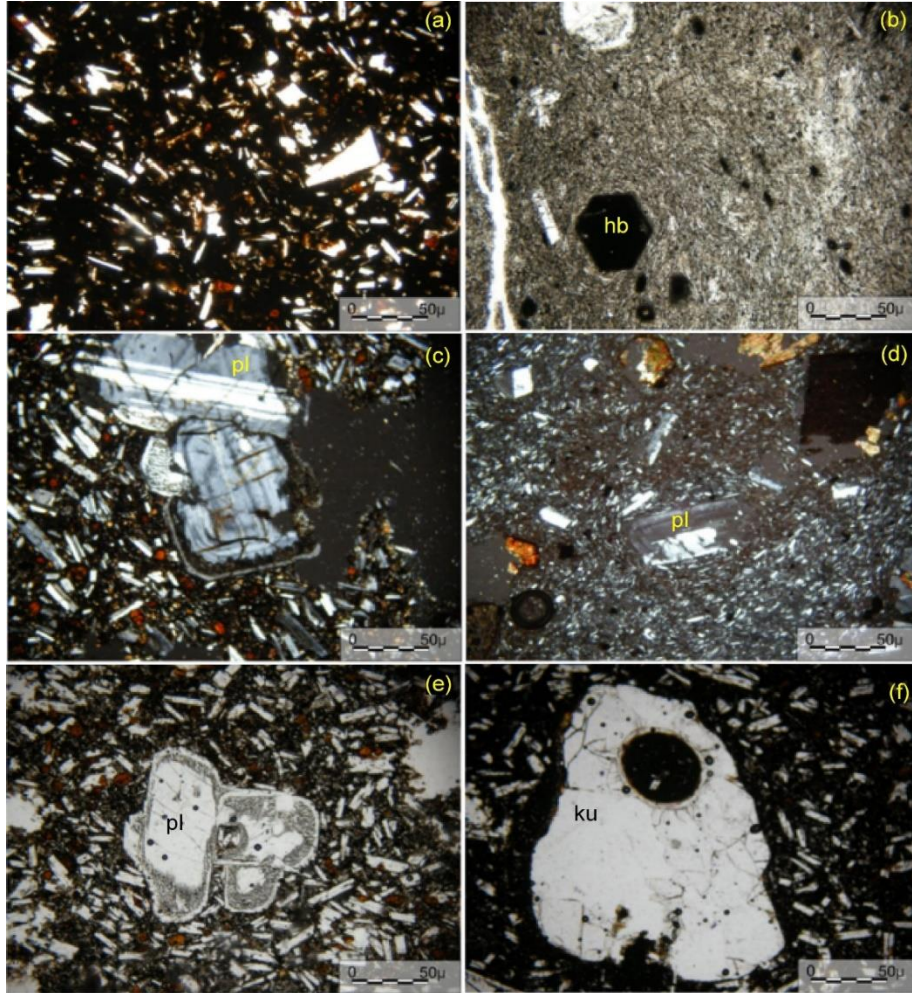
3. Petrografik İnceleme

Çalışma alanındaki en genç birim Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı Yamadağı Volkanitleridir. Yamadağı Volkanitlerinin mikroskobik çalışmalarda; bazaltik aglomera, andezitik aglomera, andezit, bazaltik andezit trakibazalt ve bazalt'lardan oluştuğu saptanmıştır [11]. Yamadağı Volkanitlerini oluşturan aglomeratik kayalar bazaltik ve andezitik aglomera bileşimi sergilemektedir. Aglomeratik kayalar genel olarak hipohiyalin porfirik doku sergilemektedir. Bazaltik aglomeralar mineralojik olarak plajiyoklaz, olivin ve ojit mineralleri içerirken (Şekil 5a), andezitik aglomeralar ise plajiyoklaz ve çoğunlukla opasitleşmiş hornblend minerallerinden oluşmaktadır (Şekil 5b). Piroklastik kayalara özgü olarak gelişen akma dokusu, Yamadağı Volkanitlerindeki aglomeratik kayaların büyük çoğunluğunda izlenmektedir. Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı Yamadağ Volkanitlerini oluşturan lavlar yaygın olarak bazaltlardan daha az oranda da andezitlerden oluşmaktadır. Bazaltlarda holokristalin porfirik doku, hipokristalin porfirik doku ve hipohiyalin porfirik doku gözlenmektedir. Yamadağ Volkanitlerini oluşturan ve çalışma sahasının en yaygın litodem birimini oluşturan bazaltlar mineralojik bileşim olarak plajiyoklaz, olivin ve ojit minerallerinden oluşmaktadır. Plajiyoklaz mineralleri fenokristaller, mikrofeno-kristaller ve aynı zamanda kayacın hamurunda mikrolitler şeklinde gözlenmektedir. Plajiyoklazlar renksiz, çubuğumsu prizmatik biçimli, polisentetik ikizlenme ve yer yer zonlu dokulu olarak gözlenmektedir (Şekil 5c). Plajiyoklaz fenokristalleri içerisinde magma karışım dokusunun petrografik kanıtları olarak [12], [13], [14] farklı sönme konumlu plajiyoklaz mineralleri de görülmektedir (Şekil 5d). Yine homojen magma karışımının petrografik kanıtlarından olan plajiyoklaz minerallerinin magma ile etkileşimi ile ortaya çıkan erime çözünme yapıları da yaygın olarak izlenmektedir (Şekil 5e).

Olivin mineralleri; fenokristal, mikrofenokristal ve mikrolitler şeklinde gözlenmekte olup, yüksek optik engebeli, çatlaklı bir yapıya sahip olup yaygın olarak da iddingsitleşme gösterdiği için kızılımsı renklindedir. Piroksen grubu minerallerden yaygın olarak ojit mineralleri de fenokristal, mikrofenokristal ve kayacın hamurunda mikrolitler şeklinde gözlenmektedir. Klinopiroksenlerden ojit minerali renksiz olup, yarı özşekilli/özşekilli, pleokroyizma göstermemektedir. Özşekilli olan ojit mineralleri C optik eksenine dik geçmiş kesitlerinde sekizgen ve dilinimler arası açısı yaklaşık dik konumludur.

Yamadağı Volkanitleri içerisinde nadiren ikincil olarak yerleşmiş ve daha sonra da kenar zonlarından itibaren magma ile sıcak dokanak etkileşimine uğramış ikincil kuvars mineraline de rastlanmıştır (Şekil 5f).

Çalışma sahasında yaygın olarak görülen Yamadağı Volkanitlerini oluşturan bir diğer kayaç grubu ise andezit ve bazaltik andezitlerdir. Andezitlerin mineralojik bileşimi plajiyoklaz, hornblend ve daha az oranda da kersütit minerallerinden oluşmaktadır. Andezitler dokusal olarak ise hipokristalin porfirik doku ve hipohiyalin porfirik doku göstermektedir. Hornblendler genellikle yeşilimsi, prizmatik, yüksek optik engebeli yarı özşekilli ve özşekilli fenokristaller olarak gözlenmektedir. Andezitler içerisinde gözlenen kersütitler ise kızılımsı kahverengi, yüksek optik engebeli mineraller şeklinde gözlenmektedir. Dasitik kayaçlar ise kuvars, plajiyoklaz ve hornblend minerallerinden oluşmaktadır. Özellikle kuvars mineralleri dasitik kayaçlar içerisinde mikrolitler halindedir.



Şekil 5. Yamadağı Volkanitlerinin incekesit görüntüleri; a) Bazaltik aglomeralarda gözlenen hipohiyalin porfirik dokunun görünümü, b) Andezitik aglomeralarda tamamen opasitleşmiş hornblend mineralinin görünümü, c) Bazaltlarda gözlenen zonlu dokulu plajiyoklaz mineralinin görünümü, d) Bazaltlarda gözlenen farklı yönlerde konumlu plajiyoklaz mineralinin görünümü, e) Bazaltlarda gözlenen erime çözünme yapılarının görünümü, f) Bazaltlarda gözlenen ikincil kuvars mineralinin görünümü (pl: plajiyoklaz, hb: hornblend, ku: kuvars).

4. Jeokimyasal İnceleme

Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı Yamadağı Volkanitleri toplam alkali-silis [15] adlandırma diyagramında bazalt ve andezit olarak adlandırılmışlardır (Şekil 6). Yamadağı Volkanitlerinin ana element, iz element ve nadir toprak elementi analiz sonuçları da Tablo 1’de verilmiştir.

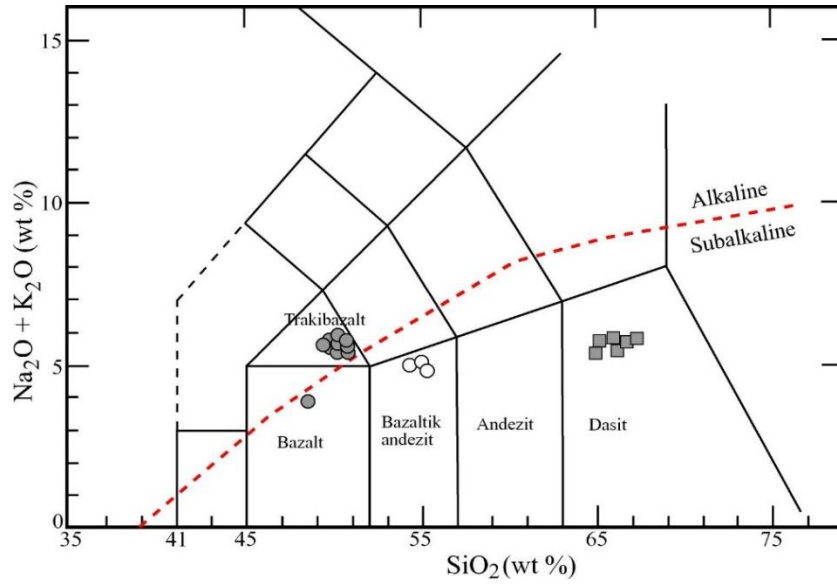
Yamadağı Volkanitlerinin jeokimyasal karakterini belirlemeye yönelik hazırlanan toplam alkali-silis diyagramına bakıldığında trakibazaltların alkalın, bazalt, bazaltik andezit ve dasit’lerin ise subalkalin alanda yerleştikleri görülmektedir (Şekil 6). Subalkali kayaçların toleyitik-kalkalkalin alt gruplarını belirlemeye yönelik AFM diyagramında ise kalkalkalin karakter [16] gösterdikleri görülmektedir (Şekil 7).

Tablo 1. Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı Yamadağı Volkanitlerinin ana element, iz element ve nadir toprak elementleri analiz sonuçları. (AK: Ateşte kayıp)

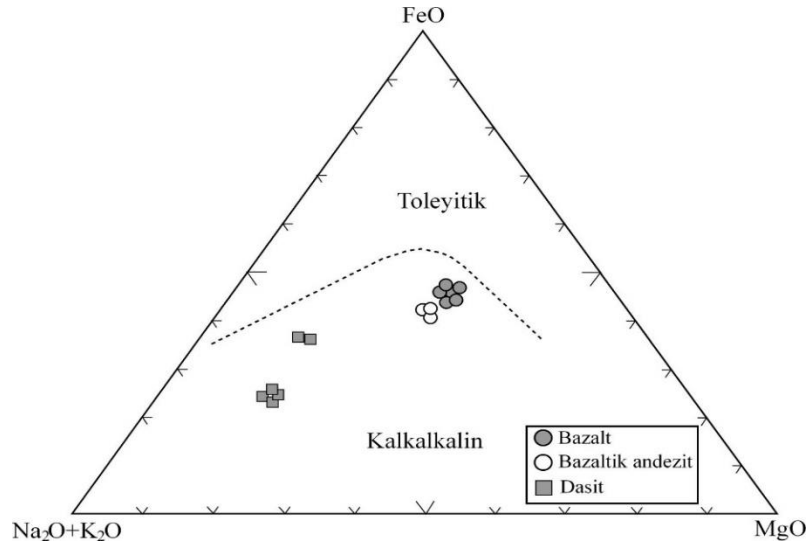
Örnek	DA-3	DA-6	DA-7	DA-10	DA-14	DA-21	DA-23	DA-29	DA-30
SiO ₂	66.14	65.89	66.63	65.02	67.13	55.02	54.30	65.13	55.31
TiO ₂	0.47	0.47	0.45	0.52	0.46	1.13	1.12	0.52	1.11
Al ₂ O ₃	16.49	16.44	16.16	16.89	16.16	16.56	16.33	16.69	16.71
Fe ₂ O ₃	3.32	3.29	3.27	3.89	3.25	8.23	8.20	3.94	8.09
MgO	1.40	1.35	1.30	1.34	1.29	5.03	5.03	1.29	4.93
MnO	0.07	0.06	0.06	0.07	0.06	0.14	0.14	0.08	0.13
CaO	4.43	4.51	4.24	4.83	4.19	7.82	8.04	5.04	7.36
Na ₂ O	4.23	4.04	4.10	4.24	4.36	3.85	3.83	4.40	3.91
K ₂ O	1.29	1.73	1.57	1.18	1.44	1.19	1.17	1.20	1.04
P ₂ O ₅	0.23	0.22	0.21	0.30	0.20	0.17	0.20	0.32	0.18
Cr ₂ O ₃	0.003	0.004	0.004	0.003	0.003	0.020	0.020	0.06	0.018
AK	1.8	1.8	1.8	1.5	1.3	0.6	1.4	1.2	1.0
Toplam	99.87	99.86	99.86	99.86	99.86	99.79	99.80	99.86	99.80
K	10709	14361	13033	9796	11954	9879	9713	9962	8633
Ti	2817	2817	2697	3117	2757	6773	6713	3117	6653
P	1004	960	916	1309	873	742	873	1396	785
Ni	20	20	20	20	20	58	68	20	43
Sc	6	6	6	7	6	20	19	7	20
V	53	49	56	57	55	147	150	63	148
Co	20.2	21.6	26.2	16.0	31.7	52.7	42.2	16.3	39.4
Ga	16.6	17.7	17.1	16.8	16.7	16.5	15.1	15.6	15.9
Rb	31.3	37.6	35.8	23.7	37.2	27.1	28.4	22.0	39.1
Sr	304	319	317	419	314	346	338	401	345
Y	15.5	14.0	13.9	20.8	14.1	20.1	21.3	15.9	21.2
Zr	244	247	244	235	240	132	130	219	137
Nb	7.7	7.9	8.4	12.5	8.3	6.6	5.8	11.2	6.9
Cs	0.8	0.9	0.7	0.1	0.9	0.8	1.2	0.2	1.9
Ba	318	332	331	348	352	238	251	322	240
La	27.4	25.6	25.6	36.9	26.0	16.6	17.4	32.2	18.5
Ce	49.2	48.3	46.7	61.2	45.4	33.8	32.3	55.7	34.5
Pr	5.28	5.16	5.15	6.39	5.13	3.70	3.58	5.60	3.81
Nd	20.0	19.0	18.8	25.2	19.2	15.7	14.3	20.8	15.4
Sm	3.81	3.47	3.56	4.42	3.47	3.00	3.14	3.71	3.28
Eu	1.05	1.00	1.07	1.27	0.97	1.09	1.09	1.09	1.09
Gd	3.40	3.37	3.23	4.32	3.17	3.81	3.83	3.55	3.90

Tb	0.49	0.45	0.47	0.62	0.42	0.62	0.61	0.49	0.60
Dy	2.85	2.55	2.62	3.52	2.56	3.95	3.59	2.95	3.79
Ho	0.49	0.51	0.47	0.70	0.49	0.80	0.79	0.55	0.80
Er	1.46	1.36	1.18	2.05	1.29	2.41	2.49	1.54	2.33
Tm	0.22	0.19	0.18	0.28	0.16	0.33	0.32	0.22	0.35
Yb	1.31	1.30	1.19	1.74	1.12	2.20	2.09	1.38	2.11
Lu	0.22	0.19	0.17	0.25	0.16	0.31	0.34	0.23	0.32
Hf	5.4	5.2	5.1	5.1	5.0	3.3	3.1	4.8	3.3
Ta	0.6	0.5	0.7	0.7	0.7	0.6	0.5	0.8	0.5
Th	6.4	6.6	6.9	8.8	6.5	6.8	7.3	8.3	8.4
U	1.8	1.8	2.1	2.2	1.9	2.1	2.0	2.0	2.3
Örnek	DA-41	DA-43	DA-44	DA-46	DA-47	DA-56	DA-57	DA-74	DA-75
SiO ₂	50.49	50.77	50.45	49.86	50.12	50.20	49.87	50.29	50.36
TiO ₂	1.70	1.69	1.72	1.72	1.72	1.73	1.73	1.70	1.68
Al ₂ O ₃	16.27	16.39	16.38	16.38	16.28	16.43	16.56	16.14	16.13
Fe ₂ O ₃	9.79	9.84	10.05	9.95	9.73	10.00	10.09	9.83	9.92
MgO	6.12	5.86	5.97	6.00	5.37	5.62	5.80	6.02	6.50
MnO	0.15	0.15	0.17	0.13	0.14	0.13	0.14	0.12	0.12
CaO	7.18	7.06	7.08	7.22	7.26	7.18	7.24	6.95	7.03
Na ₂ O	4.26	4.20	4.29	4.21	4.15	4.25	4.30	4.16	4.13
K ₂ O	1.38	1.42	1.38	1.36	1.49	1.38	1.40	1.35	1.32
P ₂ O ₅	0.36	0.36	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37
Cr ₂ O ₃	0.021	0.023	0.048	0.023	0.021	0.023	0.022	0.020	0.021
AK	2.0	1.9	1.8	2.5	3.1	2.4	2.2	2.8	2.1
Toplam	99.74	99.74	99.74	99.75	99.75	99.75	99.74	99.75	99.74
K	11456	11788	11456	11290	12369	11456	11622	11207	10958
Ti	10190	10130	10310	10310	10310	10370	10370	10190	10070
P	1571	1571	1614	1614	1614	1614	1614	1614	1614
Ni	107	110	111	109	104	110	115	109	109
Sc	17	17	18	17	17	18	18	17	17
V	164	161	166	177	163	176	183	169	161
Co	43.2	39.8	42.9	43.4	36.5	42.9	39.8	36.6	38.8
Ga	16.4	16.7	17.7	16.1	15.9	16.5	16.0	16.1	15.8
Rb	31.7	34.8	30.9	29.2	35.4	30.0	29.8	29.7	29.5
Sr	507	517	523	497	559	493	492	482	486
Y	24.2	25.4	23.8	23.5	25.0	24.5	24.3	23.5	23.9
Zr	204	205	205	201	205	201	200	196	198
Nb	13.2	13.9	13.1	13.5	13.6	13.7	13.8	13.2	12.9
Cs	0.9	0.8	1.1	1.4	1.0	1.2	0.8	1.2	1.1
Ba	264	307	274	258	400	269	259	263	248
La	26.5	29.3	25.7	25.8	33.2	26.8	26.2	25.2	25.9
Ce	50.3	55.9	52.2	50.9	63.3	52.5	48.8	50.8	49.0
Pr	5.70	6.30	5.75	5.59	6.57	5.82	5.76	5.51	5.51
Nd	23.3	23.4	24.3	23.1	25.9	22.9	23.6	21.9	22.7
Sm	4.71	5.12	5.03	5.09	5.02	4.74	4.64	4.62	4.60
Eu	1.56	1.57	1.61	1.48	1.58	1.52	1.53	1.47	1.57
Gd	4.78	5.17	5.46	5.32	5.26	4.94	5.15	4.94	5.09
Tb	0.76	0.76	0.73	0.74	0.76	0.75	0.76	0.72	0.73
Dy	4.62	4.54	4.67	4.67	4.34	4.40	4.61	4.44	4.22

Ho	0.89	0.92	0.91	0.87	0.91	0.82	0.88	0.88	0.85
Er	2.52	2.62	2.53	2.37	2.45	2.52	2.34	2.45	2.26
Tm	0.33	0.34	0.36	0.31	0.34	0.33	0.34	0.31	0.32
Yb	2.15	2.25	2.03	1.99	2.11	2.12	2.19	2.05	2.19
Lu	0.33	0.33	0.34	0.30	0.31	0.29	0.30	0.31	0.31
Hf	4.4	4.4	4.8	4.0	4.4	4.5	4.2	4.4	4.0
Ta	0.8	0.7	0.7	0.8	0.8	0.6	0.7	0.5	0.7
Th	7.1	8.1	7.6	7.0	10.6	7.1	7.5	6.8	6.8
U	1.7	2.0	1.7	1.5	2.5	1.5	1.4	1.6	1.7



Şekil 6. Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı Yamadağı Volkanitlerinin toplam alkali-silis [15] diyagramındaki konumları.

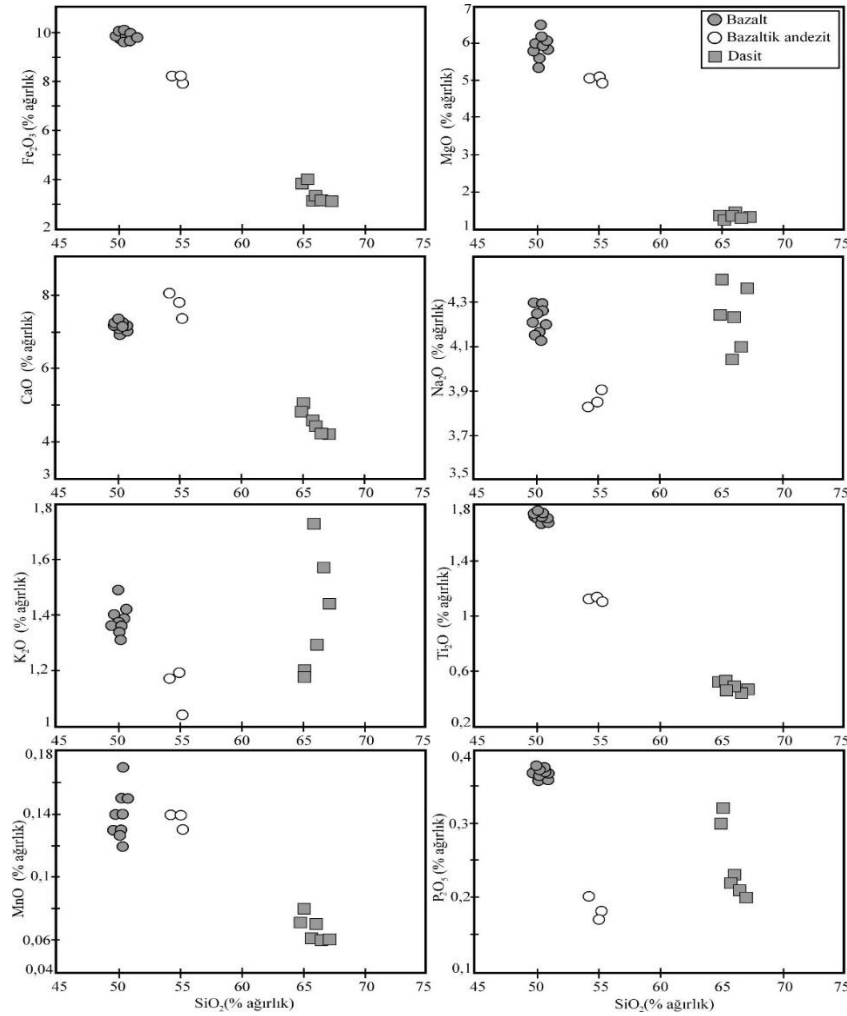


Şekil 7. Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı Yamadağı Volkanitlerinin AFM üçgen diyagramındaki konumları [16]. Fraksiyonel kristalleşme

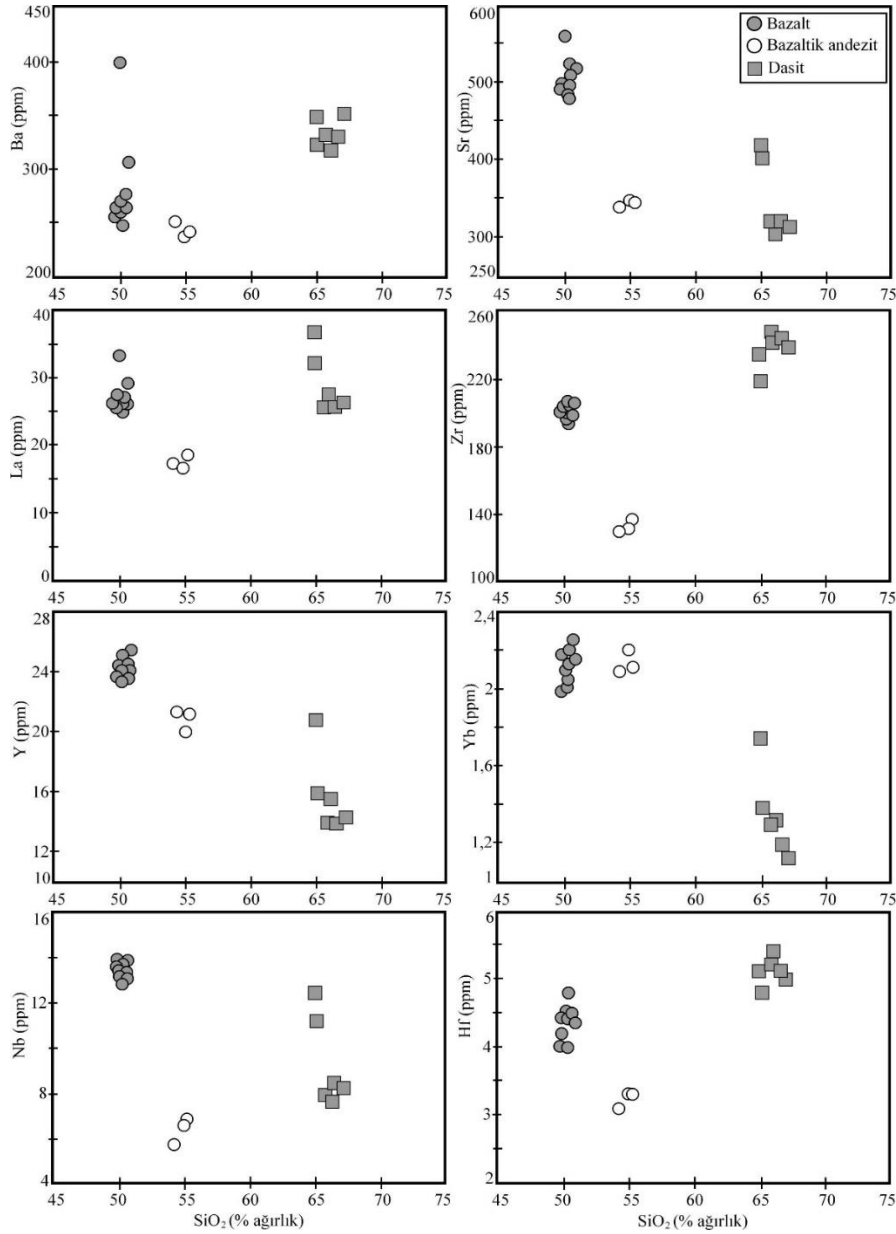
Yamadağı Volkanitlerinin ana element içeriklerine baktığımızda SiO_2 içeriklerinin % 49,87-67,13 aralığında olduğu görülmektedir. Yamadağı Volkanitlerinin ana ve eser element içerikleri ayrışma indisi olarak alınan SiO_2 'ye göre değişim diyagramlarına bakıldığında uyumlu eğilimler izlenmektedir (Şekil 8; 9).

Yamadağı Volkanitlerinin bazaltik uç üyelerinin magmadan itibaren meydana gelen ilk kristalleşmelerle, kristallerin magma ortamında sıvı-kristal temasının kesilmesi ile oluşan fenokristallerin magma ortamından uzaklaşması ile oluştuğu düşünülmektedir. Sonrasında magma ortamının bazik kayaçları oluşturan mineraller / elementler bakımından fakirleşmesi ve bu minerallerin / elementlerin tüketilmesi ile sonraki evrelerde de ortaç ve asidik kayaçların oluştuğu ana ve eser elementlerin SiO_2 'ye karşı olan diyagramlarındaki uyumlu eğilimlerde izlenmektedir (Şekil 8; 9).

Ana elementlerdeki bu uyumlu eğilimler bazaltlardan dasitlere doğru Fe_2O_3 , MgO , CaO , TiO_2 , MnO ve P_2O_5 'de azalma şeklinde izlenirken, K_2O ve Na_2O 'da ise nispeten artma eğilimi şeklindedir (Şekil 8). Benzer durum eser elementlerin SiO_2 'ye olan değişim diyagramlarında da izlenmektedir. Eser elementlerin değişim diyagramlarında bazaltlardan dasitlere doğru Ba, Zr, La ve Hf element oranlarında artma görülürken, Sr, Y, Yb ve Nb elementlerinde ise azalma eğilimi izlenmektedir (Şekil 9). Bazik kayaçlarda bol gözlenen elementler magmanın kristalleşmesinin ilk evrelerinde Sr, Y, Yb ve Nb gibi elementler Ca-plajiyoklaz, olivin ve piroksen minerali tarafından tüketilmekte ve kristalleşmenin son evrelerinde dasitik kayaçlarda nispeten daha az miktarlarda görülmektedir. Bazik magmatik kayaçlarda dasitik kayaçlara göre daha az bulunan Ba, Zr, La ve Hf gibi elementler ise kristalleşmenin ilk evrelerinde sıvı fazda kalmayı tercih ederken, bazik kayaçların magma ortamını terk etmesinden sonra kristalleşmenin geç evrelerinde Na-plajiyoklaz ve hornblend minerallerin bünyesinde girerek kristalleşmektedir.

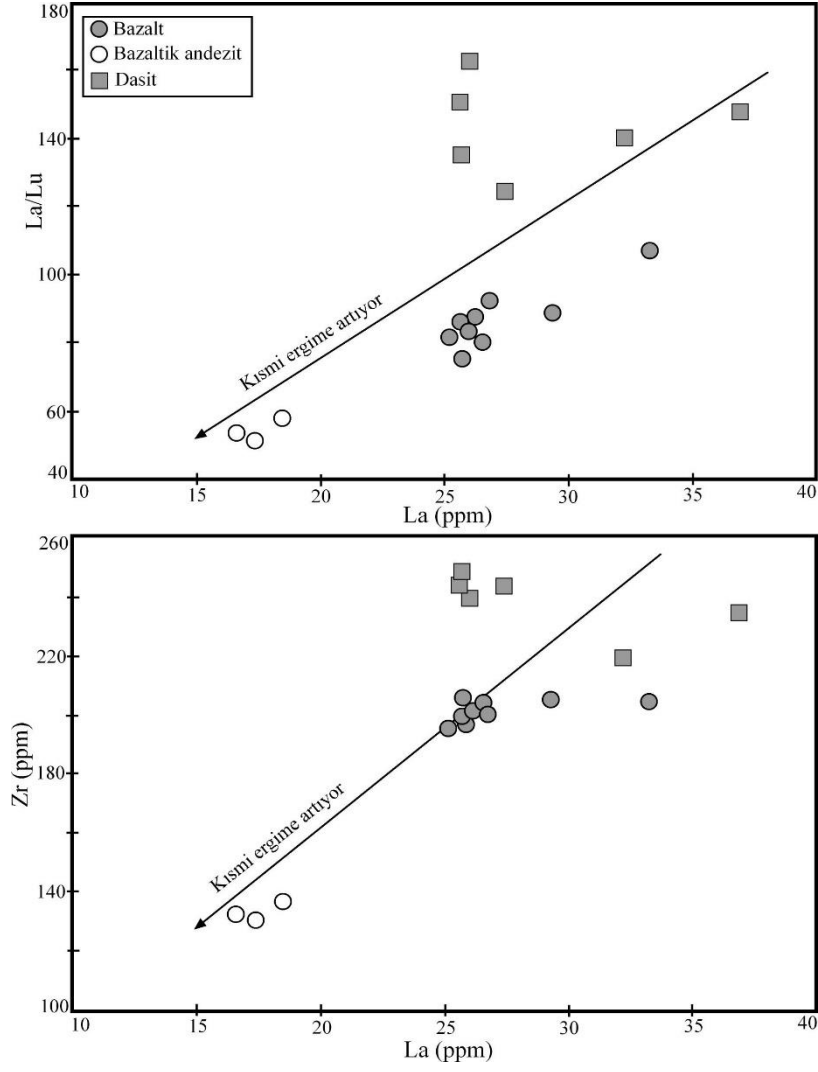


Şekil 8. Yamadağı Volkanitlerinin ana element içeriklerinin SiO_2 'ye göre olan değişim diyagramındaki konumları.



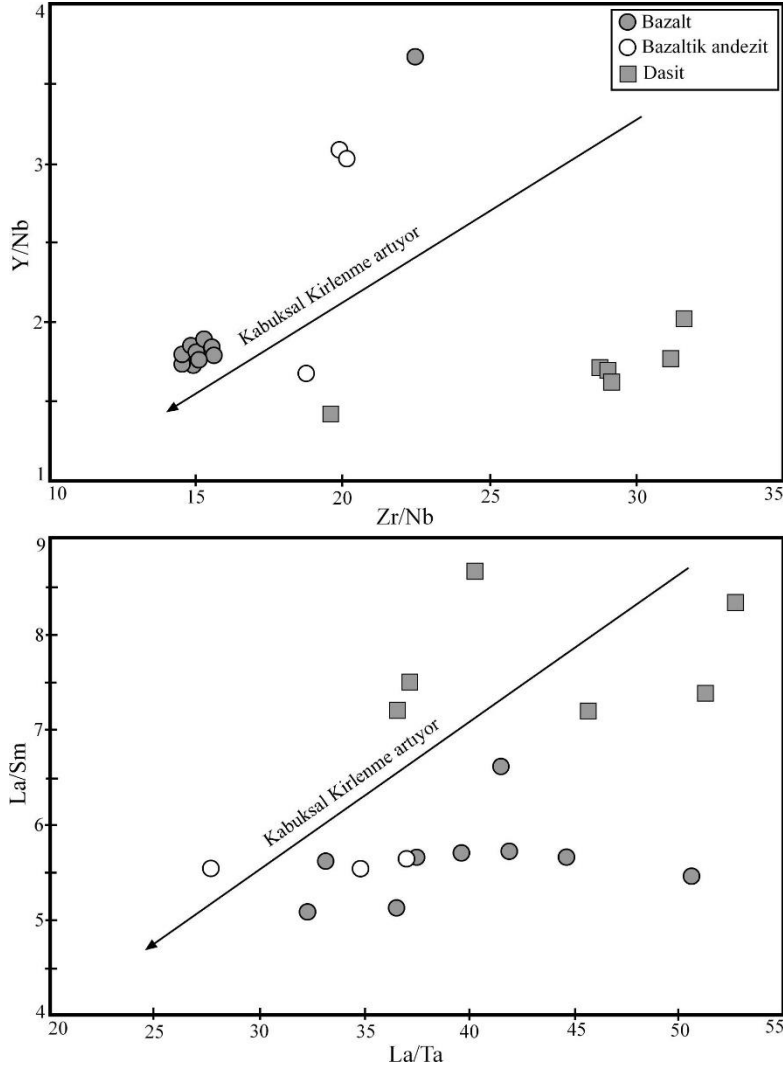
Şekil 9. Yamadağı Volkanitlerinin bazı eser element içeriklerinin SiO_2 'ye göre olan değişim diyagramındaki konumları. Kısmi ergime

Yamadağı Volkanitlerinin kısmi ergime oranlarına baktığımızda ise dasitik volkanik kayalardan bazaltik volkanik kayalara doğru kısmi ergime miktarlarında artış olduğu bazı eser elementlerin birbirlerine göre olan Harker değişim diyagramlarında belirgin olarak izlenmektedir [18]. Burada özellikle hafif nadir toprak element miktarlarının ağır toprak elementlere göre oranlandığında, bazalt ve bazaltik andezitlerdeki oranlarının dasitlere göre nispeten daha yüksek olması ile birlikte bazalt ve bazaltik andezitlerde kısmi ergime miktarları dasitlere göre daha fazladır. Benzer şekilde Zr gibi kalıcılığı düşük elementlerle Lu gibi ağır nadir toprak elementlerin birbirlerine göre konumları dikkate alındığında da benzer ilişki görülmüştür (Şekil 10).



Şekil 10. Yamadağı Volkanitlerinin a) La/Lu-La ve b) Zr-La değişim diyagramındaki konumları [18]. Kabuksal kirlenme.

Yamadağı Volkanitlerinin kabuksal kirlenme etkilerine baktığımızda ise dasitik volkanik kayalarda kabuksal kirlenme etkileri gözlenmezken, bazaltik andezitlerde çok az, bazaltlarda ise belirgin miktarda kabuksal kirlenmenin etkileri eser elementlerin birlerine göre oranlandığı Harker değişim diyagramlarında izlenmektedir [18] (Şekil 11).



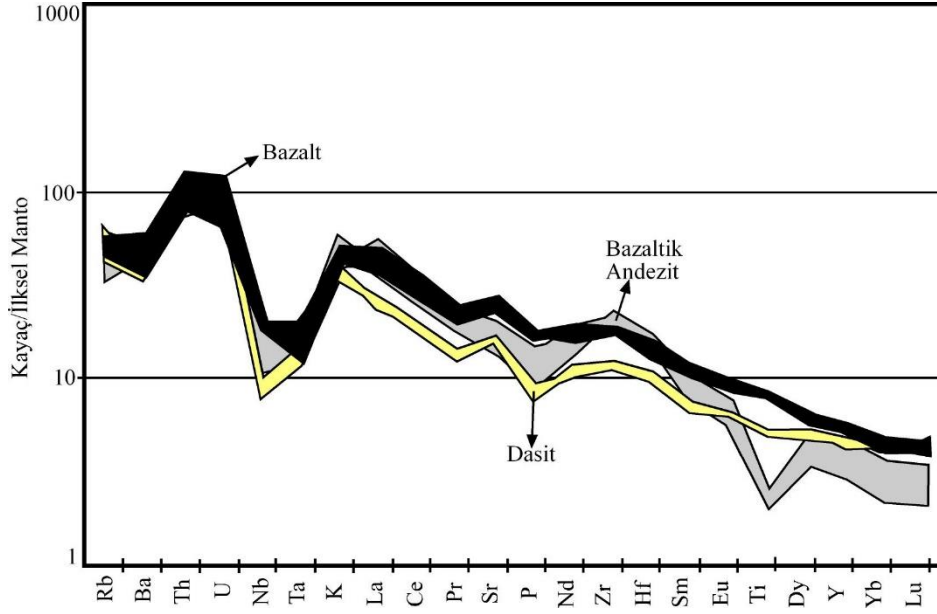
Şekil 11. Yamadağı Volkanitlerinin a) Y/Nb-Zr/Nb ve b) La/Sm ve La/Ta değişim diyagramındaki konumları [18]. Manto kaynağı

Yamadağı Volkanitlerinin birincil mantoya göre normalize edilmiş örümcek diyagramındaki iz element dağılım desenleri incelendiğinde hafif nadir toprak elementlerin ağır nadir toprak elementlere göre daha fazla zenginleşmiş olduğu izlenmektedir (Şekil 12). Hafif nadir toprak elementleri zenginleşmesinin daha fazla olması Yamadağı Volkanitlerinin magmadan itibaren kristallenmesi esnasında kabuksal kökenli malzeme katkısının daha fazla olduğuna işaret etmektedir.

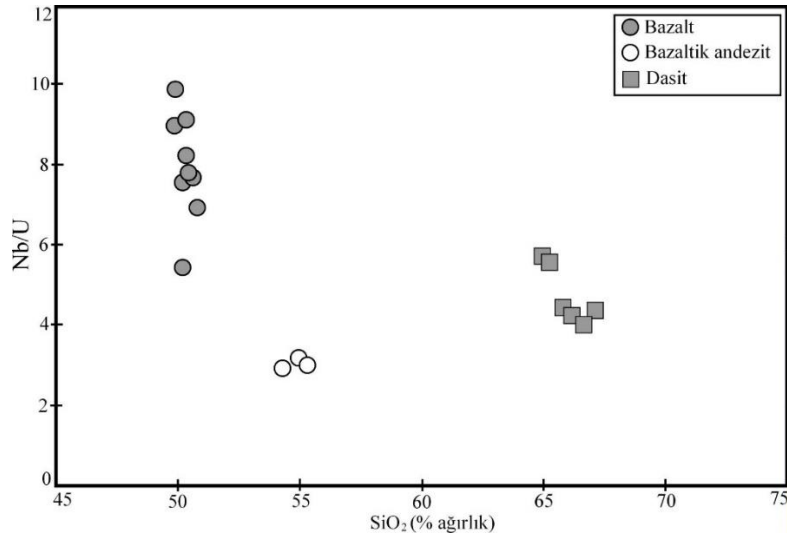
Yamadağı Volkanitleri içerisindeki bazaltlarda ve bazaltik andezitlerde Sr ve K gibi kalıcılığı düşük elementler ile Zr, Th gibi kalıcılığı düşük elementlerde pozitif dağılım deseni gözlenirken, Nb, Ta ve P gibi kalıcılığı yüksek elementlerde negatif dağılım desenleri gözlenmektedir. Dasitlerde ise Sr, Rb, K gibi kalıcılığı düşük elementlerde ve Zr, Th gibi kalıcılığı düşük elementlerde pozitif dağılım deseni gözlenmekte, Nb, Ti ve P gibi kalıcılığı yüksek elementlerde ise negatif dağılım desenleri görülmektedir (Şekil 12). Pozitif dağılım desenleri gösteren elementlerin bölümsel ergime süreçleri esnasında bölümsel ergimeye bol miktarda katıldıkları, Nb, Ti, Ta ve P gibi negatif dağılım deseni gösteren elementlerin ise bölümsel ergime süreçlerine çok fazla katılmadıkları düşünülmektedir [17], [18].

Yamadağı Volkanitlerinin SiO_2 'ye göre olan bazı değişim diyagramındaki konumları incelendiğinde kökenleri hakkında bilgiler edinilebilmektedir. Örneğin Nb/U'un SiO_2 'ye göre olan değişim diyagramındaki konumları incelendiğinde Yamadağı Volkanitlerinin tamamının 2-10 arasında yoğunlaştığı görülmektedir (Şekil 13). Kabuksal kökenli kayaç değerlerinin yaklaşık 8.93, alt kıtasal kabuk kayaçlarının yaklaşık 25 ve manto kökenli kayaç değerlerinin 49 ± 10 civarında konumlandığı [19] düşünüldüğünde Yamadağı Volkanitlerinin

kabuksal kökenli kayalardan itibaren türemiş olabileceği ya da magmanın soğuması esnasında kabuksal etkileşimin miktarının oldukça etkin olduğu şeklinde yorumlanabilmektedir.



Şekil 12. Yamadağı Volkanitlerinin eser element konsantrasyonlarının ilksel mantoya göre [20] normalize edilmiş örümcek diyagramındaki konumları.



Şekil 13. Yamadağı Volkanitlerinin Nb/U-SiO₂ değişim diyagramındaki konumları.

5. Tartışma ve Sonuçlar

Üst Miyosen-Pliyosen yaşlı Yamadağı Volkanitleri baskın olarak bazalt ve trakibazalt ile bazaltik andezit ve dasitlerden oluşmakta ve kalkalkalin karakter sergilemektedir. Ana element ve eser element değişim diyagramlarında bu volkanitlerin oluşum sürecinde fraksiyonel kristalleşme süreçlerinin varlığı izlenmektedir. Bazaltik andezitlerden dasitlere doğru geçişte bileşimsel bir boşluğun varlığı da görülmekte olup, bunun temel nedeninin Yamadağ Volkanitlerini oluşturan magmanın kabuksal kayalarla etkileşimi sonucu silis içeriğindeki ani yükseliş olabileceği öngörülmektedir. Yamadağ Volkanitlerinde kısmi ergime süreçlerinin etkinliği de eser elementlerin değişim diyagramlarında görülmektedir. Ayrıca bazik magmatik kayalardan asidik magmatik

kayaçlara doğru kabuksal kirlenmenin etkileri de belirgin bir şekilde artış göstermiştir. Yamadağı Volkanitlerinde hafif nadir toprak elementlerin ağır nadir toprak elementlere göre daha fazla zenginleşmiş olması ve Nb/U oranlarının 10'un altında olması kabuksal köken etkilerinin belirgin olduğunu göstermektedir.

Yamadağı Volkanitlerinin petrografik ve jeokimyasal karakteristikleri ve daha önce yapılmış çalışmalardan elde edilen jeokronolojik yaş verileri bölgesel jeoloji içerisinde birlikte değerlendirildiğinde [2],[5] ve çalışma alanının da Yamadağı volkanizmasının kuzey kesimlerini oluşturması sebebiyle, Yamadağı volkanizmasının Üst Kretase-Eosen döneminde Neotetis okyanusunun kapanmasını izleyen evrede Neotetisin yitimi sonucu litosferik dilimden açığa çıkan akışkanlar tarafından metasomatizmaya uğratılmış bir manto kaynağından itibaren Üst Miyosen-Pliyosen yaş aralığında oluşmuş olabileceği öne sürülebilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyon Başkanlığı (CÜBAP) tarafından M-2021-812 numaralı proje ile desteklenmiştir. Yazarlar bu projeye desteklerinden dolayı CÜBAP'a teşekkür ederler.

Kaynaklar

- [1] Ketin, İ., (1966). Anadolu'nun tektonik birlikleri, MTA Dergisi, 66, 20-34, Ankara.
- [2] Ekici, T., (2003). Arguvan-Arapkir (Malatya) arasında Malatya fay hattı boyunca gözlenen neojen volkaniklerinin petrolojisi. Çukurova Üniversitesi (Doktora Tezi)
- [3] Ekici, T., Alpaslan, M., Parlak, O., Temel, A., (2007). Geochemistry of the Pliocene basalts erupted along the Malatya-Ovacık fault zone (MOFZ), eastern Anatolia, Turkey: Implications for source characteristics and partial melting processes. *Chemical Earth Geochemistry* 67 (2007) 201-212.
- [4] Ekici, T., Alpaslan, M., Parlak, O., Uçurum, A., (2009). Geochemistry of the Miocene Collision-related Yamadağı (Eastern Anatolia) Calc-alkaline Volcanics, Turkey. *Turkish Journal of earth Sciences*, Vol. 18, 2009, pp. 511-528.
- [5] Kürüm, S., Önal, A., Boztuğ, D., Arslan, M., Spell, R. (2004). ⁴⁰Ar/³⁹Ar age determination and geochemistry of the widespread Yamadağı volcanics in the Arapkir, N Malatya region, Eastern Anatolia, Turkey. *Proceedings 5th International Symposium on Eastern Mediterranean Geology*, Thessaloniki, Greece.
- [6] Okan, Aİ, Tüysüz, O., (1999). Tethyan sutures of northern Turkey. *Geology Society of London, Spec. Publ.* 156, 475-515. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1999.156.01.22>
- [7] Moorhouse, W.W. (1969). *The study of rocks in thin section*. Harper and Row, New York, 514 pp.
- [8] Erkan, Y. (2011). *Kayaç Oluşturan Önemli Minerallerin Mikroskopta İncelenmesi*, TMMOB Jeol. Müh. Odası, 5. Baskı. Sayfa, 436. ISBN: 975-395-137-X.
- [9] MacKenzie, W.S. and Guilford, C. (1980). *Atlas of rock forming minerals in thin section*. John Wiley and Sons, Inc, New York.
- [10] Yardley, B.W.D., MacKenzie W.S. ve Guilford, C. (1990). *Atlas of metamorphic rocks and their textures*. John Wiley and Sons, Inc, New York.
- [11] Streckeisen, A., (1979). Classification and Nomenclature of Volcanic Rocks, Lamprophyres, Carbonatites and Melilitic Rocks. *Geology*, 7, 331-335.
- [12] Hibbard, M.J., (1991). Textural anatomy of twelve magma mixed granitoid systems: in Didier, J and Barbarin, B. (eds), *Enclaves and Granite Petrology, Development in Petrology*, Elsevier, 431-444.
- [13] Hibbard, M.J., (1995). *Petrography to Petrogenesis*. Prentice Hall: Englewood Cliffs.
- [14] Yılmaz, S. ve Boztuğ, D., (1994). Granitoid Petrojeninde Magma Mingling/Mixing Kavramı, Türkiye'den Bazı Örnekler, *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 44-45, 1-20.
- [15] Le Maitre, R.W., Bateman, P., Dudek, A., Keller, J., Lameyre Le Bas, M.J., Sabine, P.A., Schmid, R., Sorensan, H., Streckeisen, A., Wolley, A.R., and Zonettin, B. (1989). *A classification of igneous rocks and glossary of terms*. Blackwell, Oxford.
- [16] Irvine, T.N and Barager, W.R.A., (1971). Major and trace element abundances in volcanic rocks and orogenic areas. *Bull. Geol. Soc. A.*, 83- 29-40.
- [17] Pearce, J.A., (1983). The role of subcontinental lithosphere in magma genesis destructive plate margins. In: Hawkesworth, C.J., Nory, M.J (eds), *Continental Basalt and Mantle Xenoliths*. Shiva, Nantwich, pp. 230-249.
- [18] Wilson, M. (1989). *Igneous petrogenesis*: London, Chapman and Hall, 466 p.
- [19] Rudnick, R. L., Fountain, D. M. (1995). and Composition of the Continental Crust: A Lower Crustal Perspective. *Review of Geophysics*, 33(3): 267-309.
- [20] Sun, S. S., and McDonough, W. F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders A.D. and Norry M.J. (Eds), *Magmatism in ocean basin*. Geol. Soc. London. Spec. Publ. No: 42, pp. 313-345

Geri Dönüşüm Agregalı Betonların Çökme Değerlerinin Tepki Yüzeyi Metodu ile Tahmini

Muhammed ULUCAN^{1*}, Kürşat Esat ALYAMAÇ²

¹ İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

² İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

*mulucan@firat.edu.tr, ²kealyamac@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 13/09/2022;

Kabul/Accepted: 11/12/2022)

Öz: Bu çalışmanın amacı farklı oranlarda geri dönüşümlü beton agregası kullanılarak üretilen betonların çökme değerlerini yüksek doğrulukla tahmin eden matematiksel bir model geliştirmektir. Bu amaçla farklı karışımlara sahip beton serileri üretilmiş ve bu serilere ait çökme değerleri kullanılarak tepki yüzeyi metodu üzerinde istatistik analizler yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda geliştirilen modelin belirlilik katsayısı 0.87 olarak hesaplanmış ve bu durum modelin yüksek doğruluklu ve etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Geri dönüşümlü beton agregaları yüksek su emme kapasitesi, düşük yoğunluk ve geniş karakteristik özelliklere sahip olduğundan geliştirilen bu modelin benzer yoğunluk ve su emme değerlerine sahip olan geri dönüşüm agregalı betonların çökme değerlerini pratik ve yüksek doğrulukla tahmin edileceği düşünülmektedir. Böylece bu modelin kullanımının, beton karışım hesapları ve deneme karışımları sürecinde zaman ve işçilik açısından faydalar sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: İnşaat ve yıkıntı atıkları; Geri dönüşümlü beton agregaları, Tepki yüzeyi metodu, Taze beton özellikleri.

Prediction of Slump Values of Recycled Aggregate Concretes by Response Surface Method

Abstract: The aim of this study is to develop a mathematical model that predicts the slump values of concrete produced by using recycled concrete aggregate in different proportions with high accuracy. For this purpose, concrete series with different mixtures were produced and statistical analyzes were made on the response surface method by using the slump values of these series. As a result of the analyses made, the coefficient of determination of the developed model was calculated as 0.87 and this showed that the model could be used with high accuracy and effectively. Using this model, it is thought that the slump values of the concretes to be produced using recycled concrete aggregates with similar density and water absorption values will be estimated practically and with high accuracy. Thus, using this model will provide benefits in terms of time and labor in the concrete mix calculations and trial mixes.

Key words: Construction and demolition waste; Recycled concrete aggregate; Response surface method; Fresh concrete properties.

1. Giriş

İnşaat sektörü, dünya ekonomisinin en büyük sektörlerinden biridir. Binalar, kamu hizmetleri, yapılar ve yollar ile ilgili çok sayıda inşaat, yenileme ve yıkım faaliyetleri, sürekli olarak dünya çapında gerçekleşmektedir. Bu faaliyetler ciddi anlamda mali ve çevresel etkileri olan, bertaraf edilmesi ve yönetilmesi gereken büyük hacimlerde inşaat ve yıkıntı atıkları (İYA) ile sonuçlanmaktadır [1-2]. Ortaya çıkan önemli miktarda atığın yanı sıra, bu atıkların çevresel ve ekonomik kayıplarının azaltılması için bu atıkların yeniden kullanımı ve geri kazanımı sürdürülebilir İYA teknolojilerinin tanımlanması ve İYA yönetimi için uygun geri dönüşüm ağlarının oluşturulmasını teşvik eder. Bu nedenle, bu atıkların geri kazanılması, yeniden kullanılması ve geri dönüştürülmesi oldukça önemlidir [3-4]. İYA'ların bir kısmı yeniden kullanılabilir veya geri kazanılmış malzemeler olarak ekonomik değere sahip olabilir ve bu nedenle inşaat tedarik zincirine yeniden dahil edilebilir [5-6].

Yıkıcı depremler ve doğal afetler sonucunda hasar gören birçok bina yıkılmakta ve çok büyük miktarlarda İYA ortaya çıkmaktadır [7]. Bunun en büyük örneklerinden biri ülkemizde meydana gelen 24 Ocak 2020 Sivrice-Elazığ depremidir. Bu deprem sonrası birçok bina yıkılmış ve milyonlarca ton İYA ortaya çıkmıştır [8]. Bu atıkların depolanması, arazinin işgali ve çevresel etkileri çok büyük sorunları beraberinde getirmektedir [9]. Bu nedenle, betonun dünyada en yaygın kullanılan yapı malzemesi olması ve inşaat sektörünün dünyanın en büyük sektörlerinden biri olması bu atıkların beton içerisinde değerlendirilmesini büyük bir alternatif haline getirmektedir [10-11]. Beton hacminin yaklaşık %70-75'ini agregalar oluşturmaktadır. Bu nedenle beton kullanımı aynı

* Sorumlu yazar: mulucan@firat.edu.tr. ¹ 0000-0001-7629-6846, ² 0000-0002-3226-4073

zamanda büyük bir agrega ve doğal kaynak tüketimine de yol açmaktadır. Dolayısıyla beton içerisinde geri dönüşümlü beton agregalarının (GDBA) kullanımı hem doğal kaynak tüketiminin azaltılması hem de bu atık malzemelerin bertarafı ve yeniden kullanılması açısından önemli faydalar sağlamaktadır [12].

GDBA'lar yüzeyinde bulunan harçtan kaynaklı yüksek su emmeye sahiptir ve bu nedenle geri dönüşüm agregalı betonların (GDAB) etkin su/çimento oranı artmakta ve dayanım değerlerinde büyük oranda azalmalar meydana gelmektedir. Dolayısıyla GDAB karışım tasarımları yapılırken etkin su/çimento oranlarının artması karışım tasarımlarını daha da önemli hale getirmektedir. GDAB'ler ile yapılan çalışmaların çoğu mekanik ve çevresel özelliklerin incelenmesi üzerine yoğunlaşmaktadır [13-14]. Betonun basınç dayanımı en önemli mekanik özelliklerinden biridir ve betonun taze beton özellikleri betonun dayanımı üzerinde önemli etkiye sahiptir. Bu nedenle beton basınç dayanımının ve taze beton özelliklerinin doğru tahmin edilebilmesi büyük önem taşımaktadır. Tepki yüzeyi metodu (TYM) etkin bir istatistik metottur ve son yıllarda beton teknolojisinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada matematiksel modelin geliştirilmesi için TYM kullanılmıştır.

Bu çalışma deprem sonrası elde edilen GDBA'ların farklı oranlarda kullanımıyla üretilen beton serilerinin taze beton özelliklerini yüksek doğrulukla tahmin eden matematiksel bir model geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda üretilen beton serilerine ait slump değerleri ve karışım miktarları kullanılarak TYM üzerinde istatistik analizler yapılmış ve matematiksel bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel model yardımıyla betonun taze beton özelliklerinin pratik ve yüksek doğruluklu bir şekilde tahmin edildiği görülmüştür.

2. Malzeme ve metot

2.1. Malzemeler

Bu çalışmada, CEM I 42,5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Bu çimento Elazığ Seza Çimento Fabrikası'ndan temin edilmiş olup çimentoaya ait kimyasal özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Çimentonun kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikler	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	Kızdırma kaybı
Çimento	62.48	19.15	4.35	5.50	2.55	0.11	0.45	2.05	2.09

Beton dökümlerinin tamamında su azaltıcı kimyasal katkı olarak CHRYSO Optima 280-SC3 kullanılmıştır. Kimyasal katkı miktarları çimento ile farklı oranlarda yer değiştirilerek belirlenmiştir. Agrega olarak hem doğal agrega (DA) hem de geri dönüşümlü beton agregaları kullanılmıştır. Bu agregalara ait fiziksel özellikler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Agregaların fiziksel özellikleri

Özellikler	İnce		İri-1		İri-2	
	DA	GDBA	DA	GDBA	DA	GDBA
Los Angeles aşınma	-	-	-	-	15	23
Özgül ağırlık	2.66	2.48	2.69	2.69	2.71	2.73
Su emme (%)	1.5	9.8	1.3	4.2	1.2	3.6

2.2. Deneysel çalışmalar

Deneylerde farklı karışım oranlarına sahip 6 seri GDAB, DAB (doğal agregalı beton) ve GDİAB (geri dönüştürülmüş iri agregalı beton) karışımları hazırlanmıştır. Karışım oranları ve kullanılan malzeme miktarlarına ait veriler Tablo 3'de verilmiştir. Bu karışımlarda su/çimento (S/C) oranları 0.35-0.45 ve çimento dozajları 300-350-400 kg/m³ olarak seçilmiş ve beton karışımları hazırlanmıştır. Beton karışımlarına ait veriler yapılan deneme dökümleri sonrasında belirlenmiştir. Çökme değerlerinin çok düşük olmamasına dikkat edilerek slump deneyleri uygulanmıştır. Elde edilen slump değerleri ve karışım miktarları kullanılarak TYM üzerinde istatistik analizler yapılmış ve matematiksel model geliştirilmiştir. Deney tasarımı yapılırken çökme değerlerinin 10-20 cm arasında olması ve akıcı bir kıvama sahip olması hedeflenmiştir.

Tablo 3. Karışım miktarları (kg/m³)

Karışım İsimleri	Çimento	Su	Doğal Agregası			Geri dönüşümlü beton agregası			Kimyasal Katkı
			İnce	İri-1	İri-2	İnce	İri-1	İri-2	
DAB-1	300	105	630	637	855	0	0	0	6,0
DAB-2	300	135	606	613	823	0	0	0	3,3
DAB-3	350	123	603	610	819	0	0	0	5,3
DAB-4	350	158	575	582	781	0	0	0	2,5
DAB-5	400	140	576	583	783	0	0	0	6,8
DAB-6	400	180	544	551	740	0	0	0	2,4
GDAB-1	300	105	0	0	0	587	637	862	6,9
GDAB-2	300	135	0	0	0	565	613	829	3,3
GDAB-3	350	123	0	0	0	562	610	825	5,6
GDAB-4	350	158	0	0	0	536	582	787	1,4
GDAB-5	400	140	0	0	0	537	583	789	4,0
GDAB-6	400	180	0	0	0	508	551	745	1,2
GDİAB-1	300	105	630	0	0	0	637	862	6,0
GDİAB-2	300	135	606	0	0	0	613	829	3,8
GDİAB-3	350	123	603	0	0	0	610	825	5,6
GDİAB-4	350	158	575	0	0	0	582	787	2,8
GDİAB-5	400	140	576	0	0	0	583	789	4,4
GDİAB-6	400	180	544	0	0	0	551	745	2,0

2.3. Tepki yüzeyi metodu

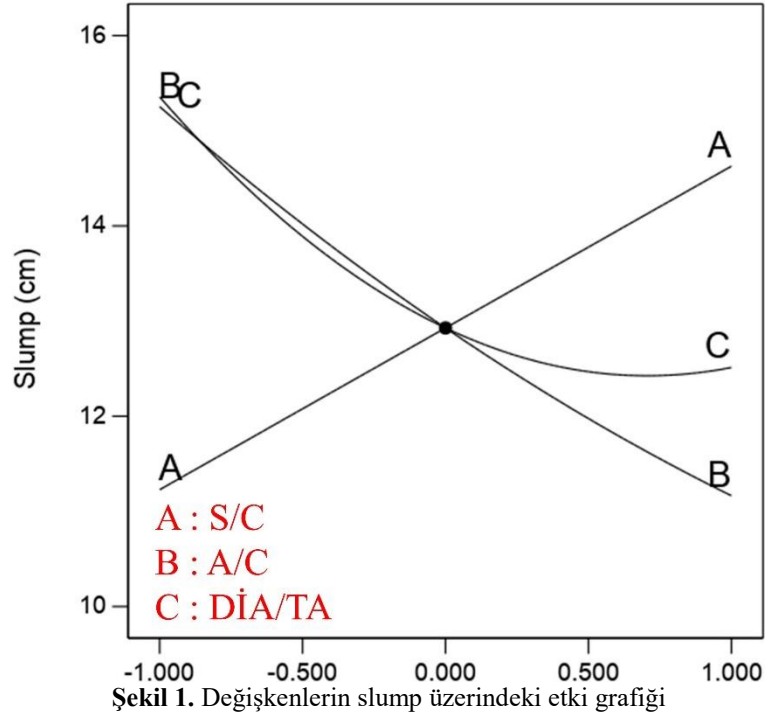
TYM, bir yanıt değişkenini birden çok etkileyen değişkenin olduğu problemleri geliştirmek, iyileştirmek ve optimize etmek için kullanılan matematiksel ve istatistiksel tekniklerin bir aracıdır [15-17]. Genel olarak TYM'deki merkezi kompozit tasarım, yanıt değişkenleri ile bağımsız değişkenler arasındaki fonksiyonel ilişkiyi bulmada kullanılan bir kesirli faktöriyel tasarım yöntemidir [18]. Bu tasarım yöntemi sonrası değişkenlerin yanıt değeri üzerindeki etkileri hesaplanan F değeri ile belirlenir. Değişkenler için elde edilen F değeri ne kadar büyük olursa, o değişkenin yanıt değişkeni üzerindeki etkisi o kadar fazla olur. P değeri, dikkate alınan model veya değişkenin önemli olup olmadığı hakkında bilgi verir [19-20]. P değeri 0.05'ten küçük ise model veya değişkenlerin önemli olduğu belirlenebilir [21-22].

3. Bulgular ve Tartışma

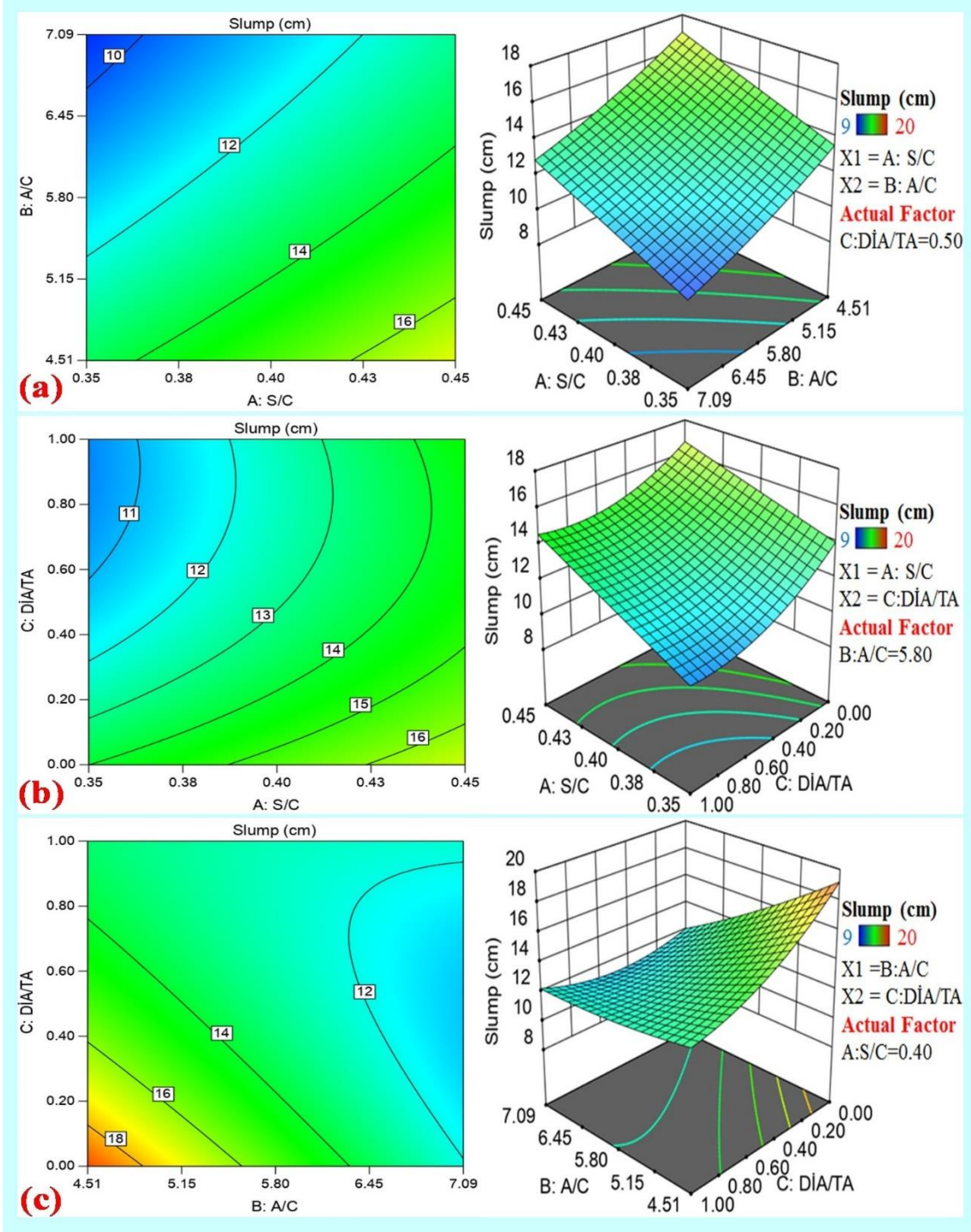
Bu çalışmada farklı oranlarda GDBA içeren betonlar üzerinde taze beton özelliklerini belirlemek için slump deneyleri uygulanmış ve elde edilen slump değerleri kullanılarak TYM üzerinde istatistik analizleri yapılmıştır. Yapılan bu istatistik analizler sonucunda matematiksel bir model geliştirilmiştir. İstatistik analizde kullanılan veriler Tablo 4'de verilmiştir. Matematiksel model geliştirilirken değişken olarak su/çimento (S/C), agrega/çimento (A/C) ve doğal ince agrega/toplam agrega ($DİA/TA$) dikkate alınmış, bu değişkenlerin slump üzerindeki etkileri incelenmiştir. Modelde dikkate alınan değişkenler yapılan ANOVA analizi sonucunda her bir değişkene ait p değerleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Dikkate alınan tüm değişkenlerin p değerleri < 0.0001 olarak hesaplanmıştır. Geliştirilen modele ait denklem 1 yardımıyla çökme değerleri basit ve pratik bir şekilde belirlenebilmektedir.

$$\begin{aligned} \text{Çökme değeri} = & 28,9 * (S/C) - 4,6 * (A/C) - 25,8 * (DİA/TA) - 0,3 * (S/C * A/C) + 13,6 * (S/C * DİA/TA) \quad (1) \\ & + 2,3 * (A/C * DİA/TA) + 0,2 * (A/C)^2 + 4 * (DİA/TA)^2 + 25,4 \end{aligned}$$

Değişkenlerin slump üzerindeki etkileri incelenmiş ve elde edilen sonuçlar pertürbasyon eğrisi ile Şekil 1'de verilmiştir. Pertürbasyon eğrisi incelendiğinde -1 ve +1 değerleri arasında değişkenlerin etkisi görülmektedir. Bu eğride -1 olan değerler değişkenlere ait en düşük değerleri, +1 olarak verilen değerler ise bu değişkenlerin en büyük değerlerini göstermektedir. TYM üzerinde istatistik analiz yapılırken değişkenler A: (S/C), B: (A/C) ve C: ($DİA/TA$) olarak isimlendirilmiştir. Şekil 1 dikkatli bir şekilde incelendiğinde A/C ve $DİA/TA$ oranı arttıkça slump değerlerinin azaldığı, S/C oranı arttıkça slump değerlerinde bir artış olduğu açıkça görülmektedir.



Slump değerlerini yüksek doğrulukla tahmin edebilmek için geliştirilen matematiksel modele ait 2 ve 3 boyutlu etki grafikleri Şekil 2’de verilmiştir. Bu etki grafikleri değişkenlerin slump üzerinde nasıl bir etkiye neden olduğunu açıkça göstermektedir. Şekil 2.a S/C ve A/C değişkenlerinin slump üzerindeki etkisini göstermektedir. Bu etki grafiklerinden S/C oranı soldan sağa doğru azalırken slump değerlerinde azalma meydana geldiği görülmüştür. A/C değişkeninin slump üzerindeki etkisi incelendiğinde ise farklı sonuçlar elde edildiği tespit edilmiştir. A/C oranı 4.51’den 7.09’a geldiğinde slump değerlerinde bir azalma olduğu görülmüştür. Şekil 2.b S/C ve $DİA/TA$ değişkenlerinin slump üzerindeki etkisini göstermektedir. Bu eğriden $DİA/TA$ oranı arttıkça slump değerlerinin azaldığı görülmüştür. Şekil 2.c A/C ve $DİA/TA$ ’nın slump üzerindeki etkisini incelemektedir. Bu eğri de A/C ve $DİA/TA$ için benzer sonuçlar elde edilmiştir. A/C ve $DİA/TA$ oranı arttıkça slump değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Şekil 2 genel olarak incelenecek olursa slump değerlerinin 9 cm ile 20 cm arasında değiştiği görülmektedir. Bu durumun temel nedeni geniş bir çökme değeri aralığında çalışarak modelin etkinliğini detaylı bir şekilde incelemektir.



Şekil 2. Geliştirilen modele ait 2 ve 3 boyutlu etki grafikleri

4. Sonuçlar

Betonun kalitesi taze ve sertleşmiş beton özellikleri ile yakından ilişkilidir. Bu nedenle taze ve sertleşmiş beton özelliklerinin doğru tahmin edilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmanın amacı farklı oranlarda geri dönüştürülmüş beton agregası içeren betonların taze beton özelliklerini yüksek doğrulukla ve pratik bir şekilde tahmin eden matematiksel bir model geliştirmektir. Çalışmaya ait sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Deprem sonrası ortaya çıkan atıkların beton içerisinde kullanılmasıyla bu atıkların azaltılması, yeniden kullanılması ve geride dönüşümü sağlanmıştır. Böylece bu agregaların kullanılmasıyla doğal agrega tüketimi azaltılmış ve atıkların depolanması önlenerek önemli çevresel faydalar sağladığı düşünülmektedir.
- Geliştirilen model yardımıyla benzer yoğunluk ve su emme değerlerine sahip olan geride dönüşümlü beton agregaları kullanılarak üretilen betonların çökme değerleri pratik ve yüksek doğruluklu bir şekilde tahmin edilebileceği düşünülmektedir. Modelin belirlilik katsayısının 0.87 olması da modelin etkinliğini göstermektedir.
- TYM kullanılarak elde edilen sayısal model yardımıyla yüksek doğruluklu tahminler yapılması, bu metodun beton teknolojisindeki çalışmalar için oldukça uygun olduğunu göstermektedir.
- Beton tasarımında en önemli kriterlerden biri taze beton özelliği olan çökme değeridir. Bu değer beton karışım tasarımı sırasında yüksek doğrulukla tahmin edilmesi, projeye uygun beton imal edilmesi ve betonun işlenebilirliğini tahmin edebilme konusunda katkılar sunacağı düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından “MF.21.52” nolu proje ile desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] J. de-Prado-Gil, C. Palencia, N. Silva-Monteiro, R. Martínez-García, To predict the compressive strength of self compacting concrete with recycled aggregates utilizing ensemble machine learning models, *Case Stud. Constr. Mater.* 16 (2022) e01046. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01046>.
- [2] M. Shmlls, M. Abed, T. Horvath, D. Bozsaky, Multicriteria Based Optimization of Second Generation Recycled Aggregate Concrete, *Case Stud. Constr. Mater.* (2022) e01447. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01447>.
- [3] M. Abed, J. Foşt, K. Rashid, Multicriterial life cycle assessment of eco-efficient self-compacting concrete modified by waste perlite powder and/or recycled concrete aggregate, *Constr. Build. Mater.* 348 (2022) 128696. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128696>.
- [4] L.A.L. Ruiz, X.R. Ramon, C.M.L. Mercedes, S.G. Domingo, Multicriteria analysis of the environmental and economic performance of circularity strategies for concrete waste recycling in Spain, *Waste Manag.* 144 (2022) 387–400. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.04.008>.
- [5] J.F. Dong, Q.Y. Wang, Z.W. Guan, H.K. Chai, High-temperature behaviour of basalt fibre reinforced concrete made with recycled aggregates from earthquake waste, *J. Build. Eng.* 48 (2022) 103895. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103895>.
- [6] N. Tsydenova, T. Becker, G. Walther, Optimised design of concrete recycling networks: The case of North Rhine-Westphalia, *Waste Manag.* 135 (2021) 309–317. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.09.013>.
- [7] M. Ulucan, K.E. Alyamac, An integrative approach of the use of recycled concrete aggregate in high-rise buildings: Example of the Elysium, *Struct. Concr.* (2022). <https://doi.org/10.1002/suco.202200512>.
- [8] M. Ulucan, K.E. Alyamac, A holistic assessment of the use of emerging recycled concrete aggregates after a destructive earthquake: Mechanical, economic and environmental, *Waste Manag.* 146 (2022) 53–65. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.04.045>.
- [9] F. de Andrade Salgado, F. de Andrade Silva, Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review, *J. Build. Eng.* 52 (2022) 104452. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104452>.
- [10] S. Marinković, V. Radonjanin, M. Malešev, I. Ignjatović, Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete, *Waste Manag.* 30 (2010) 2255–2264. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.012>.
- [11] T. Ding, J. Xiao, Estimation of building-related construction and demolition waste in Shanghai, *Waste Manag.* 34 (2014) 2327–2334. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.07.029>.
- [12] T. Ding, J. Xiao, V.W.Y. Tam, A closed-loop life cycle assessment of recycled aggregate concrete utilization in China, *Waste Manag.* 56 (2016) 367–375. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.05.031>.
- [13] G. Andreu, E. Miren, Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete, *Constr. Build. Mater.* 52 (2014) 227–235. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.054>.
- [14] N. Tošić, S. Marinković, T. Dašić, M. Stanić, Multicriteria optimization of natural and recycled aggregate concrete for structural use, *J. Clean. Prod.* 87 (2015) 766–776. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.070>.

- [15] S. Arumugam, G. Sriram, T. Rajmohan, Multi-response optimization of epoxidation process parameters of rapeseed oil using response surface methodology (RSM)-based desirability analysis, *Arab. J. Sci. Eng.* 39 (2014) 2277–2287.
- [16] W. Wang, Y. Cheng, G. Tan, Design optimization of SBS-modified asphalt mixture reinforced with eco-friendly basalt fiber based on response surface methodology, *Materials (Basel)*. 11 (2018) 1311.
- [17] K.E. Alyamac, E. Ghafari, R. Ince, Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method, *J. Clean. Prod.* 144 (2017) 192–202. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.156>.
- [18] M.A.A. Aldahdooh, N.M. Bunnori, M.A.M. Johari, Evaluation of ultra-high-performance-fiber reinforced concrete binder content using the response surface method, *Mater. Des.* 52 (2013) 957–965.
- [19] T. Demir, M. Ulucan, K.E. Alyamac, Determination of the Early Age Strength of High-Strength Concrete Using RSM Method, *Fırat Univ. J. Eng. Sci.* 34 (2022) 105–114. <https://doi.org/10.35234/fumbd.972829>.
- [20] B. Demirel, E. Gultekin, K.E. Alyamac, Performance of structural lightweight concrete containing metakaolin after elevated temperature, *KSCE J. Civ. Eng.* 23 (2019) 2997–3004. <https://doi.org/10.1007/s12205-019-1192-x>.
- [21] A. Ustaoglu, B. Kursuncu, M. Alptekin, M.S. Gok, Performance optimization and parametric evaluation of the cascade vapor compression refrigeration cycle using Taguchi and ANOVA methods, *Appl. Therm. Eng.* 180 (2020) 115816.
- [22] T. Demir, M. Ulucan, K.E. Alyamac, Development of Combined Methods Using Non-Destructive Test Methods to Determine the In-Place Strength of High-Strength Concretes, *Processes* (2023) 673-689. <https://doi.org/10.3390/pr11030673>

Elazığ İli Yağış Verilerinin Trend Analizi

Mahsum AYDIN^{1*}

İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Türkiye

*maydin@yyu.edu.tr

(Geliş/Received: 22/09/2022;

Kabul/Accepted: 08/02/2023)

Öz: İklim değişikliği özellikle son yıllarda artan etkisi nedeni ile insan yaşamını ve doğa olaylarını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu olumsuz etkilerden biri de yağış rejimi üzerinedir. Yağış rejimindeki değişiklikler nedeni ile canlıların ihtiyaç duyduğu su kaynakları azalmakta veya bazı bölgelerde artan yağış miktarları nedeni ile bölgesel felaketler ortaya çıkmaktadır. Su kaynaklarının yönetimi ve taşkın risklerinden korunma çalışmaları için yağış verilerinin yıllar içerisindeki değişiminin bilinmesi büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla Elazığ ili yağış verilerinin yıllar içerisindeki trendlerinin incelenmesi amacı ile Elazığ ili sınırları içerisinde bulunan beş adet yağış gözlem istasyonuna ait yıllık toplam yağış verileri ile mevsimsel yağış değerleri kullanılmıştır. Seçilen istasyonlara ait yağış verilerinin yıllar içerisindeki değişimleri Şen'in Yenilikçi Trend Analizi, Mann-Kendall ve Spearman-Rho testleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak Elazığ ili sınırları içerisinde bulunan Palu istasyonunda kış mevsimi yağışlarında, Keban istasyonunda ise ilkbahar mevsimi yağış değerlerinde her üç trend analizi yöntemine göre azalan yönde anlamlı bir trend olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Şen'in Yenilikçi Trend Analizi, Mann-Kendall Testi, Spearman-Rho Testi, Elazığ, Yağış

Trend Analysis of Elazig Province Precipitation Data

Abstract: In recent years, climate change negatively affects human life and natural events, especially due to its increasing impact. One of these negative effects is on the precipitation regime. Due to the changes in the precipitation regime, the water resources needed by the living things are decreasing or regional disasters occur due to the increased precipitation in some regions. It is of great importance to know the change of precipitation data over the years for the management of water resources and protection from flood risks. For this purpose, annual total precipitation data and seasonal precipitation values of five precipitation observation stations located within the borders of Elazig province were used in order to examine the trends of precipitation data of Elazig province over the years. The changes in precipitation data of selected stations over the years were evaluated using Şen's Innovative Trend Analysis, Mann-Kendall and Spearman-Rho tests. As a result, it has been determined that there is a significant trend in the decreasing direction according to all three trend analysis methods in winter precipitation at Palu station, which is located within the borders of Elazig province, and in spring season precipitation values at Keban station.

Key words: Şen's Innovative Trend Analysis, Mann-Kendall Test, Spearman-Rho Test, Elazig, Precipitation

1. Giriş

Sanayileşmenin etkisi ile gelişen toplumlarda daha fazla fosil yakıt kullanılması ve bunun sonucunda da atmosfere salınan sera gazlarının artması nedeni ile ekolojik dengede meydana gelen değişimler iklim değişikliklerinin hızla artmasına sebep olmaktadır. Bu iklim değişikliği nedeni ile dünya genelinde özellikle yağış ve sıcaklık değerlerinde ciddi değişimler meydana gelmektedir. Özellikle son yıllarda sıcaklık ve yağış gibi parametrelerin iklim değişikliği nedeni ile büyük değişimler göstermesi bu parametrelerin trendlerinin belirlenmesi çalışmalarına ağırlık verilmesine neden olmuştur [1]. Yağışlarda meydana gelen değişimlerin yağış akış ilişkisini büyük ölçüde etkileyeceği bilinmektedir. Bu nedenle iklim değişikliği nedeni ile meydana gelen bu değişikliklerin su yapılarının tasarlanması ve su kaynaklarının işletilmesi çalışmalarında göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Yağış verileri ile diğer meteorolojik verilerin yıllar içerisindeki değişimlerini analiz edebilmek amacı ile trend analizi yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemler meteorolojik verilerin yıllar içerisinde artan yönde veya azalan yönde bir değişim olup olmadığını tespit etmekte kullanılmaktadır.

Türkiye'de yağış verilerinin yıllar içerisindeki trend değişimlerini inceleyen birçok çalışma bulunmaktadır. Büyükyıldız ve Berkay [2] tarafından yapılan çalışmada Sakarya havzası yağış verilerinin trendleri incelenmiştir. Çalışmada Şen'in T, Spearman-Rho, Mann-Kendall ve Mevsimsel Mann-Kendall trend testleri uygulanmıştır. İncelenen istasyonların yarısında %5 anlamlılık düzeyinde azalan trendlere rastlanmıştır. Çalışmada incelenen 300 aylık dönem içerisinde 44 ayda trend tespit edilmiş ve bu trendlerin %20'sinin artan, %80'inin ise azalan yönde

* Sorumlu yazar: maydin@yyu.edu.tr. Yazarın ORCID numarası: ¹0000-0001-9739-4066

olduğu belirlenmiştir.

Karabulut ve Cosun [3] Kahramanmaraş ili yağış verilerinin trend analizi için Kahramanmaraş ili içerisinde bulunan meteoroloji istasyonlarına ait yağış verilerinin trendlerini Mann-Kendall ve Lineer Regresyon yöntemlerini kullanarak yıllık, mevsimsel ve aylık olarak ele almışlardır. Yağış verilerinde yıllık ve mevsimsel olarak anlamlı bir trend gözlenmemiştir.

Kızılelma vd. [4] İç Anadolu bölgesi sıcaklık ve yağış verilerinin trendlerini incelemiştir. Çalışmada Mann-Kendall ve Lineer regresyon yöntemleri kullanılarak özellikle maksimum, minimum ve ortalama sıcaklıklarda istatistiksel olarak anlamlı, artan bir trendin varlığı tespit edilmiştir. Toplam yağışlar için azalan trendlerin en fazla yaşandığı mevsimin ilkbahar olduğundan, sonbahar mevsiminde ise yağışlarda artan bir trendin varlığından bahsedilebileceği belirtilmiştir. Yaz mevsimi ve kış mevsiminde ise istatistiksel olarak anlamlı sayılabilecek bir trende rastlanılmadığı belirtilmiştir.

Polat ve Sunkar [5] tarafından 2017 yılında yapılan çalışmada Rize ili ve çevresinde sıcaklık ve yağış verilerinin trendleri belirlenmiştir. Çalışmada Mann-Kendall ve Şen trend analizi yöntemleri kullanılmış ve elde edilen sonuçlara göre Pazar istasyonu dışındaki diğer istasyonlarda sıcaklık değerlerinde artan bir trendin olduğu, yağış verilerinde ise Hopa istasyonu dışındaki diğer istasyonlarda artan bir trendin olduğu tespit edilmiştir.

Ay ve Özyıldırım [6]'ın çalışmasında Yozgat iline ait toplam yağış ve aylık ortalama sıcaklık verilerinin trend analizi ile incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada Mann-Kendall ve Şen yöntemleri kullanılmış ve Mann-Kendall testine göre 1970-1992 ve 1993-2016 zaman aralıklarında anlamlı bir trende rastlanmaz iken Şen yöntemi ile yapılan değerlendirmede aylık toplam yağış için artan bir trend tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra 1993-2016 dönemlerine ait ortalama aylık sıcaklık verilerinde artan bir trend olduğu sonucuna varılmıştır.

Şenocak ve Emek [7], Doğu Anadolu bölgesi aylık yağış miktarlarını trend analizi yardımıyla değerlendirmişlerdir. Çalışmalarında aylık yağışların trendlerini belirlemek amacı ile Mann-Kendall ve Spearman-Rho testlerini kullanmışlardır. Doğu Anadolu içerisinde seçilen 46 adet yağış istasyonuna ait 1960-2013 yılları arası yağış verileri kullanılmış ve yaz aylarında yağışlarda artan bir trend tespit edilirken kış aylarında azalan yönde bir trend tespit edilmiştir.

Coşkun [8] tarafından 2020 yılında yapılan çalışmada Aras-Kura kapalı havzasının ortalama sıcaklık, yağış ve akım verilerinin trendleri incelenmiştir. Çalışmada Mann-Kendall ve Spearman-Rho testleri kullanılarak değerlendirme yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre ortalama sıcaklık verilerinde havzanın genelinde artan bir trend olduğu, yağış verileri için Kars ve Ardahan istasyonlarında artan bir trendin belirlendiği ve diğer istasyonlarda ise anlamlı bir trendin bulunmadığı belirtilmiştir. Akım verilerinde ise Kağızman istasyonunda artan trend olduğu Nonak ve Sarısu istasyonlarında ise azalan bir trendin gözlemlendiği belirtilmiştir.

Aydın ve Öz [9] Van Gölü havzasına ait yağış ve sıcaklık verilerinin trendlerini incelemiştir. Şen'in Yenilikçi Trend Analizi, Mann-Kendall ve Spearman-Rho testleri kullanılarak yapılan değerlendirmelerde Ahlat ve Erciş istasyonlarına ait yağış verilerinde azalan trend tespit edilirken geriye kalan istasyonlarda belirgin bir trende rastlanmadığı belirtilmiştir. Sıcaklık verileri için yapılan değerlendirmelerde ise Ahlat ve Erciş ilçelerinde trende rastlanmaz iken geriye kalan istasyonların tamamında artan yönde bir trend olduğu sonucuna varılmıştır.

Katipoğlu vd. [10] tarafından 2022 yılında yapılan çalışmada Yeşilirmak havzasındaki yedi adet istasyona ait akım değerleri kullanılarak akım kuraklık indekslerinin trendleri incelenmiştir. Trendleri belirlemek için ise Mann-Kendall, Şen'in YTA yöntemi ve Thiel Şen yöntemi kullanılmıştır. Havza genelinde kuraklık trendinde artış gözlemlenmiştir.

Literatürde yapılan çalışmalarda sıcaklık parametresinin Türkiye genelinde artan bir trend gösterdiği söylenebilirken, yağış parametresi için böyle bir genellemenin yapılamayacağı anlaşılmaktadır.

Özellikle son yıllarda Türkiye'de kuraklıktan en çok etkilenen illerden biri de Doğu Anadolu Bölgesi sınırları içerisinde yer alan Elazığ'dır. Bu nedenle Elazığ ili sınırları içerisinde yağış verilerinin değişimlerinin bilinmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada Elazığ iline ait yağış verilerinin trendlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bunun için Elazığ sınırları içerisinde bulunan beş adet meteoroloji gözlem istasyonundan elde edilen yağış verilerinin trendleri Mann-Kendall, Spearman-Rho ve Şen'in Yenilikçi Trend Analizi yöntemleri kullanılarak mevsimsel ve yıllık bazda değerlendirilmiştir.

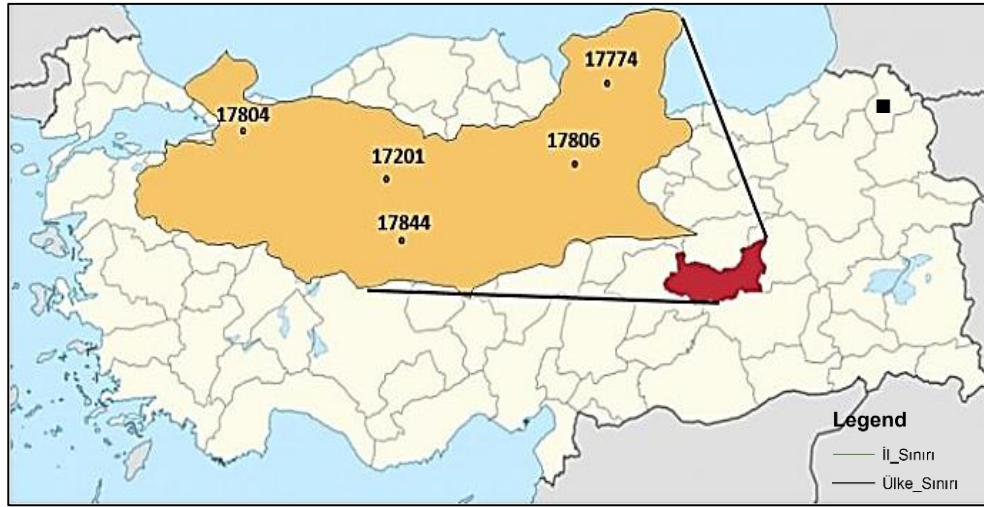
2. Çalışma Alanı ve Kullanılan Veriler

Bu çalışma için Doğu Anadolu Bölgesi içerisinde yer alan Elazığ ili seçilmiştir. Elazığ ili Yukarı Fırat Havzası sınırları içerisinde yer almaktadır. 8455 km²'lik bir alana sahip olan Elazığ ilinin rakımı 1067 m'dir. Bölgede özellikle elektrik üretimi amacı ile Fırat nehri üzerinde 1965-1975 yılları arasında inşa edilen Keban Barajı bulunmaktadır. Baraj gölü ve bölge içerisindeki su kaynakları özellikle iklim değişikliğinin etkisi nedeni ile olumsuz yönde etkilenmektedir. Bu nedenle yağış verilerinin trendlerini incelemek amacı ile Elazığ ili sınırları

içerisinde bulunan beş adet meteoroloji gözlem istasyonuna ait aylık toplam yağış verileri kullanılmıştır. Seçilen istasyonlara ait bilgiler Çizelge 1’de ve coğrafi konumları ise Şekil 1’de gösterilmiştir.

Çizelge 1. Seçilen istasyonlara ait bilgiler

İstasyon No	İstasyon Adı	Rasat Süresi	St. Sapma	Çarpıklık	Ortalama	Maks.	Min.
17806	Palu	1965 – 2018	42.600	0.977	44.741	223.9	0
17774	Karakoçan	1980 – 2017	49.510	1.046	53.936	284.5	0
17201	Elazığ	1938 – 2017	31.795	1.048	33.961	218.9	0
17804	Keban	1963 – 2018	29.522	1.264	30.908	190.8	0
17844	Sivrice	1980 – 2017	48.705	1.322	48.387	287.0	0



Şekil 1. Seçilen meteoroloji gözlem istasyonlarının coğrafi konumu [11]

3. Pettitt Homojenlik Testi

Parametrik olmayan bir test olan Pettitt testi, 1979 yılında Pettitt tarafından, zaman serilerindeki değişim noktalarının belirlenmesi amacıyla geliştirilmiştir [12]. Bu çalışmada kullanılan verilere XLSTAT 2022 programı yardımı ile Pettitt homojenlik testi uygulanmıştır. Program yardımı ile hesaplanan p değerinin anlamlılık seviyesi için seçilen alfa değerinden (bu çalışma için alfa değeri 0,05 olarak alınmıştır) küçük olması durumunda H_0 hipotezi reddedilir ve zaman serisinin homojen olmadığı sonucuna varılır. Büyük olması durumunda ise H_0 hipotezi kabul edilerek zaman serisinin homojen olduğu sonucuna varılır [13].

4. Eksik Verilerin Tamamlanması

Eksik veri tamamlama herhangi bir zaman serisi içerisinde kayıp olan verilerin tamamlanması için uygulanan bir prosedürdür. Literatürde eksik veri tamamlama ile ilgili birçok yöntem bulunmaktadır. Eksik olan veriler bu yöntemlerden uygun olan birinin kullanılması yardımıyla tamamlanabilir. Bu yöntemlerden biri en yakın komşu (nearest neighbor) yaklaşımıdır. Nearest neighbor yaklaşımında kovaryans değerlerine dayalı olarak birimler arasındaki mesafeyi ölçmek için bir metrik tanımlanır ve ardından en yakın verilerden elde edilen değerler yardımıyla eksik veriler tamamlanır [14]. Bu çalışmada kullanılan yağış verilerindeki eksik verilerin tamamlanması için XLSTAT 2022 programı yardımıyla nearest neighbor yöntemi uygulanmıştır.

5. Prewhitening Prosedürü

Seriler arasındaki korelasyonun varlığı bazen trend olmasa bile trend varmış gibi bir durumun ortaya çıkmasına neden olabilir. Bu olumsuz durumun önüne geçilebilmesi amacıyla Von Storch ve Navarra [15] tarafından 1995 yılında prewhitening prosedürü önerilmiştir. Özellikle Mann-Kendall ve Spearman Rho

yöntemleri gibi parametrik olmayan yöntemlerde ortaya çıkabilecek bu olumsuz etkinin giderilebilmesi için prewhitening yöntemi önerilmektedir. Bu amaçla ilk olarak lag 1 yani bir gecikmeli zaman serisi korelasyon katsayısı eşitlik 1 yardımıyla hesaplanır:

$$r_1 = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (x_i - \mu(x_i)) \cdot (x_{i+1} - \mu(x_{i+1}))}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu(x_i))^2} \quad (1)$$

Burada $\mu(x_i)$ örnek verinin ortalamasını, n ise gözlem sayısını ifade etmektedir [16,17]. Hesaplanan korelasyon katsayısının %95 anlamlılık düzeyi için eşitlik 2 yardımıyla hesaplanan sınırlar arasında olup olmadığı kontrol edilir:

$$\frac{-1-1,645\sqrt{n-2}}{n-1} \leq r_1 \leq \frac{-1+1,645\sqrt{n-2}}{n-1} \quad (2)$$

Hesaplanan korelasyon katsayısının yukarıdaki denklem yardımıyla hesaplanan alt limit ve üst limit değerleri arasında olması durumunda otokorelasyon olmadığı, bu limitlerin dışında olması durumunda ise otokorelasyon olduğu anlaşılır.

Otokorelasyonun varlığının tespit edildiği zaman serisine eşitlik 3 ile verilen prosedür uygulanmak suretiyle prewhitened zaman serisi elde edilmiş olur [17]:

$$(x_2 - r_1 \cdot x_1, x_3 - r_1 \cdot x_2, \dots \dots \dots, x_n - r_1 \cdot x_{n-1}) \quad (3)$$

6. Trend Analizi

Trend, incelenen herhangi bir bağımsız değişkende inceleme süresi içerisinde gözlenen artış veya azalış olarak tanımlanmaktadır [18, 19]. Trend analizi yöntemleri parametrik ve parametrik olmayan yöntemler olarak ikiye ayrılmaktadır. Parametrik yöntemler verilerin eksik olmadığı ve dağılımın normal dağılıma uyduğu veri serilerinde kullanılabilirken, parametrik olmayan yöntemler verilerin dağılımından ve veri eksikliklerinden etkilenmemektedir [20, 2]. Bu nedenle genellikle hidrolojik verilerin normal dağılıma uymamaları sebebi ile parametrik olmayan yöntemler trend analizi hesaplamalarında oldukça sık kullanılabilir. Bu çalışmada Elazığ ili sınırları içerisinde belirlenen istasyonlara ait yağış verileri için parametrik olmayan Spearman – Rho ve Mann – Kendall yöntemleri ile özellikle son yıllarda literatürde sıklıkla kullanılan Şen'in Yenilikçi Trend Analizi yöntemi kullanılarak trend eğilimleri belirlenmeye çalışılmıştır.

6.1. Spearman – Rho Testi

Parametrik olmayan bir test istatistiğidir. Bu testin uygulanabilmesi için test edilecek verinin büyükten küçüğe veya küçükten büyüğe sıralanmış olması gerekir. Sıra istatistik değeri $R(x_i)$ verilerin küçükten büyüğe sıralanması yardımı ile belirlenir ve Spearman – Rho test istatistiği değeri olan r_s ise 4 no.lu eşitlik yardımı ile belirlenebilir [21, 19]:

$$r_s = 1 - 6 \left[\sum_{i=1}^n (R(x_i) - i)^2 \right] / (n^3 - n) \quad (4)$$

Ele alınan veri seti için hesaplanan r_s dağılımı $n > 30$ olması durumunda normal dağılıma yaklaştığından hesaplanan Z değerleri %95 anlamlılık düzeyi için normal dağılım çizelgelerinden elde edilen $Z_{\alpha/2}(1,96)$ değeri ile karşılaştırılarak değerlendirme yapılmaktadır. Z değeri r_s 'nin test istatistiğini ifade etmektedir ve 5 no.lu eşitlik yardımı ile hesaplanmaktadır. Hesaplanan Z değeri, $Z_{\alpha/2}(1,96)$ değerinden büyük ise belirli bir trendin olduğu ve r_s değerinin pozitif değer alması durumunda artan bir trend olduğu, negatif değerde olması durumunda ise azalan bir trendin olduğu tespit edilir [19]:

$$Z = r_s \sqrt{n-1} \quad (5)$$

6.2. Mann – Kendall Testi

Bu test Spearman – Rho testi gibi parametrik olmayan bir testtir. Bu amaçla Mann- Kendall test istatistiği olan S değeri 6 no.lu eşitlik yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (6)$$

Trend analizi $i=1,2,\dots,n-1$ 'e sıralanmış x_i ve $j=i+1,2,\dots,n$ 'e kadar sıralanmış x_j zaman serilerine uygulanır. Referans alınan her bir x_i veri noktası, x_j veri noktalarının geri kalanı ile karşılaştırılır. Eşitlik 6'daki $\text{sgn}(x_j - x_i)$ ifadesi eşitlik 7 yardımı ile belirlenir.

$$\text{Sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, > (x_j - x_i) \\ 0, = (x_j - x_i) \\ -1, < (x_j - x_i) \end{cases} \quad (7)$$

Varyans istatistiği (Var(S)) ise 8 no.lu eşitlik ile hesaplanmaktadır;

$$\text{Var}(S) = \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i i(i-1)(2i+5) \right] / 18 \quad (8)$$

Burada t_i , i örneğine kadar olan bağların sayısı ve m bağlı sıra gruplarının sayısı olarak kabul edilir. $n > 10$ olması durumunda normal dağılıma yaklaştığı kabulü ile standart normal test istatistiği Z ise eşitlik 9'daki gibi hesaplanır [22, 23]:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (9)$$

Hesaplanan Z değeri yardımı ile istatistiksel olarak anlamlı bir trend olup olmadığı tespit edilir. Hesaplanan Z değeri seçilen anlamlılık düzeyi için belirlenen $Z_{\alpha/2}$ değerinden (bu çalışmada %5 anlamlılık düzeyi için 1.96 değeri belirlenmiştir) küçük ise $Z < Z_{\alpha/2}$ anlamlı bir trend olmadığı, büyük olması durumunda ise trend olduğu sonucuna varılır. Bu durumda hesaplanan S değeri pozitif ise artan bir trend, negatif ise azalan bir trendin olduğunu gösterir.

6.3. Şen'in Yenilikçi Trend Analizi Yöntemi

Şen'in Yenilikçi Trend Analizi yöntemi ilk olarak Şen [1] tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntemin diğer yöntemlere kıyasla en önemli avantajı, herhangi bir varsayıma veya kısıtlamaya (seri korelasyonu, normal dağılıma sahip olmama ve veri sayısı gibi) ihtiyaç duyulmamasıdır [1, 24].

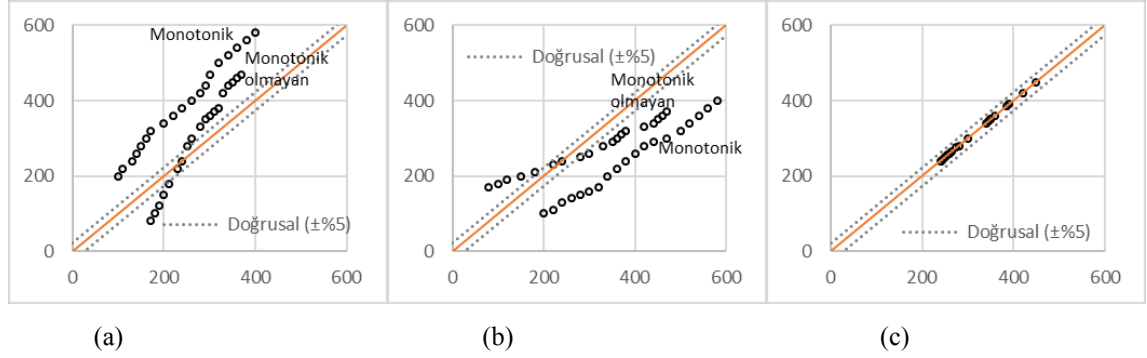
Şen'in Yenilikçi Trend Analizi (YTA) uygulanırken aşağıdaki adımlar sırası ile takip edilir.

- 1- Veri seti iki eşit alt seriye bölünür,
- 2- Her alt seri, küçükten büyüğe olacak şekilde sıralanır ve birinci alt seri dikey eksene, diğeri yatay eksene gelecek şekilde işaretlenir.
- 3- Veri serilerinin işaretlendiği koordinat sisteminde trendin olmadığını gösteren 45° 'lik eğime sahip düz bir çizgi çizilir.
- 4- Elde edilen saçılma diyagramı noktaları incelenerek, aşağıdaki hususlar belirlenmeye çalışılır;
 - a) Eğer saçılma diyagramındaki noktalar 45° 'lik eğrinin üstünde çizilen $+ \%5$ 'lik çizginin üstündeki bölgede kalıyor ise bu durumda artan bir trendin olduğu kabul edilir.
 - b) Eğer saçılma diyagramındaki noktalar 45° 'lik eğrinin altına çizilen $- \%5$ 'lik çizginin altındaki

bölgede kalıyor ise bu durumda azalan bir trendin olduğu kabul edilir.

c) Eğer saçılma diyagramındaki noktaların dağılımı 45°'lik çizgiye yakın ve \mp %5'lik çizgilerin arasındaki bölgede kalıyor ise zaman serilerinde anlamlı bir trend olmadığı kabul edilir.

Şen'in YTA yöntemi için artan ve azalan trend ile trend yok durumu şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Şen'in YTA yöntemi için a) Artan Trend, b) Azalan Trend, c) Trend Yok Durumları

7. Bulgular

Bu çalışmada Elazığ ili sınırları içerisinde yer alan beş adet meteoroloji gözlem istasyonundan elde edilen yağış verileri kullanılarak mevsimsel ve yıllık toplam yağış değerlerinin trendlerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada kullanılmış olan yağış verilerinin uzun dönemlere ait olması sebebi ile bu verilerin homojen olup olmadığının test edilebilmesi amacı ile XLSTAT 2022 programı yardımı ile Pettitt homojenlik testi uygulanmıştır. Çalışmada kullanılan zaman serilerine ait Pettitt homojenlik testi sonuçları çizelge 2'de sunulmaktadır.

Çizelge 2. Pettitt homojenlik testi sonuçları

İstasyon	Test Değerleri	İlkbahar	Yaz	Sonbahar	Kış	Yıllık Toplam
Sivrice	K	130.000	66.000	124.000	104.000	130.000
	t	2003	1989	1997	1996	1998
	p değeri (çift kuyruklu)	0.545	0.131	0.648	0.991	0.528
	alfa	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	Homojenlik Durumu	Homojen	Homojen	Homojen	Homojen	Homojen
Karakoçan	K	74.000	66.000	89.000	88.000	62.000
	t	1982	1985	1997	2000	1988
	p değeri (çift kuyruklu)	0.275	0.137	0.592	0.597	0.094
	alfa	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	Homojenlik Durumu	Homojen	Homojen	Homojen	Homojen	Homojen
Elazığ	K	453.000	259.000	337.000	524.000	396.000
	t	1984	1944	1947	1980	1988
	p değeri (çift kuyruklu)	0.290	0.494	0.866	0.120	0.512
	alfa	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	Homojenlik Durumu	Homojen	Homojen	Homojen	Homojen	Homojen
Keban	K	322.000	219.000	145.000	214.000	247.000
	t	1984	2006	1985	1968	1969
	p değeri (çift kuyruklu)	0.078	0.609	0.457	0.635	0.372
	alfa	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	Homojenlik Durumu	Homojen	Homojen	Homojen	Homojen	Homojen
Palu	K	195.000	131.000	121.000	245.000	168.000
	t	2007	1987	1971	1980	1976
	p değeri (çift kuyruklu)	0.742	0.361	0.239	0.289	0.902
	alfa	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	Homojenlik Durumu	Homojen	Homojen	Homojen	Homojen	Homojen

Çizelge 2 incelendiğinde Pettitt testi sonucu elde edilen p değerlerinin seçilen anlamlılık düzeyi katsayısı alfa'dan büyük olduğu görülmüş ve dolayısıyla H_0 hipotezi kabul edilerek zaman serilerinin homojen olduğu sonucuna varılmıştır.

Trend analizi için seçilen Mann-Kendall ve Spearman-Rho testleri ile analiz yapılmadan önce çalışmada kullanılacak olan yağış verilerinin otokorelasyona sahip olup olmadığının kontrol edilmesi gerekmektedir. Otokorelasyonun varlığı bu gibi parametrik olmayan yöntemlerde trendin belirlenmesinde hatalara sebebiyet verebildiğinden otokorelasyonun varlığının tespit edildiği zaman serilerinin prewhitening prosedürüne tabi tutularak otokorelasyon etkisinin ortadan kaldırılması gerekmektedir. Çalışmada kullanılan yağış verileri için hesaplanan korelasyon katsayıları ile %95 anlamlılık düzeyi için eşitlik 2 yardımı ile hesaplanan alt ve üst limit değerleri çizelge 3'te sunulmaktadır.

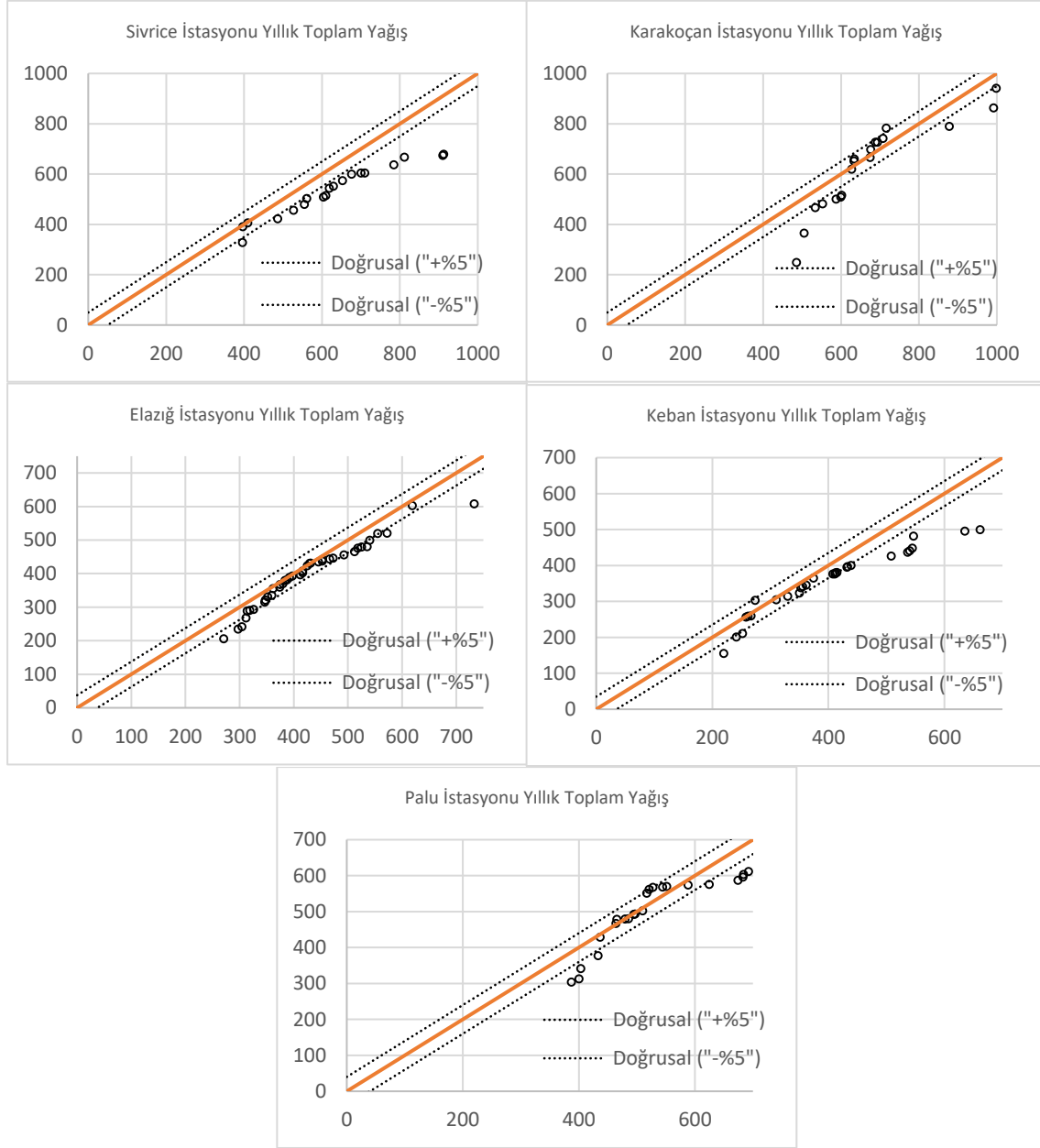
Çizelge 3. Yağış verileri için hesaplanan otokorelasyon değerleri ile alt ve üst limit değerleri

İstasyon Adı		İlkbahar	Yaz	Sonbahar	Kış	Yıllık Toplam
Elazığ	Üst Limit	0.19656	0.19656	0.19656	0.19656	0.19656
	Korelasyon Katsayısı	-0.14980	-0.20624	0.14231	0.08319	-0.03361
	Alt Limit	-0.19656	-0.19656	-0.19656	-0.19656	-0.19656
	Korelasyon Durumu	YOK	VAR	YOK	YOK	YOK
Keban	Üst Limit	0.23797	0.23797	0.23797	0.23797	0.23797
	Korelasyon Katsayısı	0.01546	0.18536	0.05481	0.21424	0.15436
	Alt Limit	-0.23797	-0.23797	-0.23797	-0.23797	-0.23797
	Korelasyon Durumu	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK
Palu	Üst Limit	0.24268	0.24268	0.24268	0.24268	0.24268
	Korelasyon Katsayısı	-0.06565	-0.17749	0.04308	-0.11071	0.21842
	Alt Limit	-0.24268	-0.24268	-0.24268	-0.24268	-0.24268
	Korelasyon Durumu	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK
Karakoçan	Üst Limit	0.28964	0.28964	0.28964	0.28964	0.28964
	Korelasyon Katsayısı	-0.03746	-0.15058	0.26330	-0.01382	0.21791
	Alt Limit	-0.28964	-0.28964	-0.28964	-0.28964	-0.28964
	Korelasyon Durumu	YOK	YOK	YOK	YOK	YOK
Sivrice	Üst Limit	0.28964	0.28964	0.28964	0.28964	0.28964
	Korelasyon Katsayısı	-0.04070	-0.34786	0.26629	-0.20151	0.18409
	Alt Limit	-0.28964	-0.28964	-0.28964	-0.28964	-0.28964
	Korelasyon Durumu	YOK	VAR	YOK	YOK	YOK

Çizelge 3'ten de görüldüğü gibi Elazığ ve Sivrice istasyonlarına ait yaz mevsimi yağış verilerinde otokorelasyon tespit edilmiş olup bu zaman serilerine prewhitening prosedürü uygulanmak sureti ile otokorelasyon etkisi giderilmiş veri setleri elde edilerek Mann-Kendall ve Spearman-Rho testlerinde bu veri setleri kullanılmıştır.

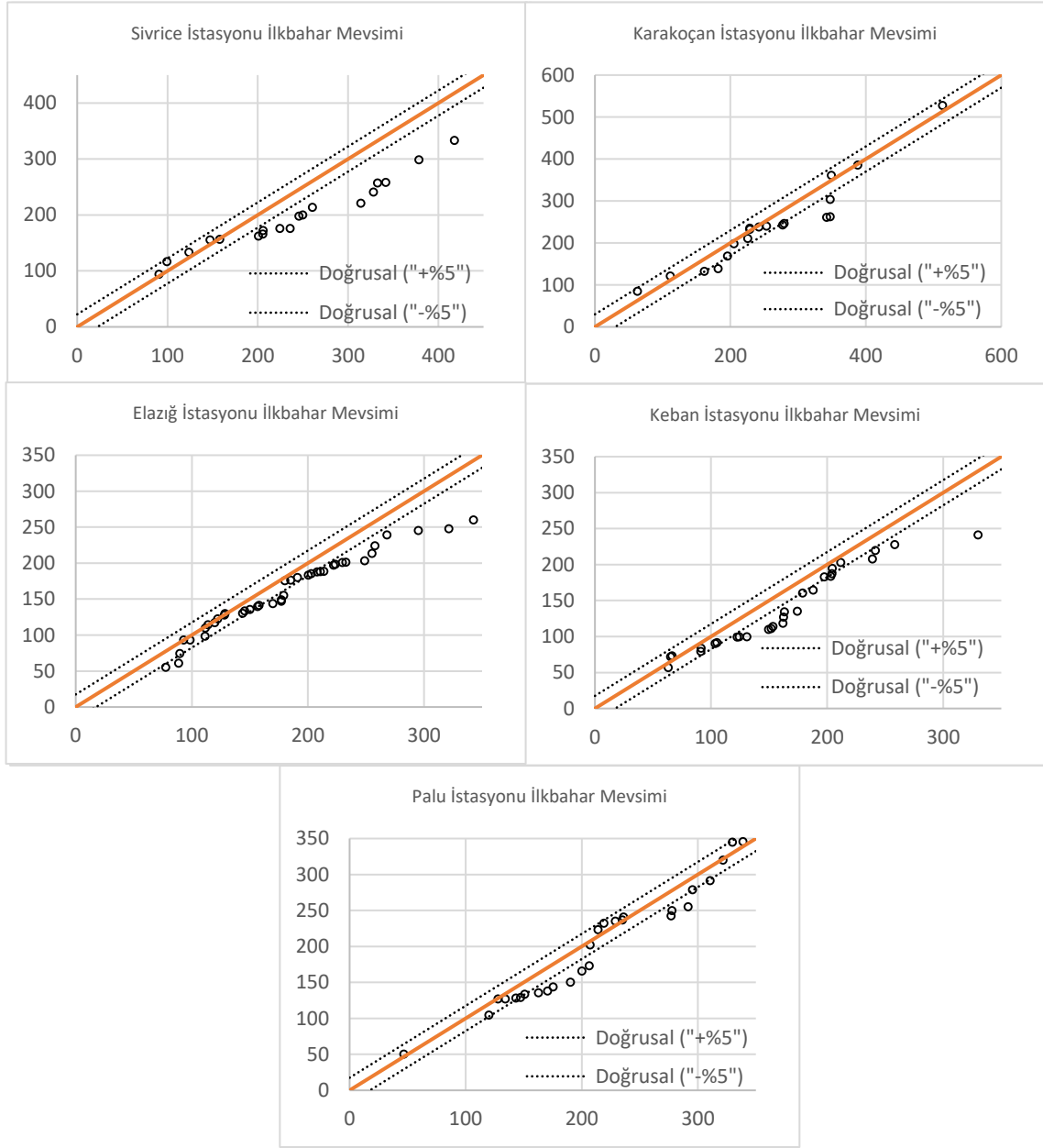
Çalışma için seçilen beş adet istasyon için yıllık toplam yağış verileri ile ilkbahar, yaz, sonbahar ve kış mevsimsel yağış verilerinin trendlerini belirlemek üzere Şen'in YTA yöntemi ile Spearman – Rho ve Mann – Kendall parametrik olmayan trend analizleri kullanılmıştır. Bu trend analizlerinden Şen'in YTA yöntemi ile elde edilen sonuçlar Şekil 3, 4, 5, 6 ve 7'de verilmiştir.

Elazığ İli Yağış Verilerinin Trend Analizi



Şekil 3. Seçilen istasyonlara ait yıllık toplam yağış verileri için Şen'in YTA yöntemi sonuçları

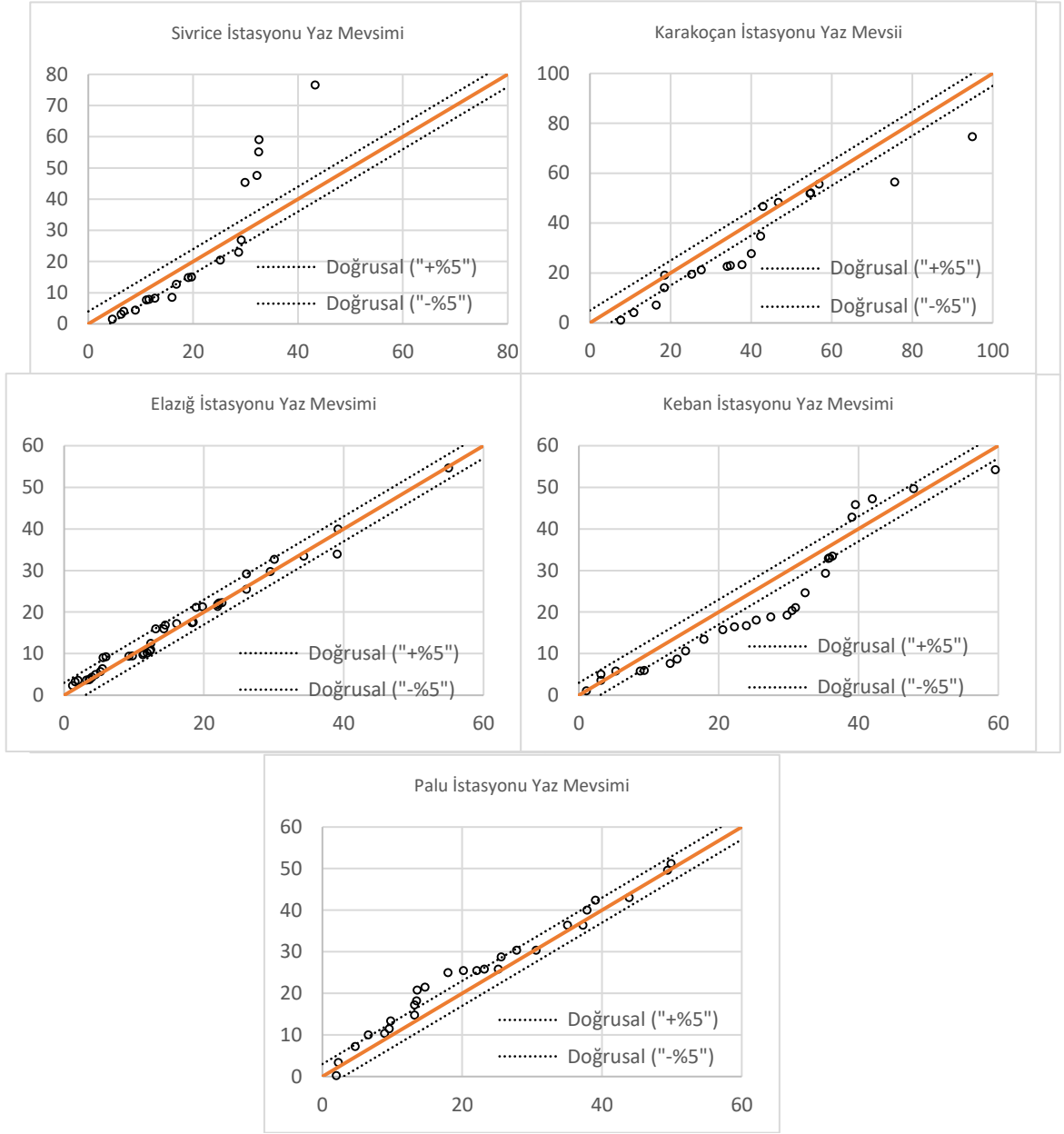
Şekil 3'te görülebileceği gibi yıllık toplam yağış verilerine Şen'in YTA yöntemi uygulandığında Elazığ istasyonunda anlamlı bir trend olmadığı, Sivrice istasyonunda monotonik azalan bir trend olduğu, diğer istasyonlarda ise monotonik olmayan azalan bir trend olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Seçilen istasyonlara ait ilkbahar mevsimi yağış verileri için Şen'in YTA yöntemi sonuçları

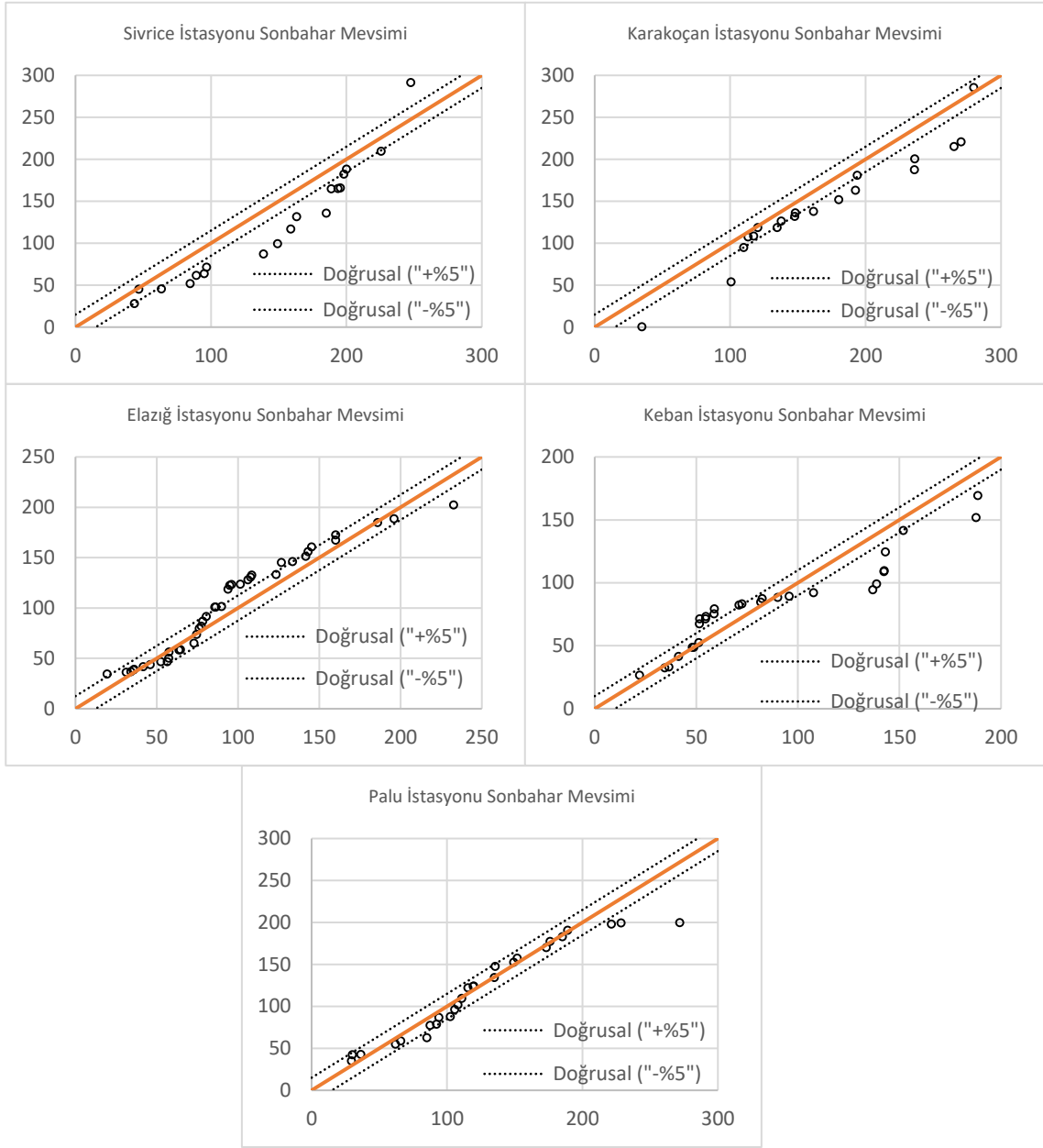
Şekil 4'te görülebileceği gibi ilkbahar mevsimi yağış verilerine Şen'in YTA yöntemi uygulandığında Karakoçan istasyonunda anlamlı bir trend olmadığı, Palu ve Sivrice istasyonlarında monotonik olmayan azalan bir trend olduğu, Elazığ ve Keban istasyonlarında ise monotonik azalan bir trend olduğu söylenebilir.

Elazığ İli Yağış Verilerinin Trend Analizi



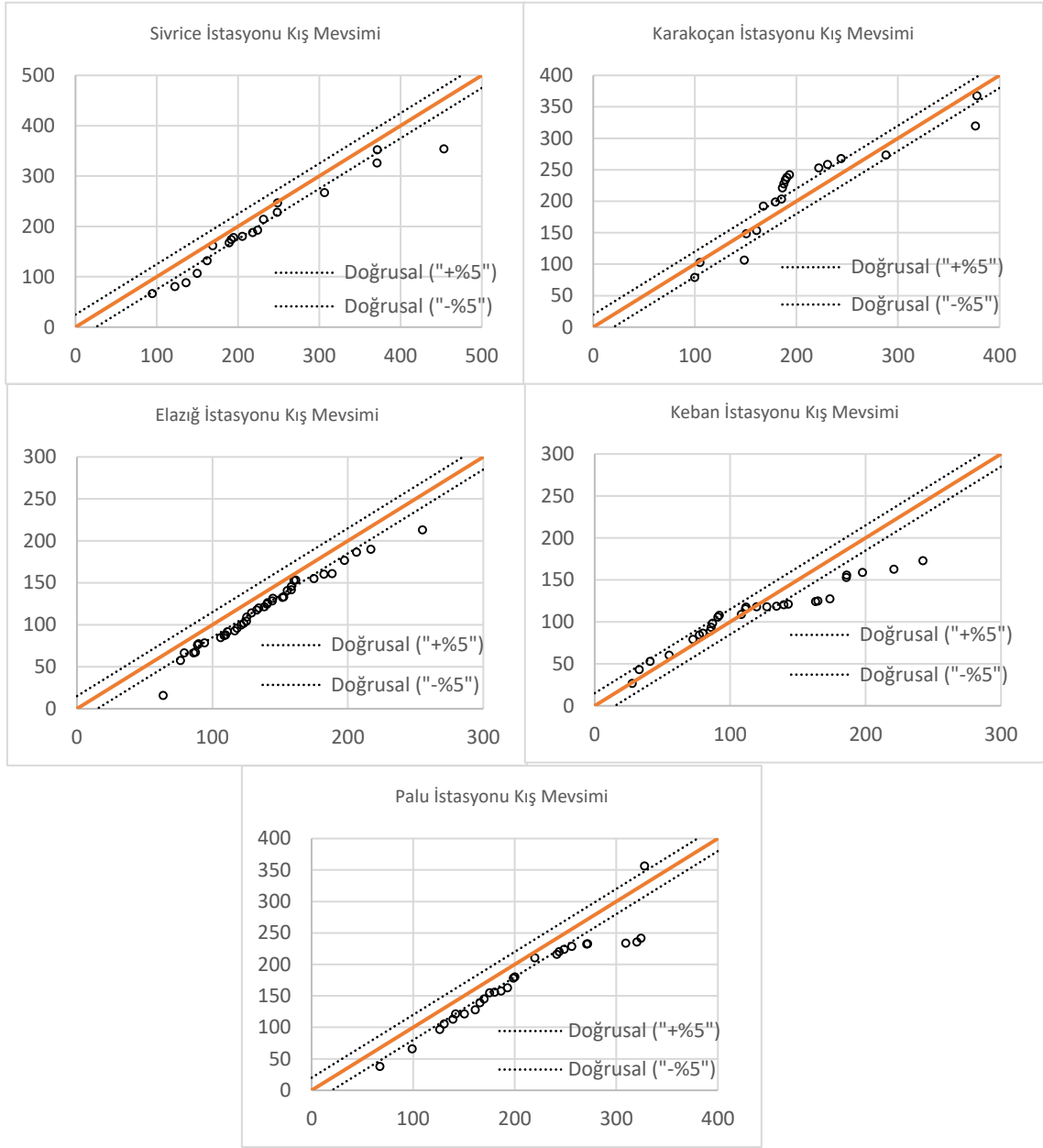
Şekil 5. Seçilen istasyonlara ait yaz mevsimi yağış verileri için Şen'in YTA yöntemi sonuçları

Şekil 5'te görülebileceği gibi yaz mevsimi yağış verileri için Şen'in YTA yöntemi uygulandığında %5 güven aralığında Elazığ istasyonunda anlamlı bir trend gözlenmez iken, Keban ve Karakoçan istasyonlarında monotonik olmayan azalan bir trend ve Palu ve Sivrice istasyonlarında ise monotonik olmayan artan bir trend gözlemlenmektedir.



Şekil 6. Seçilen istasyonlara ait sonbahar mevsimi yağış verileri için Şen'in YTA yöntemi sonuçları

Şekil 6'da görüldüğü üzere sonbahar mevsimi yağış verilerine Şen'in YTA yöntemi uygulandığında Elazığ istasyonunda monotonik olmayan artan bir trend, Karakoçan istasyonunda monotonik azalan trend, Keban, Sivrice ve Palu istasyonlarında ise monotonik olmayan azalan bir trend olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 7. Seçilen istasyonlara ait kış mevsimi yağış verileri için Şen'in YTA yöntemi sonuçları

Şekil 7'de görüldüğü gibi kış mevsimi yağış verilerine Şen'in YTA yöntemi uygulandığında Elazığ ve Sivrice istasyonlarında anlamlı bir trendin olmadığı, Palu istasyonunda monotonik azalan bir trendin olduğu, Keban istasyonunda monotonik olmayan azalan bir trend ve Karakoçan istasyonunda ise monotonik olmayan artan bir trend olduğu gözlemlenebilmektedir.

Mann-Kendall ve Spearman-Rho testleri ile elde edilmiş olan Z değerleri Çizelge 2'de verilmektedir. Çizelge 2 incelendiğinde % 95 anlamlılık düzeyinde, Sivrice ve Karakoçan istasyonlarında hem yıllık toplam hem de mevsimsel olarak herhangi bir trende rastlanmamıştır. Elazığ istasyonunda kış mevsiminde Mann-Kendall testine göre azalan yönde anlamlı bir trend olduğu gözlemlenmiştir. Keban istasyonunda ilkbahar mevsiminde ve yıllık toplam yağışlarda hem Mann-Kendall testi hem de Spearman-Rho testine göre azalan yönde anlamlı bir trend olduğu gözlemlenmiştir. Palu istasyonunda ise kış mevsimi yağışlarında Mann-Kendall ve Spearman-Rho testlerinin her ikisine göre de azalan yönde anlamlı bir trend olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmada uygulanan Mann-

Kendall, Spearman-Rho ve Şen'in YTA yöntemleri ile seçilen istasyonlar için mevsimsel yağışlar ile yıllık toplam yağışlar için belirlenen trend durumları ise Çizelge 3'te verilmektedir.

Çizelge 2. Mann-Kendall ve Spearman-Rho test sonuçları (%95 anlamlılık düzeyi için)

İstasyon	İlkbahar		Yaz		Sonbahar		Kış		Yıllık Toplam	
	M-K	S-R	M-K	S-R	M-K	S-R	M-K	S-R	M-K	S-R
17844-Sivrice	-1,9	-1,2	-0,56	-0,56	-1,20	-0,89	-0,92	-0,92	-1,19	-1,21
17774-Karakoçan	-0,6	-0,6	0,39	0,27	-0,02	-0,21	0,65	0,68	0,19	0,11
17201-Elazığ	-1,25	-1,16	0,13	0,21	-0,80	-0,20	-1,98	-1,95	-1,29	-1,40
17804-Keban	-2,52	-2,4	-1,70	-1,18	-0,39	-0,22	-1,02	-1,1	-1,92	-1,10
17806-Palu	-1,42	-1,41	0,91	0,82	-0,55	-0,49	-2,60	-2,30	-1,58	-1,52

*Koyu renk ile gösterilen değerler %95 anlamlılık düzeyinde anlamlı bir trendin olduğunu ifade etmektedir.

Çizelge 3. Trend Analizi Sonucu Seçilen İstasyonlarda Belirlenen Trend Durumları

İstasyon Adı	Trend Yöntemi	Trend Durumu				
		İlkbahar	Yaz	Sonbahar	Kış	Yıllık
17844-Sivrice	Şen YTA	↓	↑	↓	→	↓
	Mann-Kendall	→	→	→	→	→
	Spearman-Rho	→	→	→	→	→
17774-Karakoçan	Şen YTA	→	↓	↓	↑	↓
	Mann-Kendall	→	→	→	→	→
	Spearman-Rho	→	→	→	→	→
17201-Elazığ	Şen YTA	↓	→	↑	→	→
	Mann-Kendall	→	→	→	↓	→
	Spearman-Rho	→	→	→	→	→
17804-Keban	Şen YTA	↓	↓	↓	↓	↓
	Mann-Kendall	↓	→	→	→	→
	Spearman-Rho	↓	→	→	→	→
17806-Palu	Şen YTA	↓	↑	↓	↓	↓
	Mann-Kendall	→	→	→	↓	→
	Spearman-Rho	→	→	→	↓	→

■ Şen'in YTA Analizi ■ Mann-Kendall Trend Analizi ■ Spearman-Rho Trend Analizi
 → Trend Yok ↓ Azalan Trend ↑ Artan Trend durumlarını ifade etmektedir.

Çizelge 3'te görüldüğü gibi Sivrice istasyonu için yaz mevsimi yağışlarında Şen'in YTA yöntemine göre artan bir trend olduğu, kış mevsimi yağışlarında trend olmadığı belirlenirken diğer mevsimler ile yıllık toplam yağışlarda ise azalan bir trend olduğu belirlenmiştir. Mann-Kendall ve Spearman-Rho yöntemlerinin her ikisine göre mevsimsel yağışlar ile yıllık toplam yağışlar için anlamlı bir trend belirlenmemiştir.

Karakoçan istasyonu için Şen'in YTA yöntemine göre ilkbahar mevsimi yağışlarında trend olmadığı, kış mevsimi yağışlarında artan bir trend olduğu, diğer mevsimler ile yıllık toplam yağışlar için ise azalan bir trend olduğu belirlenmiştir. Mann-Kendall ve Spearman-Rho testlerinin her ikisine göre mevsimsel yağışlar ile yıllık toplam yağışlar için anlamlı bir trend belirlenmemiştir.

Elazığ istasyonu için Şen'in YTA yöntemine göre yaz ve kış mevsimi yağışları ile yıllık toplam yağışlar için anlamlı bir trend olmadığı belirlenir iken sonbahar mevsimi yağışları için artan bir trend olduğu, ilkbahar mevsimi yağışları için ise azalan bir trend olduğu belirlenmiştir. Kış mevsimi için Mann-Kendall testine göre azalan bir trend belirlenmiş iken Spearman-Rho testine göre ise anlamlı bir trend belirlenmemiştir. Diğer mevsim yağışları ve yıllık toplam yağışlar için ise her iki yöneme göre de anlamlı bir trend belirlenmemiştir.

Keban istasyonu için Şen'in YTA yöntemine göre tüm mevsimsel yağışlar ile yıllık toplam yağışlar için azalan bir trend belirlenmiştir. Mann-Kendall ve Spearman-Rho testlerinin her ikisine göre de ilkbahar mevsimi için azalan bir trend belirlenmiş iken diğer mevsim yağışları ile yıllık toplam yağışlar için anlamlı bir trend belirlenmemiştir.

Palu istasyonu için Şen'in YTA yöntemine göre yaz mevsimi yağışları için artan bir trend olduğu diğer tüm istasyonlar için ise azalan bir trend olduğu belirlenmiştir. Mann-Kendall ve Spearman-Rho testlerinin her ikisine göre kış mevsiminde azalan bir trend belirlenirken, diğer mevsim yağışları ile yıllık toplam yağışlar için ise anlamlı bir trend gözlemlenmemiştir.

8. Sonuçlar

Yağışlarda meydana gelen trendlerin belirlenmesi su kaynaklarının işletilmesi ve geliştirilmesi çalışmaları için oldukça önemlidir. Yağışların yıllar içerisindeki trendlerinin göz ardı edilmesi bu tarz çalışmalarda hatalı tahminler yapılmasına ve işletme aşamasında problemlerin ortaya çıkmasına neden olabilir.

Elazığ ili son yıllarda kuraklıktan en çok etkilenen bölgelerden biri olması nedeni ile yağış verilerinin yıllar içerisindeki trendlerinin belirlenmesi büyük bir öneme sahiptir. Bu amaçla çalışmada trendlerin belirlenebilmesi amacı ile Mann-Kendall, Spearman-Rho ve Şen'in YTA yöntemleri kullanılmıştır. Çalışmada Elazığ ili sınırları içerisinde bulunan Sivrice, Karakoçan, Elazığ, Keban, Palu istasyonlarının ilkbahar, yaz, sonbahar ve kış mevsimleri yağış verileri ile yıllık toplam yağış verileri için trend analizi yapılmıştır.

Yapılan trend analizi sonuçları incelendiğinde bölgede üç adet istasyonda mevsimsel bazda artan yönde bir trend olduğu tespit edilmiştir. Bu istasyonlardan Sivrice istasyonunda yaz mevsimi yağışlarında, Karakoçan istasyonunda kış mevsimi yağışlarında ve Elazığ istasyonunda ise sonbahar mevsimi yağışlarında artan bir trend olduğu tespit edilmiştir.

Şen'in YTA yöntemine göre yıllık toplam yağışlarda Elazığ istasyonunda anlamlı bir trend belirlenmez iken diğer tüm istasyonlarda azalan yönde anlamlı bir trendin olduğu tespit edilmiştir. Mann-Kendall ve Spearman-Rho testlerine göre ise yıllık toplam yağışlar için anlamlı bir trend belirlenmemiştir.

Her üç trend analizi yöntemi göz önüne alınarak Elazığ ili bazında değerlendirmede bulunulacak olur ise iki istasyonun yağış rejimlerinde dikkat çeken bir azalış trendinin hakim olduğu söylenebilir. Bu istasyonlardan Palu istasyonunda özellikle kış mevsimi yağışlarında her üç trend analizi yöntemine göre de azalan yönde anlamlı bir trendin hakim olduğu görülmektedir. Keban istasyonunda ise ilkbahar mevsimi yağışlarında her üç trend analizi yöntemine göre de azalan yönde anlamlı bir trendin olduğu görülmektedir. Bu nedenle özellikle bu istasyonların temsil ettikleri alanlar içerisinde bulunan su kaynaklarının verimli bir şekilde kullanılması için gerekli önlemlerin alınması ve su kayıplarının en aza indirilmesi için gerekli çalışmaların yapılması son derece önem arz edecektir.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde genellikle il merkezi temel alınarak trend analizleri yapılmıştır. Ancak bölgedeki diğer istasyonlar incelendiğinde farklı trend durumlarının olduğu görülebilmektedir. Bu nedenle yapılacak çalışmalarda bölgeyi iyi temsil edecek tüm istasyonların göz önüne alınması sureti ile değerlendirilmesi bölge hakkında daha doğru bilgi edinilmesine yardımcı olacaktır.

Aydın vd. 2019 yılında yaptıkları çalışmada Şen'in YTA yöntemine göre Elazığ ili yağış verilerinin aylık, mevsimsel ve yıllık periyotlarda trend analizini gerçekleştirmişlerdir [11]. Yapmış olduğumuz çalışmada ise Şen'in YTA yöntemi ve literatürde yaygın olarak kullanılan trend analizi yöntemlerinden Man-Kendall ve Spearman-Rho testleri yardımı ile Elazığ ili yağış trendlerinin mevsimsel ve yıllık bazda incelenmesi ve her üç yöntemin sonuçlarının birbirleri ile karşılaştırılması amaçlanmıştır. Çalışmalarda elde edilen sonuçlar incelendiğinde Şen'in YTA yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçların benzer olduğu, ancak bu çalışmada %5 anlamlılık seviyesine göre değerlendirme yapılması ve özellikle yaz aylarında bulunan eksik verilerin tamamlanması bazı istasyonların trend sonuçlarının farklı olarak değerlendirilmesine neden olmuştur. Aydın vd.'nin 2019 yılında yapmış oldukları çalışma sonuçlarından farklı olarak Elazığ istasyonunda kış mevsimi ve yıllık toplam yağışlarda anlamlı bir trend olmadığı tespit edilmiştir. Palu istasyonunda yaz mevsimi yağışlarında artan bir trend olduğu tespit edilmiştir. Sivrice istasyonunda ilkbahar mevsimi yağışlarında azalan bir trend olduğu, yaz mevsimi yağışlarında artan bir trend olduğu, kış mevsimi yağışlarında ise anlamlı bir trend olmadığı belirlenmiştir. Karakoçan istasyonunda ilkbahar mevsimi yağışlarında anlamlı bir trend olmadığı belirlenmiştir. Ancak özellikle Mann-Kendall ve Spearman-Rho testleri ile belirlenen trendler incelendiğinde Elazığ istasyonu kış mevsimi yağışları için Mann-Kendall yöntemine göre azalan bir trend belirlenmiş, Keban istasyonu ilkbahar mevsimi yağışları ile Palu istasyonu kış mevsimi yağışları için ise Mann-Kendall ve Spearman-Rho testlerinin her ikisi için de azalan bir trend belirlenmiştir. Diğer mevsimsel yağışlar ve yıllık toplam yağışlar için ise her iki yöntemine göre de anlamlı bir trend belirlenmemiştir. Şen'in YTA yönteminin trendlerin belirlenmesinde daha hassas sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Şen Z. Innovative trend analysis methodology. *Journal of Hydrologic Engineering* 2012; 17(9): 1042-1046.
- [2] Büyükyıldız M, Bertay A. Parametrik olmayan testler kullanılarak Sakarya havzası yağışlarının trend analizi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi* 2004; 19(2): 23-38.
- [3] Karabulut M, Cosun F. Kahramanmaraş ilinde yağışların trend analizi. *Coğrafi Bilimler Dergisi* 2009; 7(1): 65-83.
- [4] Kızılelma Y, Çelik M, Karabulut M. İç Anadolu Bölgesinde sıcaklık ve yağışların trend analizi. *Türk Coğrafya Dergisi* 2015; 64: 1-10.
- [5] Polat P, Sunkar M, Rize'nin iklim özellikleri ve Rize çevresinde uzun dönem sıcaklık ve yağış verilerinin trend analizleri. *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 2017; 27(1): 1-24.
- [6] Ay M, Özyıldırım S. Trend analysis of monthly total rainfall and monthly mean air temperature variables of Yozgat in Turkey. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi* 2017; 32(2): 65-75.
- [7] Şenocak S, Emek M. F. Trend analizi yöntemleri kullanılarak Doğu Anadolu Bölgesi aylık yağış miktarlarının değerlendirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 2019; 17: 807-822.
- [8] Coşkun S. Aras-Kura kapalı havzasının ortalama sıcaklık, yağış ve akım verilerinin trend analizi. *Fırat Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi* 2020; 30(2): 29-42.
- [9] Aydın M, Öz A. Van Gölü Havzasında hidrometeorolojik verilerin eğilim analizi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi* 2021; 36(2): 441-456.
- [10] Katipoğlu O. M, Yeşilyurt S. N, Dalkılıç H. Y. Yeşilirmak havzasındaki hidrolojik kuraklıkların Mann-Kendall ve Yenilikçi Şen yöntemi ile trend analizi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 2022; 12(2): 422-442.
- [11] Aydın M, Yaltay N, Öz A. Evaluation of Elazığ Province Precipitation Data by Innovative Trend Analysis. *Academic Perspective Procedia* 2019; 2(2): 162-171.
- [12] Pettitt A. N. A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)* 1979; 28(2): 126-135.
- [13] Kocsis T, Kovács-Székely I, Anda A. Homogeneity tests and non-parametric analyses of tendencies in precipitation time series in Keszthely, Western Hungary. *Theoretical and Applied Climatology* 2020; 139(3-4): 849-859.
- [14] Little R. J. A, Rubin D. B. *Statistical Analysis with Missing Data*. John Wiley & Sons, Inc. 2002; 793
- [15] von Storch H, Navarra A. *Analysis of Climate Variability - Applications of Statistical Techniques*. Springer-Verlag, New York 1995.
- [16] Gocic M, Trajkovic S. Analysis of precipitation and drought data in Serbia over the period 1980–2010. *Journal of Hydrology* 2013; 494: 32-42.
- [17] Gümüş V, Şimşek O. Şanlıurfa İstasyonunun Aylık Ortalama Güneşlenme Şiddetinin Farklı Yöntemler ile Trend Analizi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi* 2020; 5(3):227-238.
- [18] Cebe E. N. Türkiye akarsularında mevsimsel trend analizi. *Doktora Tezi, İTÜ, İstanbul, Türkiye, 2007.*
- [19] Soydan N. G, Gümüş V, Şimşek O, Gerger R, Berivan A. Seyhan Havzası aylık ortalama akım ve yağış verilerinin trend analizi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi* 2016; 7(2): 319-327.
- [20] Çeribaşı G. Şen yöntemi ve trend yöntemleri kullanılarak Doğu Karadeniz havzasının yağış verilerinin analiz edilmesi. *Journal of the Institute of Science and Technology* 2019; 9(1): 254-264.
- [21] Yue S, Wang C. The influence of serial correlation on the Mann–Whitney test for detecting a shift in median. *Advances in Water Resources* 2002; 25(3): 325-333.
- [22] Yenigün K, Gümüş V, Bulut H. Trends in streamflow of the Euphrates basin, Turkey. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management* 2008; 161(4): 189-198.
- [23] Mondal A, Kundu S, Mukhopadhyay A. Rainfall trend analysis by Mann-Kendall test: A case study of north-eastern part of Cuttack district, Orissa. *International Journal of Geology, Earth and Environmental Sciences* 2012; 2(1): 70-78.
- [24] Caloiero T, Coscarelli R, Ferrari E. Application of the innovative trend analysis method for the trend analysis of rainfall anomalies in southern Italy. *Water Resources Management* 2018; 32(15): 4971-4983.

Yeni Tip Çentikli Delta Kanat Modelinin Roketin Uçuş Performansına Etkilerinin Araştırılması

Cihan ÖZEL^{1*}, Cevher Kürşat MACİT², Meral ÖZEL³

^{1,2,3}Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye

*¹cozel@firat.edu.tr, ²macitkursatcevher@gmail.com, ³mozel@firat.edu.tr

(Geliş/Received:03/10/2022;

Kabul/Accepted:26/10/2022)

Öz: Bu çalışmada, ortalama 3 km irtifaya 4 kg yükü taşıyabilen katı yakıtlı bir model roketin farklı kanat modellerine göre uçuş analizleri sayısal olarak araştırılmıştır. Bu yük ve irtifaya göre roketin ve kanatların CAD modeli OpenRocket programında oluşturulmuştur. Programda mevcut uygulamalarda kullanılan delta, yamuk, kırpılmış delta, ok delta ve kırpılmış ok delta kanat modellerinin roketin hızında, stabilitesinde, ivmesinde, ağırlığında ve irtifasındaki değişimlere etkileri grafikler halinde sunulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, en iyi uçuş verileri ok delta kanat modelinde bulunmuştur. Daha sonra, bu kanat modeli referans alınarak yeni tip bir kanat modeli geliştirilmiş, bu kanat modeli çentikli delta kanat olarak isimlendirilmiş ve bu kanadın uçuş verileri analiz edilmiştir. Yeni kanat geometrisinin ok delta kanat geometrisine göre yaklaşık olarak roketin irtifasında %0.382, hızında %0.366, ivmesinde %5 artış meydana getirirken roket stabilitesinde %2.66, ağırlığında %0.287, basınç merkezinde %0.507 ve ağırlık merkezinde ise %0.568'lik bir azalma sağladığı görülmüştür. Bu sonuçlara göre, çentikli delta kanat modelinin roketin performansında olumlu etkiler sağladığı görülmüştür.

Anahtar kelimeler: OpenRocket programı, çentikli delta kanat, roket performansı

Investigation of the Effects of the New Type Notched Delta Fin Model on the Flight Performance of the Rocket

Abstract: In this study, the flight analyzes of a solid fuel model rocket that can carry a load of 4 kg at an average altitude of 3 km were investigated numerically according to different fin models. According to this load and altitude, the CAD model of the rocket and fins was created in the OpenRocket program. The effects of the delta, trapezoidal, clipped delta, arrow delta and clipped arrow delta fin models used in current applications in the program on the changes in the speed, stability, acceleration, weight and altitude of the rocket are presented in graphics. According to the results obtained, the best flight data was found in the arrow delta fin model. Later, a new type of fin model was developed based on this fin model, this fin model was named as the notched delta fin and the flight data of this fin were analyzed. Compared to the arrow delta fin geometry, the new fin geometry provides approximately 0.382% increase in altitude, 0.366% increase in speed, 5% increase in acceleration, while providing a decrease of 2.66% in rocket stability, 0.287% in weight, 0.507% in center of pressure and 0.568% in center of gravity. According to these results, it has been seen that the notched delta wing model has positive effects on the performance of the rocket.

Keywords: OpenRocket program, notched delta fin, rocket performance

1. Giriş

Çoğu havacılık tasarım problemi, aerodinamik, yapısal bileşenler, tahrik, uçuş mekaniği, kontrol, imalat ve bakım gibi konular üzerinde çalışmaları içermektedir [1,2]. Kanatlar, bir roketin dengelenmesinde önemli bir rol oynamaktadır ve roketin uçuş yönünü ve yörüngesini koruması için tasarımlarının son derece dikkatli yapılması gerekmektedir [3]. Kanatlar ayrıca roketin ağırlık merkezi ile basınç merkezi arasındaki minimum mesafe olarak tanımlanan roketin statik marjininin korunmasına da yardımcı olur. Rüzgâr nedeniyle roketin istenmeyen yöne savrulması, yüzeyine, basınç merkezi aracılığıyla hareket eden kaldırma kuvveti roket üzerine ilave kanatçıklar monte edilerek kontrol edilebilir [4]. Rokette aerodinamik verimliliğin yanı sıra uçuş için gereken en önemli şartlardan biriside kararlılıktır. Kararlı bir uçuş için ağırlık merkezinin ve basınç merkezinin konumu büyük önem arz etmektedir. Kanatların basınç merkezine ve uçuş kararlılığına önemli ölçüde etkileri vardır [5]. Kanatçık geometrisi basınç merkezinin konumunu belirlerken, kanatçık profili aerodinamik verimliliğe etki etmektedir. Kanat geometrisinin kararlılığın yanı sıra roketin çıkabileceği maksimum irtifaya da etkileri vardır [6].

* Sorumlu yazar: cozel@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹0000-0002-3227-6875, ²0000-0003-0466-7788, ³0000-0002-9516-4715

Son zamanlarda, mühendislik ve akademik çalışmalarda model roketlerin bilgisayar ortamında tasarımları yapılarak çeşitli programlarda uçuş analizlerinin ve simülasyonlarının yapıldığı görülmektedir. Bu kapsamda, Niskanen [7], açık kaynaklı bir model roket simülasyon yazılımı olan OpenRocket simülasyon programını geliştirmiştir. Campbell vd.[8], model roketleri uçuş yörüngesinin simülasyonunu incelemek amacıyla kullanmıştır. Brewer vd. [9], model roketlerde motor itici gazının analizini incelemek amacıyla kullanmışlardır. Tola ve Nikbay [10], yamuk kanat tasarımıyla bir model roket üzerinde çırpma hızı, kanat kalınlığı, koniklik oranı ve en-boy oranının etkisini araştırmışlardır. Kanatların şekli ve boyutu, model roketin irtifasını ve stabilitesini etkilediği sonucuna varmışlardır. Etkin bir kanat tasarımı yapabilmek için kanat şekli ve boyutlarının irtifa ve stabilite üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmelidir. Pektaş vd.[11], yapmış oldukları model roket tasarımında yamuk ve üçgen olmak üzere iki farklı kanat modeli ile 7 km irtifaya 8 kg yük taşımak üzere tasarlanmış bir model oluşturularak roketin üzerindeki süpürme, irtifa ve stabilite değişimini incelemişlerdir. Rohini vd. [12], katı yakıtlı roket modelinin tasarımını, analizini, imalatını ve testlerini gerçekleştirmişler. LC Jil vd. [13], bükülmüş kanat ve düz kanatçıkları incelemişler ve her iki kanadın verilerini karşılaştırmışlardır. Çalışmada, roket kanatlarının açıklık/kiriş oranı, eğrilik yarıçapı ve kanat açıları gibi çeşitli konfigürasyonları incelenmiştir. İnceleme sonucunda, düz kanatların daha yüksek kaldırma özelliklerine ve yunuslama momentlerine sahip olduğu, ancak bükülmüş kanatların yatay ekseninde daha iyi stabiliteye sahip olduğu görülmüştür. Yine yamuk, delta, kırılmış delta ve eliptik gibi farklı konfigürasyonlardaki kanat modelleri, araştırmacılar tarafından kapsamlı bir şekilde incelenmiştir [13-15]. Bu çalışmalarda, kanat tasarımları yapılırken her bir kanat için uç kirişi, kök kirişi, açıklığı, hücum kenarı, arka kenarı ve en-boy oranı gibi tasarımını karakterize eden çeşitli özellikleri incelenmiştir. Çoğu roket kanatçıkları, düşük en-boy oranlarıyla tasarlanmış ve kanat koniklik oranı 0,2 ile 0,4 arasında minimum sürüklenmesi için ideal olduğu belirtilmiştir [16]. Çeşitli kanat tasarımlarının roket stabilitesi ve genel performansı üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak incelenmiş ve kanat tasarımının performans üzerinde etkili bir parametre olduğu belirtilmiştir [17-20]. Başka bir çalışmada ise kanadın, roketin uçuşu sırasında karşılaşılan maksimum aerodinamik ve atalet yüklerine karşı dayanacak şekilde tasarlanmalarının yapılması gerektiği vurgulanmıştır [2]. Yine yapılan tasarımlarda basınç merkezinin, ağırlık merkezinin önünde olması durumunda geri yükleme kuvvetlerinin etkisi ile roket üzerinde meydana gelen torkun ters yönde hareket ederek roketin uçuş yörüngesinden sapmasına neden olduğu ve böylelikle roketin kararsız hale döndüğü ifade edilmiştir [21-23].

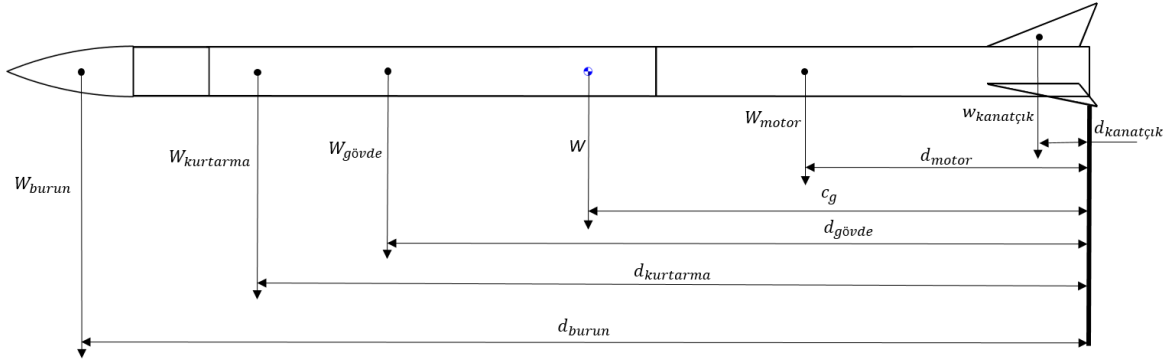
Bu çalışmada, mevcut roket uygulamalarında kullanılan kanat modellerinden farklı olarak yeni tip bir çentikli delta kanat modeli geliştirilmiştir. Daha sonra, bu yeni tip kanat OpenRocket Programında tasarlanan model roket üzerine monte edilmiş ve bu roketin uçuş verileri sayısal olarak analiz edilmiştir. Analiz sonuçları uygulamada kullanılan mevcut kanatlarla karşılaştırılmış ve bu kanadın roketin uçuş performansına etkileri belirlenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Kanat profiline göre roketin hızında, stabilitesinde, ivmesinde, ağırlığında ve irtifasındaki değişimleri analiz etmek için model roketin katı modeli OpenRocket programında aşağıdaki gibi tasarlandı (Şekil 1). Roket uygulamalarına yönelik uçuş analizlerinin yapılabilmesi için ağırlık roket boyunca dağıtılır ve problemin çözümü için ağırlık dağılımının nasıl olduğunu bilmek önemlidir. Bu ağırlıkların gövde üzerindeki dağılımları literatür dikkate alınarak Şekil 1 deki gibi belirlendi [24-27]. Model roketin toplam ağırlığını hesaplamak için ise bu literatürlerde verilen aşağıdaki (1) numaralı bağıntı kullanıldı.

$$W_{Top} = W_{burun} + W_{kurtarma} + W_{gövde} + W_{motor} + W_{kanatçık} \quad (1)$$

(1) numaralı eşitlikte her bir komponentin ağırlığı ise $W = m \cdot g$ formülü kullanılarak hesaplanır. Bu formülde m komponentin kütlesi ve g ise yer çekimi ivmesidir. Yine roket yörüngesi ve kararlılığı için, ağırlık merkezinin konumunun belirlenmesi de önemlidir. Bu çalışmada ağırlık merkezinin konumu roketin ana parçalarının (burun, kurtarma sistemi, gövde borusu, kanatlar, motor vs.) kütlelerine ve referans alınan noktaya göre Şekil 1 de gösterildiği gibi belirlendi [24-27].

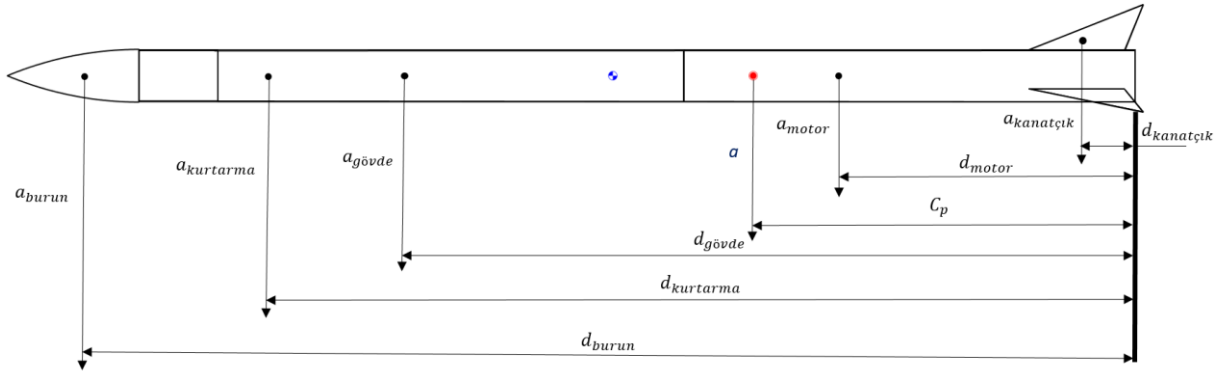


Şekil 1. Model roketin CAD tasarımı, ağırlık dağılımı ve roketin kütle merkezleri

Ağırlık merkezinin referans çizgisine uzaklığı c_g 'nin roketin toplam ağırlığı ile çarpımı, her komponentin ağırlığının referans çizgisine olan uzaklığı ile çarpımlarının toplamına eşittir. Bu durumda roketin ağırlık merkezi (2) numaralı eşitlik ile hesaplanmaktadır [24-27].

$$c_g W = d_{burun} w_{burun} + d_{kurtarma} w_{kurtarma} + d_{gövde} w_{gövde} + d_{motor} w_{motor} + d_{kanatçık} w_{kanatçık} \quad (2)$$

Literatürde basınç merkezi herhangi bir cisme uygulanan tüm kuvvetlerin geçtiği ancak moment oluşturmadığı nokta olarak kabul edilmektedir. Bu merkez roket üzerine hava basıncından dolayı oluşan kuvvetlerin etkilediği noktadır. Yani sonuç olarak roketin ağırlığından dolayı oluşan kuvvetler roketin ağırlık merkezine, aerodinamik kuvvetler de basınç merkezine etki eder. Roketin basınç merkezi ise Şekil 2'de gösterildiği gibi belirlendi [24-27].

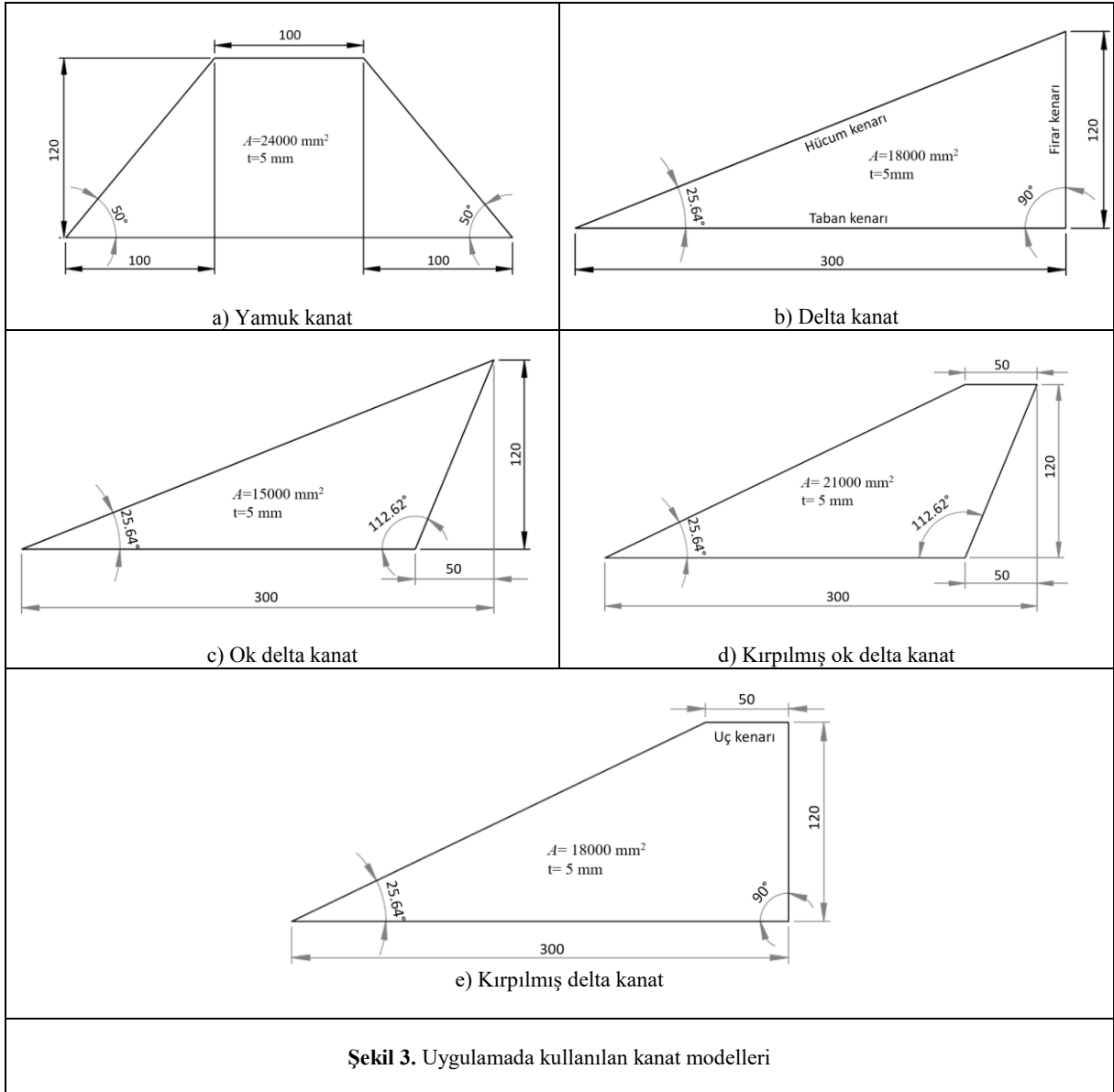


Şekil 2. Model roketin basınç merkezi

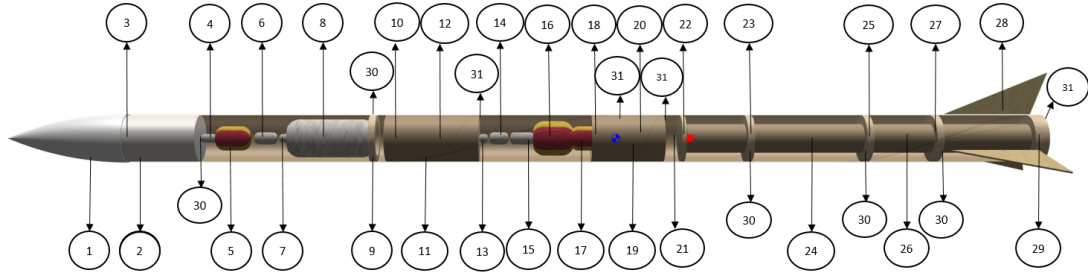
Basınç merkezinin referans çizgisine uzaklığının c_p roketin toplam alanı (A) ile çarpımı, her komponentin alanının referans çizgisine olan uzaklığı ile çarpımlarının toplamına eşittir. Roketin basınç merkezi literatürde (3) numaralı eşitlik ile hesaplanmaktadır [24-27].

$$c_p A = d_{burun} a_{burun} + d_{kurtarma} a_{kurtarma} + d_{gövde} a_{gövde} + d_{motor} a_{motor} + d_{kanatçık} a_{kanatçık} \quad (3)$$

OpenRocket programında model roketin tasarımı yapılırken ilk önce bu roketin 4 kg yükü 3 km irtifaya kadar taşıyabileceği dikkate alınarak roketin tasarımı yapıldı. Daha sonra programda bu model roketin diğer bileşenleri ve boyutları belirlendi. Makalede kanat profillerinin roketin performansına etkilerini analiz etmek için ilk önce uygulamada kullanılan yamuk, delta, ok delta, kırılmış ok delta ve kırılmış delta kanat modelleri tasarımı yapılan model roket üzerine monte edildi (Şekil 3).



Bu kanat modellerinden ok delta kanat modeli kullanılarak oluşturulan model roket için tüm bileşenlerin ağırlıkları ise bileşenlerin malzemeleri ve boyutları dikkate alınarak hesaplandı. Yine bu ağırlıkların Şekil 2 ve 3 te verilen referans çizgisine olan uzaklıkları OpenRocket programı ile belirlendi ve tüm bu büyüklüklerin değerleri topluca Şekil 4 te verildi.



Şekil 4. Ok delta kanatlı model roketin bileşenleri

Komponent	Adet	Numara	Boyut (mm)	Malzeme	Ağırlık (gr)
Burun konisinin bileşenleri					
Burun konisi ve gövdesi	1	1,2	510	Karbon fiber	1317
Mapa	1	3	25	Dövülmüş çelik	104
Şok kordonu	1	4	35	Paracord	2.7
W_{burun}					423.7
Kurtarma sisteminin bileşenleri					
Faydalı yük paraşütü	1	5	100	Ripstop Nylon	131
Fırlatma mekanizması	1	6	65	ABS Flement	200
$W_{kurtarma}$					331
Gövdenin bileşenleri					
Mapa	1	7	25	Dövülmüş çelik	104
Faydalı yük	1	8	260	-	4000
Merkezleme halkası	1	9	20	Kontratabla	21.2
Elektronik devre kutusu	1	10	270	Fiberglass	383
Uçuş bilgisayarı	1	11	220	-	1450
Üst gövde	1	12	Uzunluk (1700) çap (140)	Karbon fiber	3333
Mapa	1	13	25	Dövülmüş çelik	104
Şok kordonu	1	14	35	Paracord	2.7
Fırlatma mekanizması	1	15	65	ABS Flement	200
Büyük paraşüt	1	16	150	Ripstop Nylon	874
Küçük paraşüt	1	17	100	Ripstop Nylon	132
Gövde bağlantı elemanı	1	18	210	Alüminyum	700
Bölme perdesi	1	19	20	Kontratabla	90.3
Bölme perdesi	1	20	20	Kontratabla	90.3
Alt gövde	1	21	Uzunluk (1100) çap (140)	Karbon fiber	2758
Bölme perdesi	1	22	20	Kontratabla	90.3
$W_{gövde}$					14332.8
Motorun bileşenleri					
Motor merkezleme halkası	1	23	51	Kontratabla	55.6
Motor kundağı	1	24	940	Karbon fiber	1262
Motor ve kanat merkezleme halkası	1	25	51	Kontratabla	55.6
Motor	1	26	51	-	7878
W_{motor}					9251.2
Kanadın bileşenleri					
Motor ve kanat merkezleme halkası	1	27	51	Kontratabla	55.6
Kanat	3	28	Şekil 4c de verildi	Karbonfiber	340
Motor merkezleme halkası	1	29	40	Kontratabla	55.6
W_{kanat}					1131.2
M5 vida	27	30	6	Çelik	1.21
M8 vida	4	31	10	Çelik	5.03
W_{vida}					52.79
Model roketin kanatsız ağırlığı (W)					25168
Kanat dâhil model roketin ağırlığı (W_{Top})					25508
Roket bileşenlerinin diğer uzunluk ve büyüklükleri					
Basınç merkezi (C_p)	-	-	1980	-	-
Ağırlık merkezi (C_g)	-	-	1770	-	-
Kanat kalınlığı (t)	-	-	5	-	-
Kanat alanı (A)	-	-	15000 mm ²	-	-
$d_{kanatçık}$	-	-	300	-	-
d_{motor}	-	-	1030	-	-
$d_{gövde}$	-	-	2650	-	-
$d_{kurtarma}$	-	-	65	-	-
d_{burun}	-	-	350	-	-

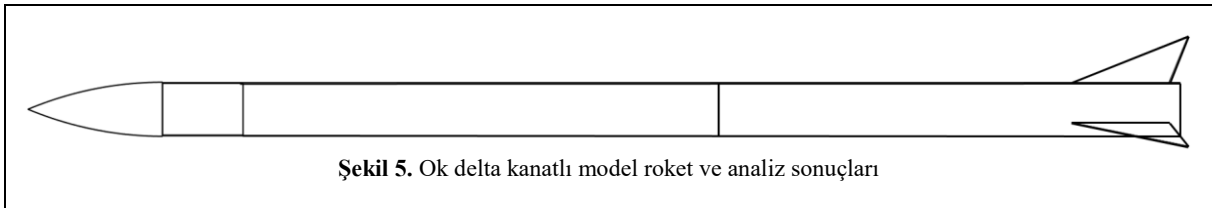
Ancak makalenin çok hacimli olmaması için tasarımı yapılan diğer model roketlerin kanat ve toplam ağırlığı ile ağırlık ve basınç merkezi gibi büyüklükleri de yukarıda verilen (1), (2) ve (3) eşitlikleri kullanılarak hesaplandı ve bulunan değerler aşağıdaki tabloda verildi (Tablo 1).

Tablo 1. Kanat modellerine göre roketlerin diğer büyüklükleri

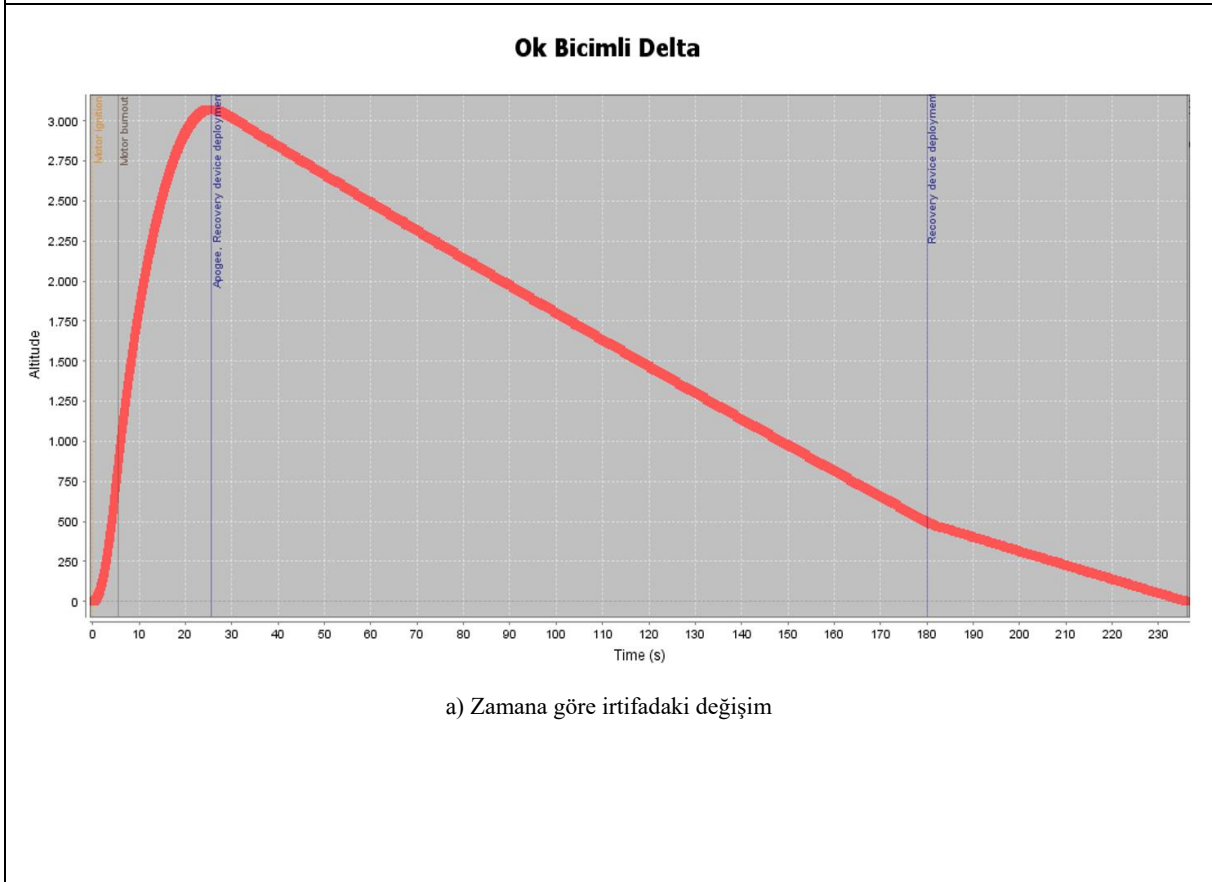
Model roket tipi	W (gr)	Kanat ağırlığı (gr)	W_{top} (gr)	C_p (mm)	C_g (mm)	t (mm)
Yamuk kanat	25168	545	25713	2080	1770	5
Delta kanat	25168	409	25577	2020	1770	5
Kırpılmış ok delta kanat	25168	409	25577	2080	1770	5
Kırpılmış delta kanat	25168	477	25645	2090	1770	2

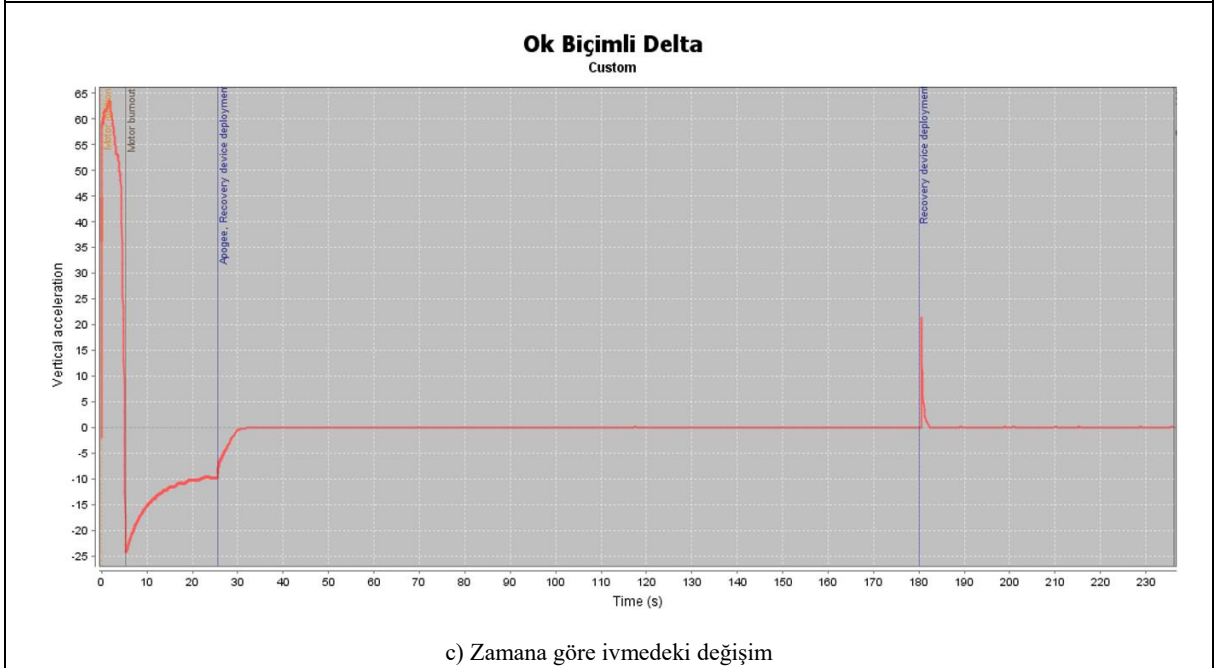
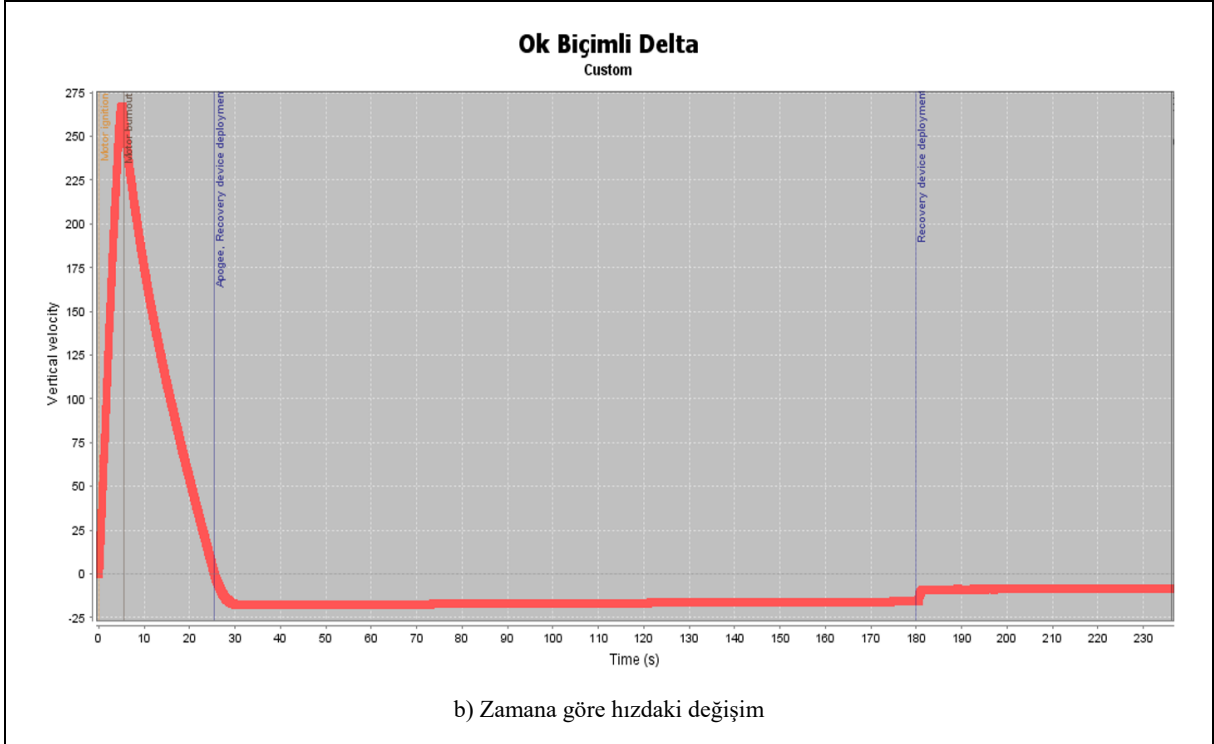
3. Sonuçlar ve Tartışma

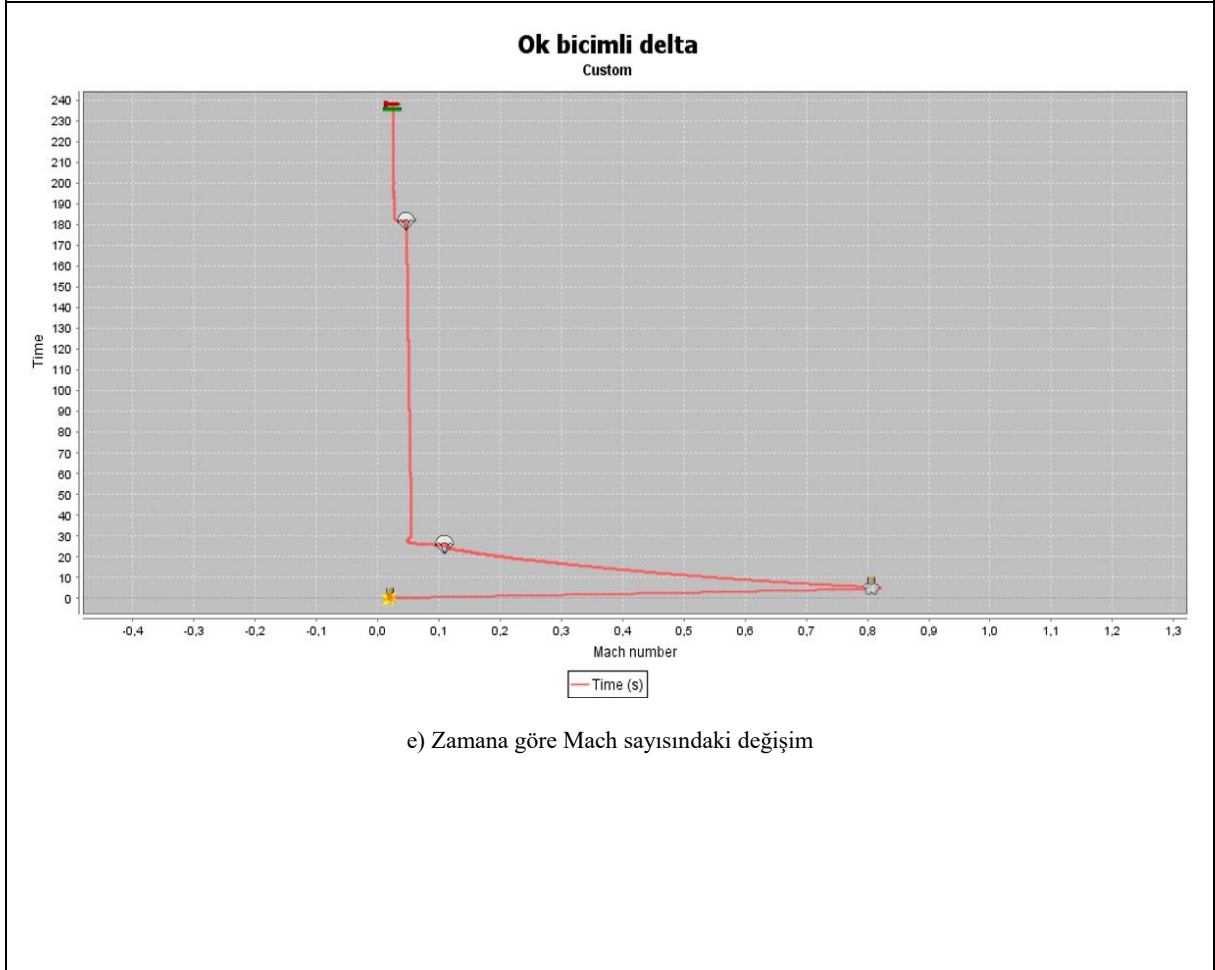
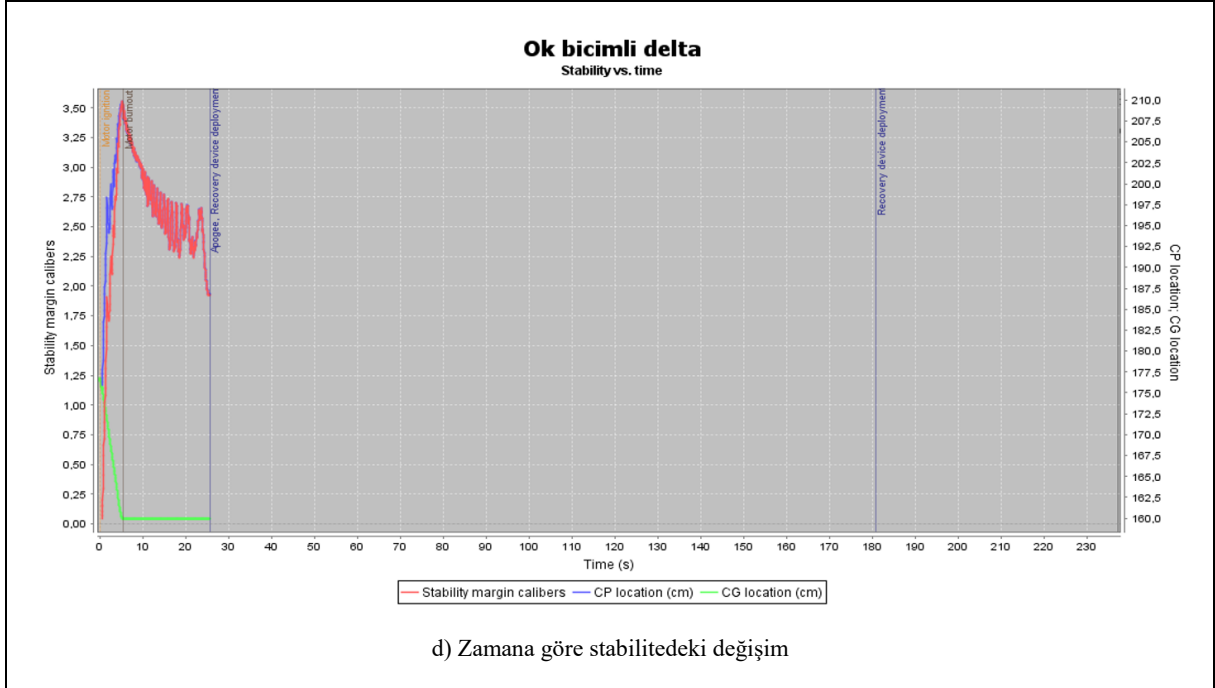
OpenRocket programında her bir kanat modeli için model roketin uçuş analizleri yapıldı. Ok delta kanatlı model roketin zamana bağlı olarak irtifasındaki, hızındaki, ivmesindeki, stabilitesindeki, Mach sayısındaki, ağırlık ve basınç merkezindeki değişimleri aşağıda grafikler halinde sunuldu (Şekil 5).

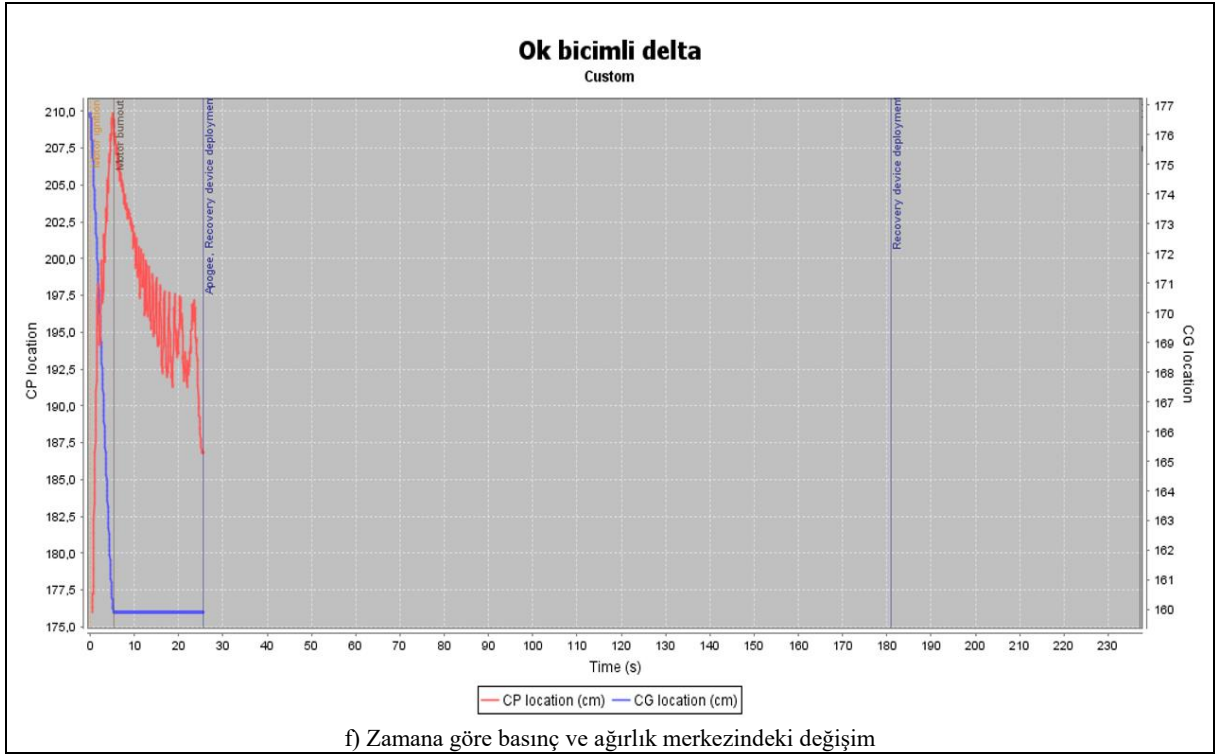


Şekil 5. Ok delta kanatlı model roket ve analiz sonuçları

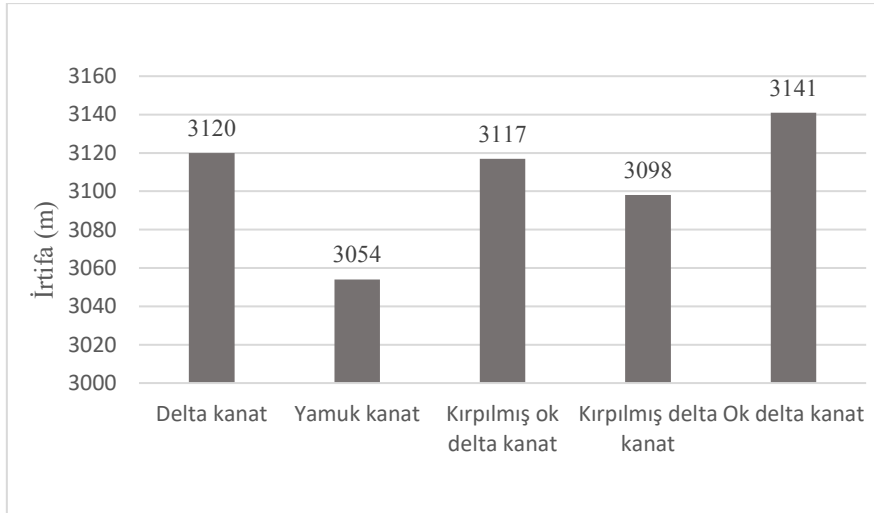






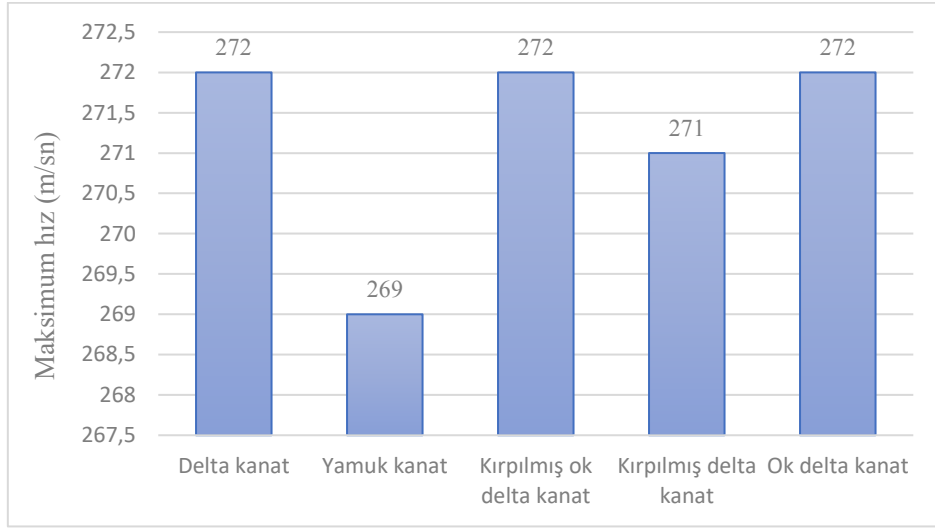


Daha sonra tasarımı yapılan model roketle diğer kanat modelleri de uygulanarak roketin uçuş performansı incelendi. Ancak makalenin çok uzun olmaması için makalede her bir kanat modeli için analiz sonuçları grafikler halinde verilmedi. Sonuçlar, çubuk diyagramlar halinde aşağıda topluca verildi (Şekil 6-12).



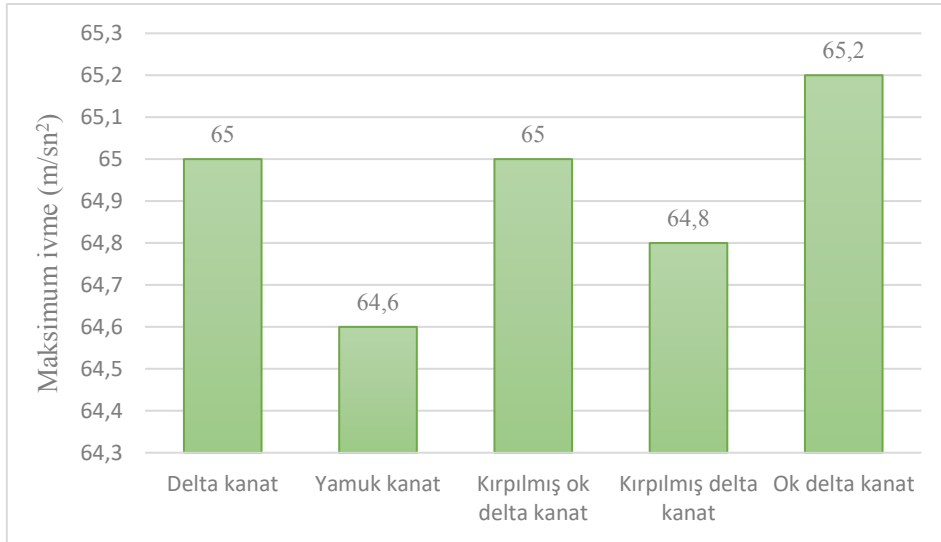
Şekil 6. Roketlerin irtifasındaki değişimler

Literatürde kanat alanındaki değişimin roketin irtifası ile yaklaşık olarak doğru orantılı olduğu ifade edilmiştir [13,28]. Nitekim bu çalışmada da kanat alanının artması ile model roketin irtifasında azalma görülürken, kanat alanının azalması ile roketin irtifasında maksimum bir artış olduğu görülmüştür (Şekil 3 ve 6).



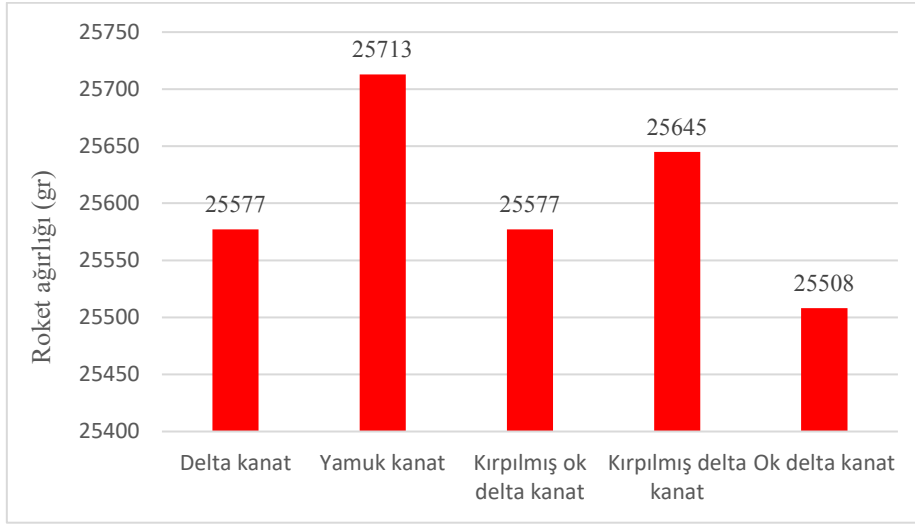
Şekil 7. Roketlerin hızındaki değişimler

Yine model rokette en yüksek hıza ok delta kanat modelinde ulaşılmıştır. Minimum hız değerine ise yamuk kanat modelinde ulaşılmıştır. Bu durumun kanat hacminin artması ile roket ağırlığındaki artıştan kaynaklandığı düşünülmektedir (Şekil 7).



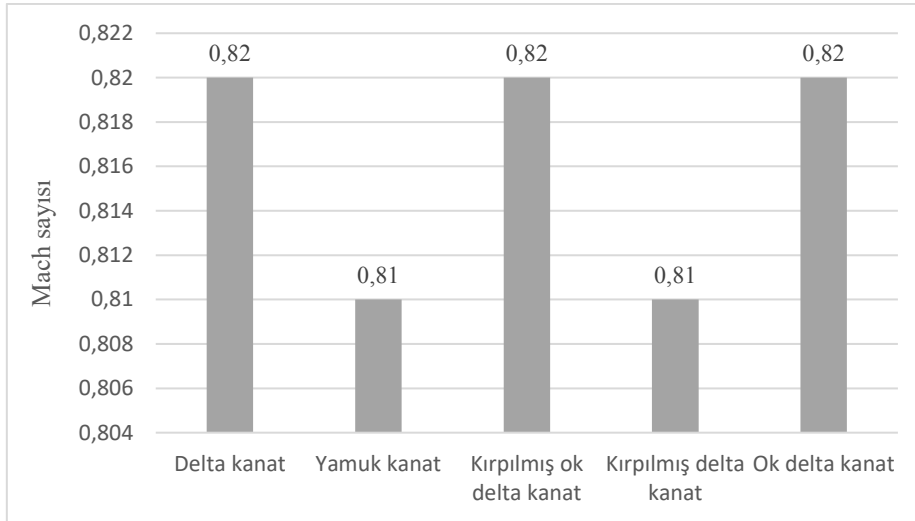
Şekil 8. Roketlerin ivmesindeki değişimler

Roket modellerinde maksimum irtifa ve maksimum hız değerlerinde olduğu gibi en yüksek ivme değeri de yine ok delta kanat modelinde görülmüştür. Bu sonuçlara göre roketin irtifa, hız ve ivme değerlerinin doğru orantılı olarak değiştiği görülmüştür (Şekil 8) [2,11,13,28,29].



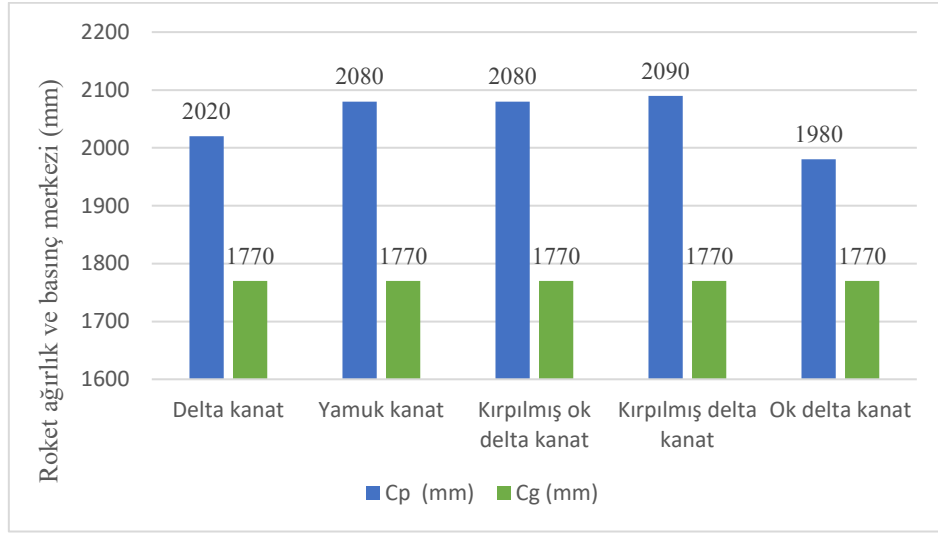
Şekil 9. Roketlerin ağırlığındaki değişimler

Roket ağırlığı, roket uçuş verilerinden alınan bütün sonuçları doğrudan etkilemektedir. Literatürde, kanat yapılarındaki değişiklikler ile çıkılabilen irtifa, hız, ivme, stabilite ve roket ağırlığı sonuçlarında önemli değişimler meydana geldiği ifade edilmektedir [13,28]. Nitekim bu çalışmada da aynı komponentlere sahip, sadece kanat yapıları farklı olan roket modelleri içerisinde en iyi uçuş verileri en düşük ağırlığa sahip olan ok delta kanatlı modelde görülmüştür. Delta kanat ve kırpılmış ok delta kanat modelinde ise roketin toplam ağırlıklarının eşit olmasına karşın uçuş analizlerinde aynı sonuçlar elde edilmemiştir. Bu durumun da kanat geometrilerindeki farklılıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir [2,6,11,13,28,29].



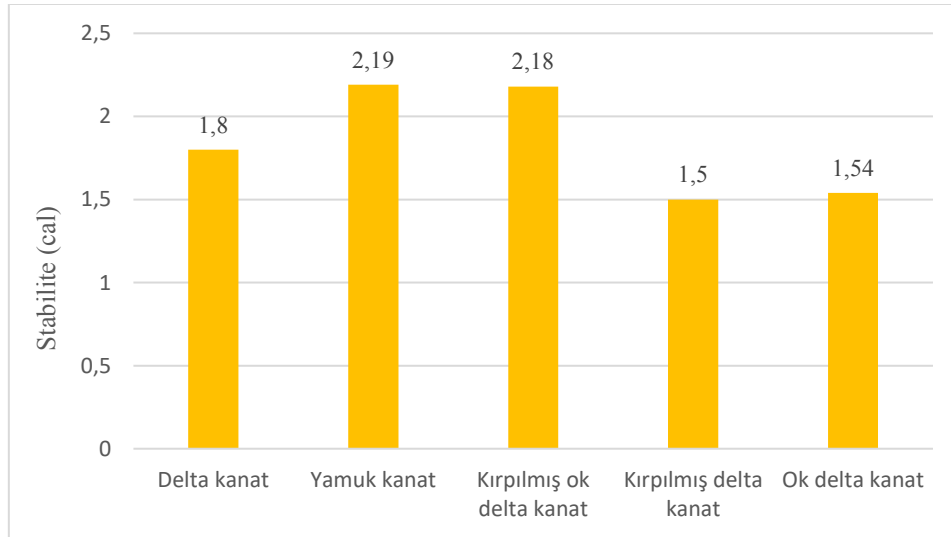
Şekil 10. Roketlerin Mach sayısındaki değişimleri

Literatürlerde ses altı hızlarda uçuş yapacak olan bir roket için Mach sayısının 0.8'den büyük, transonik uçuşlarda 0.8-1.2 aralığında, süpersonik hızlarda 1.2-5 aralığında ve hipersonik hızlarda ise 5-10 aralığında olması gerektiği ifade edilmiştir [23,31,34]. Bu çalışmada da, uçuş performansı incelenen model roketlerde ulaşılan Mach sayısının 0,80'den büyük olduğu ve roketin ses altı ve transonik hızlarda uçuşa uygun olduğu görülmüştür (Şekil 10).



Şekil 11. Roketlerin ağırlık ve basınç merkezindeki değişimler

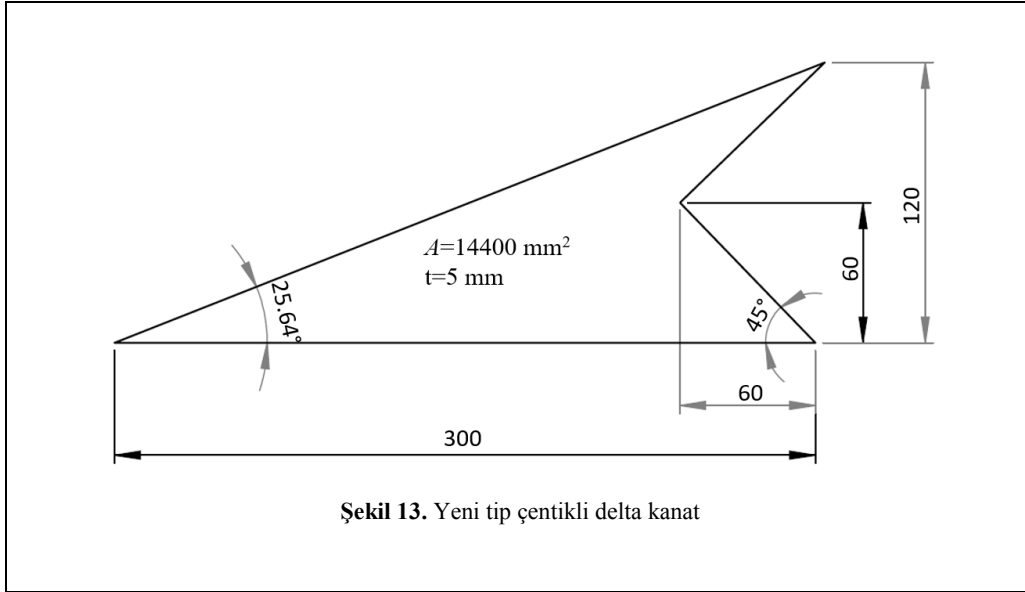
Roket stabilitesinin kararlı olması için basınç merkezi ile ağırlık merkezinin arasında en az gövde çapı kadar mesafe olmalıdır. Basınç merkezi ile ağırlık merkezi birbirlerine çok yakınsa, roket dinamik olarak yetersiz sönümlenebilir [32]. Aynı şekilde basınç merkezi ile ağırlık merkezi arasındaki mesafe çok uzaksa, roket aşırı kararlı hale gelir ve bu da roketin düşmesine neden olabilir [23]. Roketin kararlı bir uçuş yapabilmesi için basınç merkezinin (C_p), ağırlık merkezinin (C_g) gerisinde bulunması gerekmektedir [2,29,30,33]. Bu Literatür bilgileri dikkate alındığında, burada tasarlanan bütün model roketlerin kararlı bir uçuş yapılabilecekleri görülmektedir. Bu roketler içerisinde ise basınç merkezi ile ağırlık merkezi arasındaki farkın en az olduğu ve en iyi kararlı uçuşun ok delta kanatlı model rokette elde edildiği görülmüştür (Şekil 11).

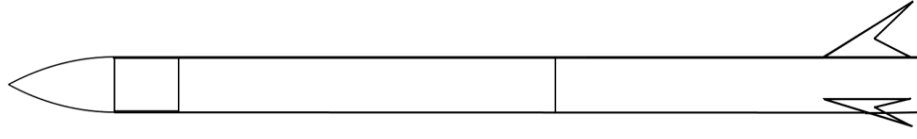


Şekil 12. Roketlerin stabilitesindeki değişimler

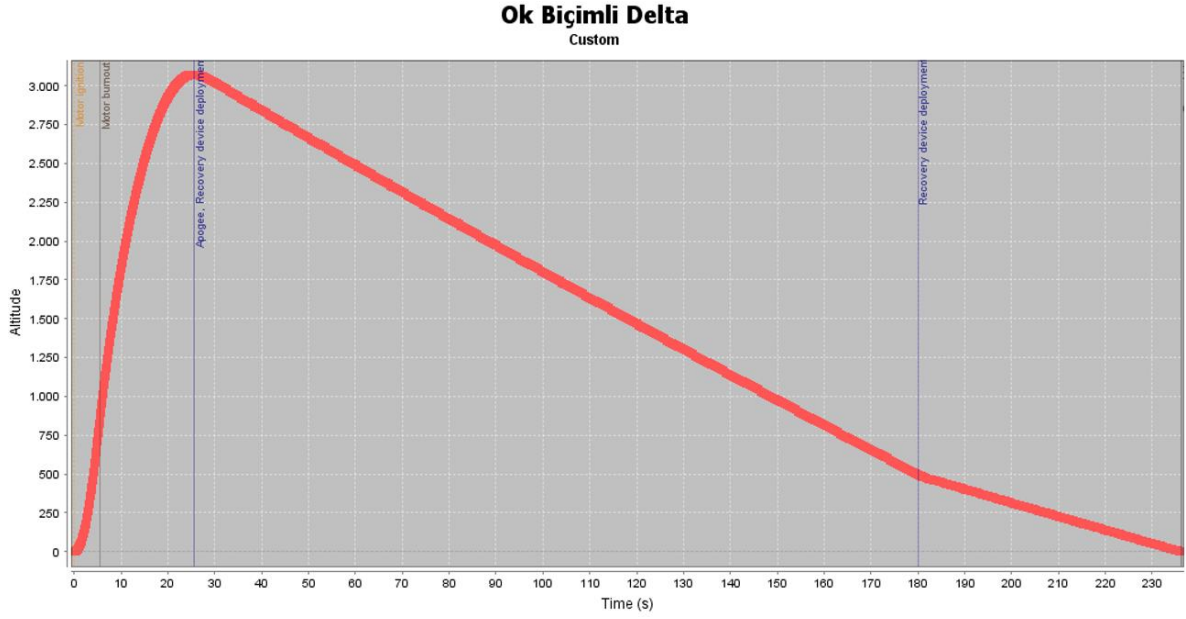
Roket stabilitesi uçuşun ve roketin seyir halinde kararlı bir şekilde yörüngesinde gidebilmesi için en önemli parametrelerden birisidir [2,5,11,25,29]. Bu çalışmada yapılan kanat tasarımlarında en iyi stabilite değeri kırpılmış delta kanat ve ok delta kanat modellerinde elde edilmiştir (Şekil 12). Yukarıda verilen bütün grafikler incelendiğinde en iyi roket performansının ok delta kanatlı model rokette elde edildiği görülmüştür (Şekil 6-12). Bu grafiklerde genel olarak kanat ağırlıklarının azalması ile roket performansını önemli derecede iyileştirdiği görülmektedir (Şekil 6-12).

Bu çalışmada, kanat modelleri içerisinde en verimli sonuçları veren ok delta kanat modeli referans alındı (Şekil 3c). Bu kanat modelinin en iyi uçuş performansını oluşturmasının nedeni, firar kenarının delta kanattaki gibi taban kenarıyla 90° lik açı ile değil $112,62^{\circ}$ lik açı ile birleşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Yine kırılmış delta kanat ile kırılmış ok delta kanat modellerinin uçuş verileri incelendiğinde de en iyi performansı kırılmış ok delta kanat modelinin verdiği görülmektedir (Şekil 3d, e ve Şekil 6-12). Bu kanat modelinde de firar kenarının taban kenarıyla 90° lik açı yapmadığı görülmektedir [2,6,11,13,28,29]. Çalışmada, tüm bu durumlar dikkate alınarak delta kanadın firar kenarında (Şekil 4b) boşluk oluşturarak yeni tip bir kanat tasarımı yapıldı ve bu kanada da çentikli delta kanat modeli ismi verildi (Şekil 13). Bu yeni tip kanat, model roket üzerine monte edilerek roketin uçuş performansının analizleri yapıldı ve sonuçları aşağıda grafikler halinde verildi (Şekil 14).

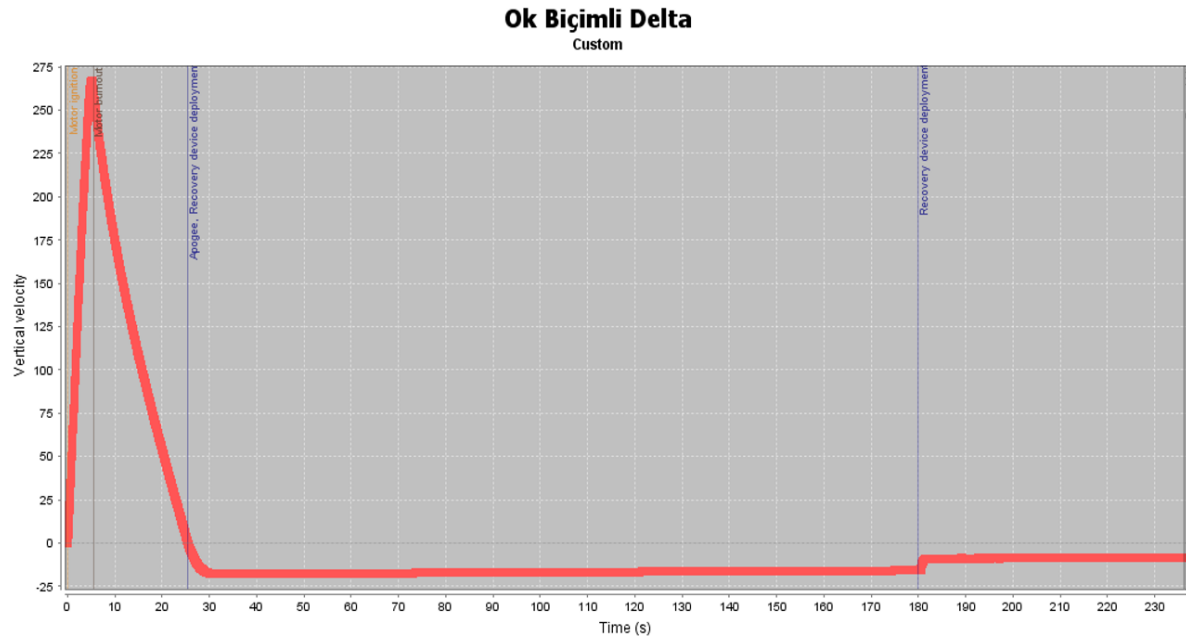




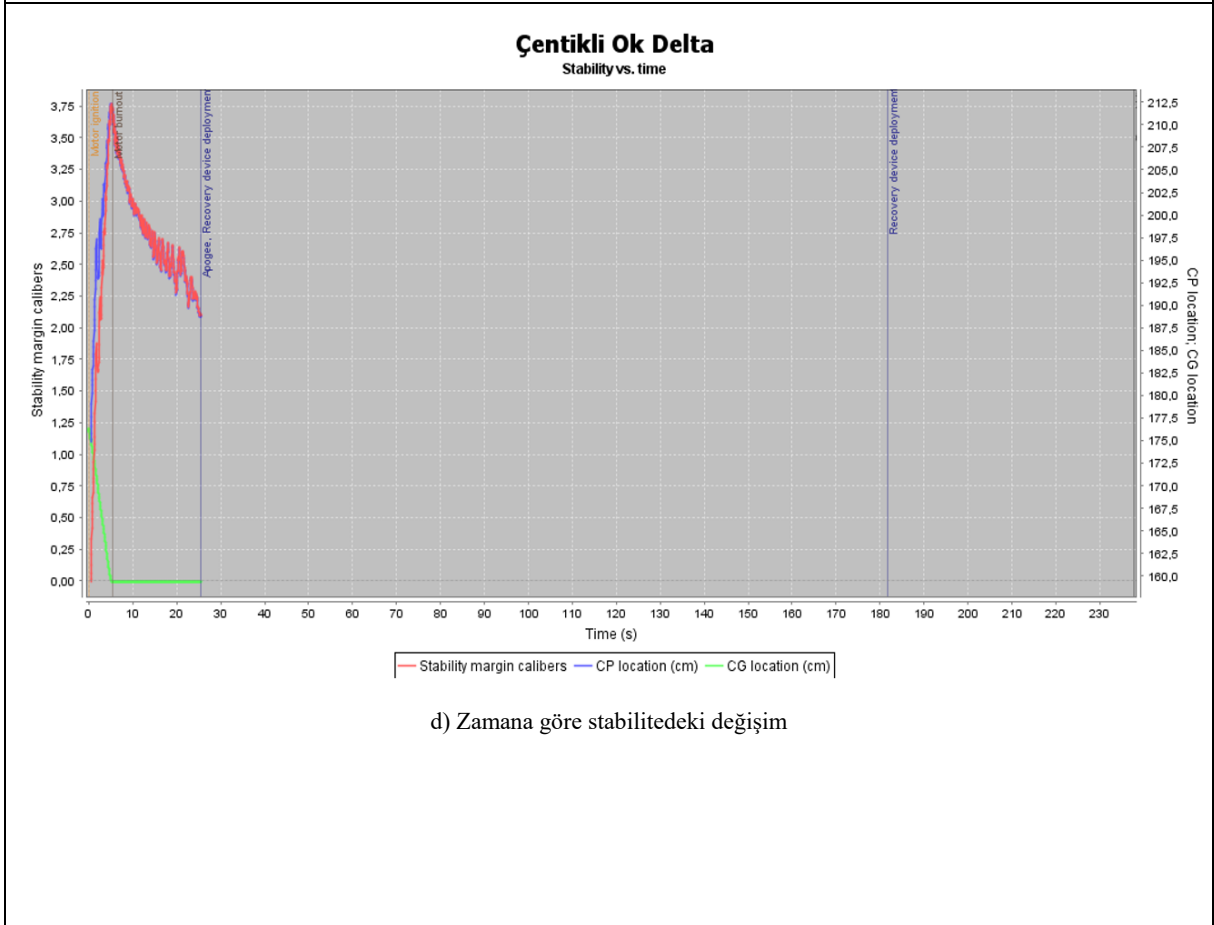
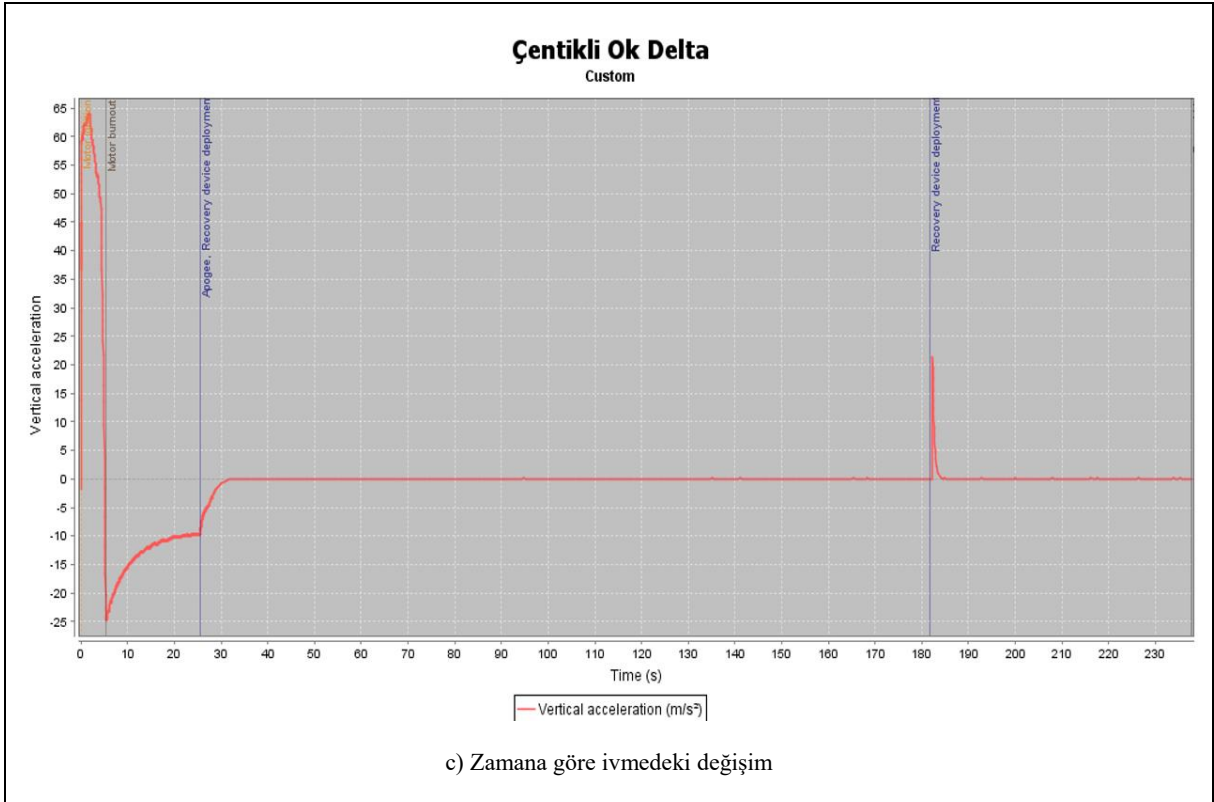
Şekil 14. Çentikli delta kanatlı model roket ve analiz sonuçları

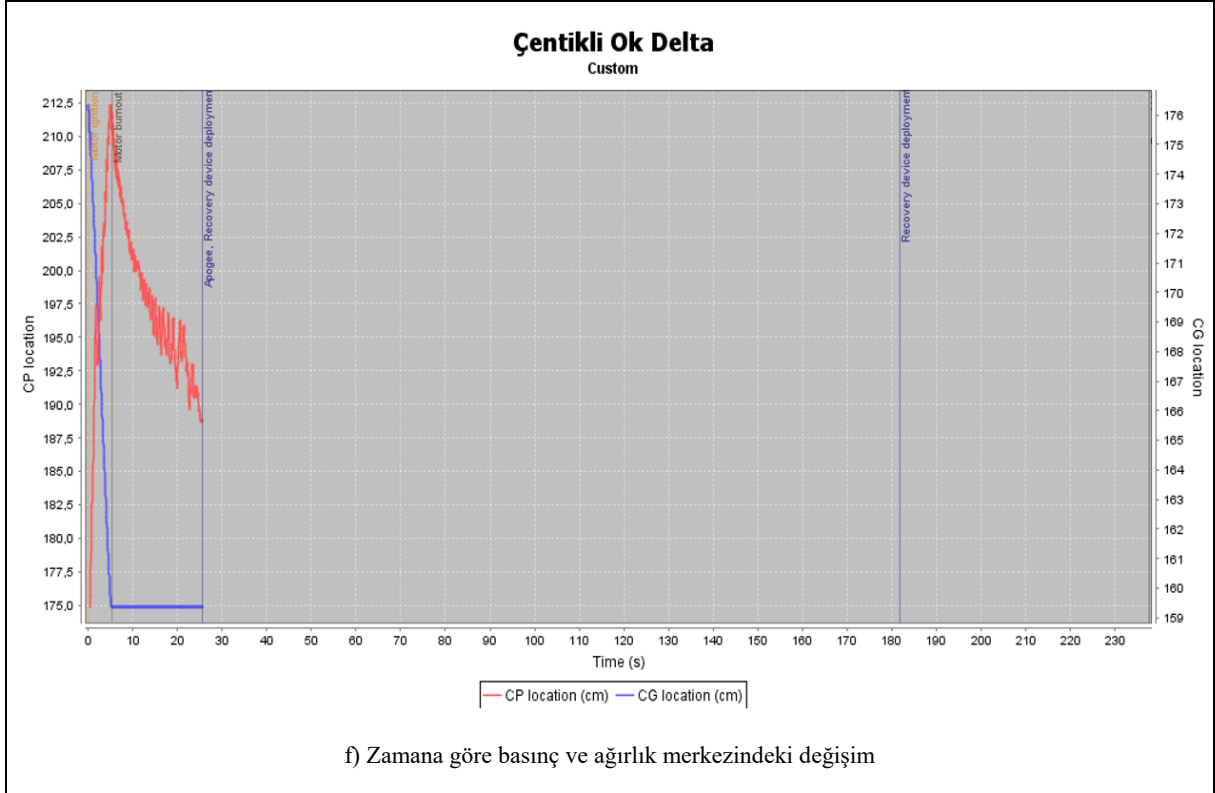
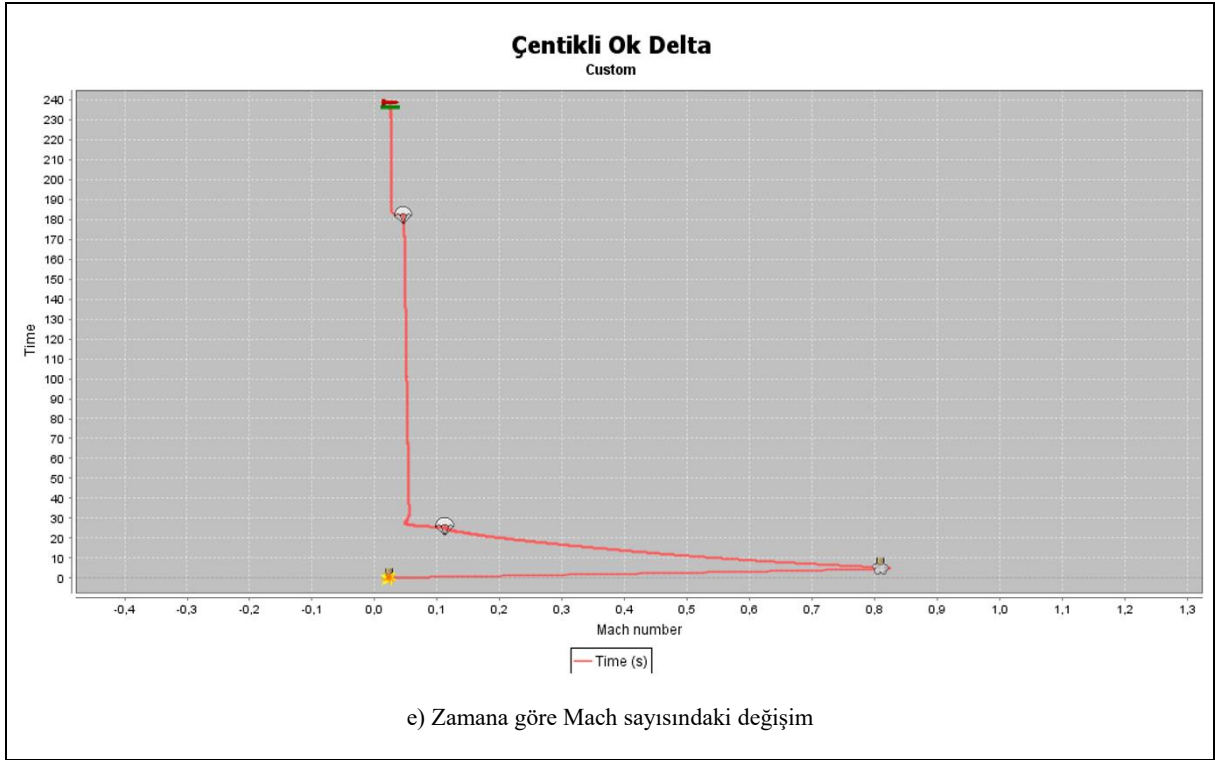


a) Zamana göre irtifadaki değişim

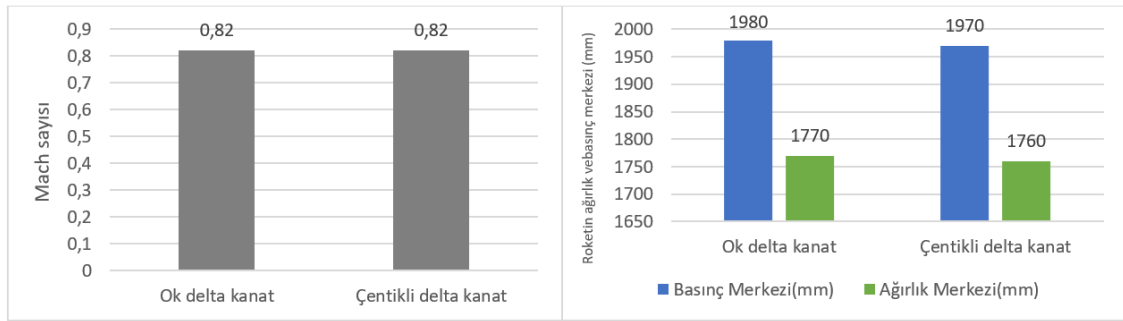
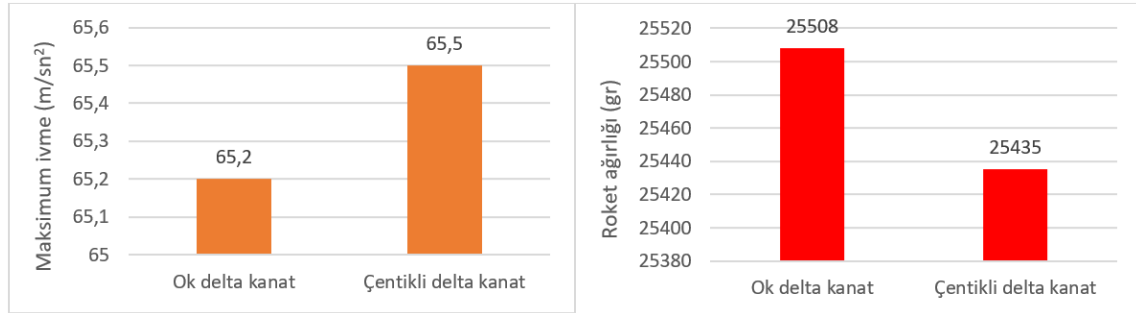
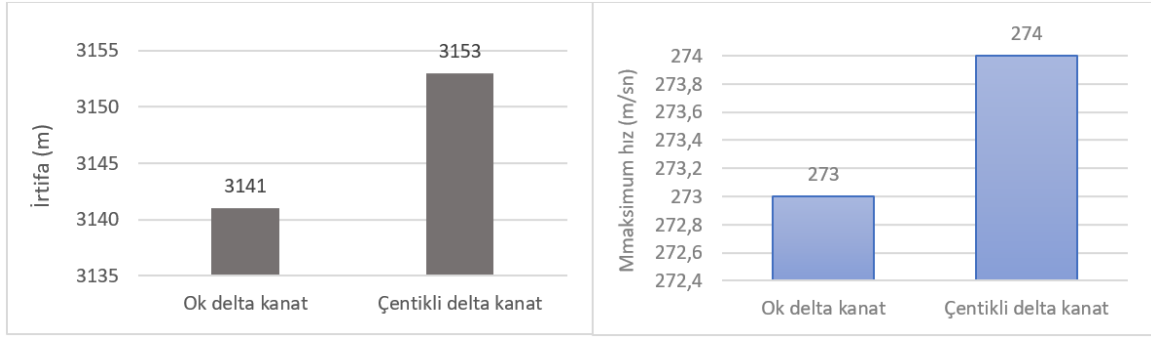


b) Zamana göre hızdaki değişim



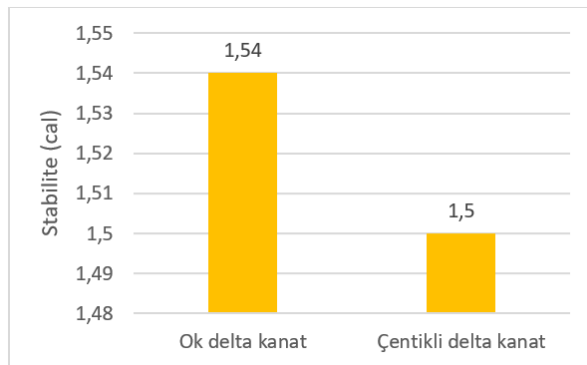


Yeni tip çentikli delta kanatlı model roketin uçuş verileri ile ok delta kanatlı model roketin uçuş verilerini daha iyi karşılaştırmak için aşağıdaki çubuk diyagramlar oluşturuldu (Şekil 15).



e) Mach sayısı

f) Ağırlık ve basınç merkezi



g) Roket stabilitesi

Şekil 15. Yeni tip çentikli delta kanat ile ok delta kanadın uçuş performans dataları

Bu analiz sonuçlarına göre en iyi performansı yeni tip çentikli delta kanat modelinin gösterdiği görülmektedir (Şekil 15 a-g). Yine yukarıdaki bölümlerde de bahsedildiği gibi firar kenarının çentikli yapılmak suretiyle kanat ağırlığı, kanat yüzey alanı ve firar kenarının taban kenarıyla yapmış olduğu açıdan dolayı uçuş performansını artırdığı düşünülmektedir. Nitekim bu parametrelerin uçuş performansı üzerinde etkili olduğu literatürlerle de desteklenmektedir [2,6,11,13,28,29].

4. Sonuçlar

Yapılan bu çalışmada, OpenRocket programında uygulamada kullanılmış olan kanat modellerinin model bir roket üzerinde uçuş analizleri yapılmıştır. Bu analiz sonuçları dikkate alınarak yeni tip çentikli delta kanat modeli tasarlanmıştır. Bu yeni tip kanadın uçuş analizleri yapılmış ve bu kanadın model roketin uçuş performansını çok daha artırdığı görülmüştür. Bu performans üzerinde ise kanadın firar kenarının geometrisinin etkili olduğu görülmüştür. Bu kanat modelinin diğer kanat modellerine göre çok daha hafif olması sebebiyle, roketin çok daha iyi bir şekilde uçuş görevlerini tamamlayabileceği ve maliyetlerinin de azalacağı düşünülmektedir.

Kaynaklar

- [1] Barbosa, A. N., Guimarães, L. N. F., Multidisciplinary design optimization of sounding rocket fins shape using a tool called mdo-sonda, *Journal of Aerospace Technology and Management*, 4, 431-442, 2012.
- [2] Priyadarshi, P., Alam, M., Saroha, K., Multi-disciplinary multi-objective design optimization of sounding rocket fins, *International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics*, 6(3), 166-182, 2014.
- [3] Vidanović, N., Rašuo, B., Kastratović, G., Grbović, A., Puharić, M., & Maksimović, K. Multidisciplinary shape optimization of missile fin configuration subject to aerodynamic heating. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 57(3), 510-527, 2020.
- [4] Khalil, M., Abdalla, H., & Kamal, O. Trajectory prediction for a typical fin stabilized artillery rocket. In *International Conference on Aerospace Sciences and Aviation Technology* (Vol. 13, No. Aerospace Sciences & Aviation Technology, ASAT-13, May 26–28, , pp. 1-14, 2009.
- [5] Azevedo, F. S., Knowing the stability of model rockets: A study of learning in interest-based practices, *Cognition and Instruction*, 31(3), 345-374. 2013.
- [6] Shah, S., Tanwani, N., Singh, S. K. Drag analysis for sounding rocket nose cone, *Int. Res. J. Eng. Technol.(IRJET)*, 7(07), 2020.
- [7] S. Niskanen, Development of an Open Source model rocket simulation software, MSc. Dissertation, Helsinki University of Technology, Faculty of Information and Natural Sciences, 2009.
- [8] Campbell, T. A., Seufert, S. T., Reis, R. C., Brewer, J. C., Limberger Tomiozzo, R., Whelan, C. E., Okutsu, M. Model rocket projects for aerospace engineering course: Simulation of flight trajectories. In *54th AIAA Aerospace Sciences Meeting* (p. 1577). 2016.
- [9] Brewer, J. C., Reis, R. C., Limberger Tomiozzo, R., Okutsu, M., Model Rocket Projects for Aerospace Engineering Course: Propellant Analyses. In *54th AIAA Aerospace Sciences Meeting* (p. 1578), 2016.
- [10] Tola, C., Nikbay, M., Investigation of the effect of thickness, taper ratio and aspect ratio on fin flutter velocity of a model rocket using response surface method. In *2015 7th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)* (pp. 27-32). IEEE, 2015.
- [11] Pektaş, A., Demircan, Z., Hacıabdulloğlu, Ü., Ejder, N., Tola, C. , Effects of Different Fin Shapes on Apogee and Stability of Model Rockets. In *2019 9th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)* (pp. 193-199). IEEE, 2019.
- [12] Rohini, D., Sasikumar, C., Samiyappan, P., Dakshinamurthy, B., Koppula, N. ,Design & analysis of solid rocket using open rocket software. *Materials Today: Proceedings*, 2022.
- [13] Baloda, Y., Jaiswal, A., He, X., Datye, A., Theoretical and Experimental Performance Evaluation of Shark-Caved, Sounder, and Trapezoidal Fins. *2020 NCUR Proceedings*. 2020.
- [14] Bošković, D. M., & Krstić, M.. Stabilization of a solid propellant rocket instability by state feedback. *International Journal of Robust and Nonlinear Control: IFAC-Affiliated Journal*, 13(5), 483-495, 2003.

- [15] Gregorek, G. M. Aerodynamic drag of model rockets. Estes Industries, Penrose, CO, 2-51,1970.
- [16] Bar-Haim, B., Seginer, A., Aerodynamics of wraparound fins. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 20(4), 339-345. 1983.
- [17] LaBudde, E. V. A design procedure for maximizing altitude performance. Research and Development Project. NARAM, 1999.
- [18] Madden, R. B., A Statistical Analysis of the Roll Rate of a Launch Vehicle under the Influence of Random Fin Misalignments. *AIAA Journal*, 10(3), 324-325, 1972.
- [19] Richardson, E. H., Blackwood, J. M., Hays, M. J., Skinner, T., Solid rocket launch vehicle explosion environments. In JANNAF Conference (No. M15-4253). 2014.
- [20] Gomez, F. J., & Miikkulainen, R.. Active guidance for a finless rocket using neuroevolution. In Genetic and Evolutionary Computation Conference (pp. 2084-2095). Springer, Berlin, Heidelberg,2003.
- [21] Wertz, J. R., ed. and Larson, W. J., ed., *Launch Systems, Space Mission Analysis and Design*, 3rd ed., Microcosm Press, Hawthorne, CA, and Springer, New York, NY, pp. 719-744, 1999.
- [22] Benson, T., ed., “Rocket Stability,” NASA Glen Research Center [online], <https://spaceflightsystems.grc.nasa.gov/education/rocket/rktstab.html>. Yayın tarihi June 2014. Erişim tarihi Eylül 2, 2022.
- [23] Fraley, E. R., Design, Manufacturing, and Integration of Fins for 2017-2018 OSU ESRA 30k Rocket, 2018.
- [24] Hernandez, R. N., Singh, H., Messimer, S. L., Patterson, A. E., Design and performance of modular 3-D printed solid-propellant rocket airframes. *Aerospace*, 4(2), 17, 2017.
- [25] Rocketsschools. Rocket Stability.<http://www.rockets4schools.org/images/Basic.Rocket.Stability.pdf>.Erişim tarihi Eylül 1,2022
- [26] Nasa. Determining center of pressure-cp. On 14 Jan 03 Erişim tarihi Eylül 5, 2022. <https://www.grc.nasa.gov/WWW/k12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/rktcp.html>
- [27] Roketsan. Model roketçilik.https://www.roketsan.com.tr/uploads/docs/1628594512_20.03.2020model-roketcilik-master-dokumanv04.pdf.Yayın tarihi 20.03.2020.Erişim tarihi Eylül 3, 2022.
- [28] Datye, A. Effects of Shark Caved Fins on Altitude Performance of a High-Powered Rocket. 2019 NCUR, 2019.
- [29] Bar-Haim, B., Seginer, A. Aerodynamics of wraparound fins. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 20(4), 339-345. 1983.
- [30] Yarce, A., Rodríguez, J. S., Galvez, J., Gómez, A., García, M. J., Simple-1: Development stage of the data transmission system for a solid propellant mid-power rocket model. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 850, No. 1, p. 012019). IOP Publishing, 2017.
- [31] Neutrium. Mach Number, Neutrium, https://neutrium.net/fluid_flow/mach-number/ Yayın tarihi October 2014. Erişim tarihi Eylül 1, 2022.
- [32] Negahban, S., Design of a Model Rocket Flight Logging System and In-Air Deployable Rover, 2019.
- [33] Nakka, R., Fins for Rocket Stability, *Experimental Rocketry*, <https://www.nakkarocketry.net/fins.html>.Erişim tarihi Eylül 1,2022.
- [34] Zhang, G. Q., Ji, L. C., Xu, Y., Schlüter, J., Parametric study of different fins for a rocket at supersonic flow. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 229(18), 3392-3404, 2015.

Muharip Hava Aracı Otomatik İniş Koşusu İçin Güdüm Algoritmalarının Karşılaştırılması

Serdar AVŞAR^{1*}, Emir KUTLUAY²

¹Tasarım Mühendisi, Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş., Ankara, Türkiye

²Makina Mühendisliği, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye

*¹serdar.avsar@tai.com.tr, ²kutluay@hacettepe.edu.tr

(Geliş/Received:21/12/2022;

Kabul/Accepted:25/02/2023)

Öz: Bu çalışmada muharip bir hava aracının iniş koşusu esnasındaki yanal hareketini belirleyecek güdüm algoritmaları karşılaştırılmıştır. Muharip hava aracı ve yanal ivmeyi tutan iç döngü otopilot beraber birinci derece bir transfer fonksiyonu şeklinde modellenmiştir. Beş farklı güdüm algoritması teklif edilmiştir. Bu algoritmalar modifiye edilmiş orantılı havuç takip, vektör alanı güdüm, kayan kip güdüm, doğrusal kayan kip güdüm ve geometrik öngörülü güdüm algoritmalarıdır. Karşılaştırmalar yapıldıktan sonra literatürdeki bulgularla paralel olarak çizgi takibi açısından vektör alanı güdüm algoritmasının en başarılı olduğu, kontrol eforu açısından değerlendirildiğinde modifiye edilmiş orantılı havuç takip algoritmasının en başarılı olduğu, doğrusal kayan kip güdüm algoritmasının da bu ikisinin arasında sonuç verdiği görülmüştür. Kalan iki algoritmanın ise performanslarına göre çok fazla kontrol eforu gerektirdikleri için bu uygulama için uygun olmadıkları değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Otomatik iniş, güdüm algoritmaları, çizgi takibi, iniş koşusu, seyrüsefer algoritmaları

Comparison of Guidance Algorithms for Autolanding Rollout of a Fighter Aircraft

Abstract: In this work, guidance algorithms which will define the landing ground roll of an aircraft have been compared. The lateral dynamics of the aircraft and the inner feedback control loop which track the lateral acceleration have been modeled as a first order transfer function. Five different guidance algorithms have been proposed. These are; modified proportional carrot chase, vector field guidance, sliding mode guidance, linear sliding mode guidance and geometric predictive guidance. After the comparisons, parallel to the findings in literature vector field guidance algorithm has been found to be the best in terms of line following. If we rate in terms of control effort, modified proportional carrot chase algorithm has been found to be the best. Linear sliding mode guidance algorithm has a performance between these two algorithms in both criteria. The remaining algorithms has been found unpractical for this application since they require too much control effort and they have to be developed further for this application.

Key words: Autolanding, guidance algorithms, line tracking, landing rollout, navigation algorithms

1. Giriş

Bu çalışma kapsamında hava araçlarının otomatik iniş yer koşusu fazında kullanılmak üzere yanal güdüm algoritmaları karşılaştırılmıştır. Otomatik iniş koşusu esnasında bir çizgi takip edildiği için çizgi takip algoritmaları daha çok navigasyon adı altında geçmektedir. Bu navigasyon algoritmalarının bazıları [1] literatürde incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu algoritmalarından ilki havuç takip ("*Carrot chase*") algoritmasıdır. Bu algorithmada hava aracından belli bir mesafe ilerideki ve takip edilen patika üzerindeki bir nokta takip edilmektedir. Takip için orantılı güdüm kanunu kullanılmaktadır. İncelenen diğer algoritma ise doğrusal olmayan güdüm kanunu ismiyle geçmektedir [2]. Bu algorithmada da yine çizgi üzerindeki ve belli bir mesafe ilerideki bir nokta takip edilmekle birlikte güdüm kanunu olarak Denklem 1 kullanılmaktadır.

$$a_{y_{ref}} = 2 \frac{V^2}{L_1} \sin \eta \quad (1)$$

Burada $a_{y_{ref}}$ referans ivme, V sürat, L_1 takip edilen noktayla uçak arasındaki mesafe, η ise takip edilen nokta ve uçak üzerinden geçen belli yarıçaplı bir çember yayının açısını vermektedir. Sousa ve arkadaşları [1] tarafından incelenen diğer bir algoritma ise katıksız kovalama ve görüş çizgisi esaslı ("*Pure pursuit and LOS based*")

* Sorumlu yazar: serdar.avsar@hacettepe.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹0000-0002-4502-5354, ²0000-0002-4541-1546

algoritmadır. Bu algoritmada patika üzerinde belirlenmiş yol noktaları (“waypoints”) bulunmaktadır. Bu yol noktaları yakından uzağa W_i ve W_{i+1} şeklinde isimlendirilmektedir. W_i noktası katıksız kovalama algoritması tarafından takip edilirken görüş çizgisi algoritması ise W_i ve W_{i+1} arasındaki çizginin açısıyla hava aracı ve W_i arasındaki çizginin açısını eşitlemeye çalışmaktadır. İncelenen dördüncü algoritma ise vektör alanı algoritmasıdır. Bu algoritmada önceden belirlenmiş vektör alanı hava aracı tarafından takip edilmektedir. Vektör alanındaki vektörlerle aradaki açıyı düzeltmek için çoğunlukla orantılı bir güdüm kanunu kullanılmaktadır. Buradaki önemli nokta bu vektör alanlarının belirlenmesidir. Vektör alanının iki bölümü bulunmaktadır. Uzaktaki bölümde patikaya doğru sabit bir rota açısıyla gelinecek şekilde bir vektör alanı vardır. Yakın kısımda ise bu sabit rota açısıyla çizgi üzerindeki çizgiye paralel rota açısı arasında geçişi sağlayacak şekilde vektörler ayarlanmaktadır. Bu ayarlama için Denklem 2’deki formül kullanılan formüllerden biridir [3].

$$\chi^d(y) = -\chi^\infty \frac{2}{\pi} \tan^{-1}(ky) \quad (2)$$

Burada $\chi^d(y)$ vektör alanındaki vektörlerin rota açısını ve χ^∞ uzak bölgedeki vektörlerin rota açısını ifade etmektedir. Sousa ve arkadaşları [1] tarafından incelenen beşinci algoritma ise doğrusal kuadratik regülatör algoritmasıdır [4]. Optimum güdüm kanunu olarak Denklem 3’teki ifade bulunmuştur.

$$u = \left[\sqrt{\left| \frac{d_b}{d_b-d} \right|} d + \sqrt{2 \sqrt{\left| \frac{d_b}{d_b-d} \right|} + 1} v_d \right] \quad (3)$$

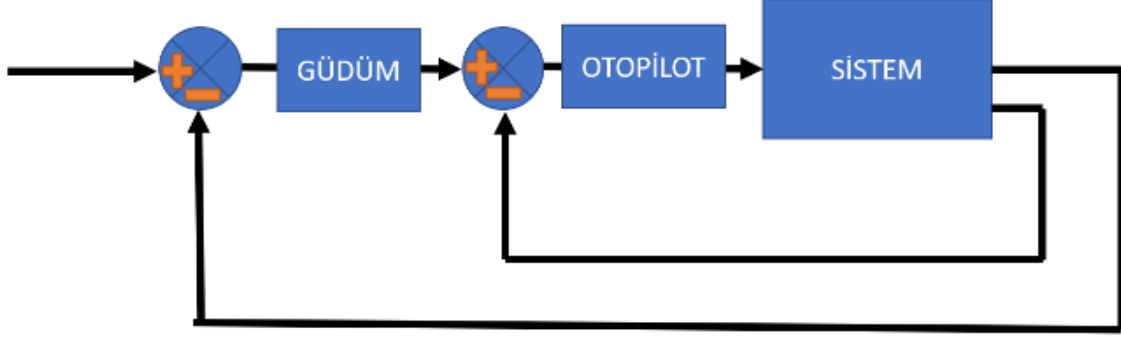
Burada uçağın patikadan uzaklığı d , izin verilen uzaklığı ise d_b olarak isimlendirilmiştir. Patikadan uzaklaşma hızı ise v_d olarak isimlendirilmiştir. Referans ivme ise u olarak isimlendirilmiştir. Karşılaştırma sonucunda patika takibi açısından en başarılı algoritmanın vektör alanı olduğu ancak fazla kontrol eforu gerektirdiği sonucuna varılmıştır.

Literatür genellikle vektör alanı navigasyon algoritmalarına yoğunlaşmıştır. Burada daha önce de söylendiği gibi önemli olan bu vektör alanının nasıl oluşturulduğudur. Literatürde vektör alanının bulunması için kayan kip kontrol kanunu kullanılmıştır [3]. Kayan manifold denkleminde ise $\text{sign}(x)$ fonksiyonu yerine $\text{sat}(x)$ fonksiyonu kullanılmış ve bu fonksiyon x ’in mutlak değeri 1’den küçükken x ’e eşit, diğer durumda $\text{sign}(x)$ ’e eşit olacak şekilde tanımlanmıştır. Bu şekilde gürültünün (“chattering”) önüne geçilmiş ve kontrol eforu azaltılmıştır. Bir başka çalışmada ise bu vektör alanının yakın kısmının oluşturulması amacıyla dört farklı yöntem teklif edilmiştir [5]. Bunlardan üçü iki boyuta uygun bir tanesi de üç boyuta uygun küresel doğrusal interpolasyon (“Spherical linear interpolation, SLERP”) içeren bir fonksiyondur.

Bu çalışma kapsamında beş farklı yöntem seçilmiş ve bunların karşılaştırılması yapılmıştır. Bunlardan ilki [1] tarafından da incelenen havuç takip algoritmasıdır. Bu algoritmanın aslında Δx mesafe ilerideki bir nokta takip edilmektedir. Bu çalışmada ise bu modifiye edilerek $\Delta x + \Delta t$ şekline getirilmiştir. Bunun sebebi ise iniş koşusu sırasında hızın çok değişken olması ve sadece Δx ilerideki bir nokta kullanılarak başarılı bir takibin yapılamamasıdır. Bir diğer incelenecek algoritma ise vektör alanı güdüm algoritmasıdır. Yakın alandaki vektörlerin oluşturulması için basit olması açısından doğrusal bir şekilde açısı değişen vektörler kullanılmıştır. Üçüncü algoritma ise kayan kip güdüm algoritmasıdır. Burada doğrusal olmayan ve $\text{sign}(x)$ içeren bir fonksiyon kullanılmış ve bu şekilde kısıtlı zamanda kayan manifoldun takip edilmesi garanti edilmiştir. Dördüncü algoritma ise doğrusal kayan kip güdüm algoritmasıdır. Burada $\text{sign}(x)$ yerine [3] tarafından da kullanılan $\text{sat}(x)$ fonksiyonu kullanılmıştır. Bu şekilde kısıtlı zamanda kayan manifoldun takibi garanti edilmemekle birlikte algoritma doğrusal olmakta ve takırtıya neden olmamaktadır. İncelenen beşinci algoritma ise geometrik öngörülü güdüm algoritmasıdır. Literatürde benzeri bulunamayan bu güdüm kanunu uçağın gidiş yönüne ve takip edilen çizgiye teğet olarak çizilen iki adet çember kullanılarak uçağın gelecek rotasının basit bir şekilde öngörülmesini sağlamaktadır.

2. Hava Aracı ve İç Döngünün Modellenmesi

Uçağın yanal dinamiğini oluşturan uçak dinamiği ve iç kontrol döngüsü birinci dereceden bir transfer fonksiyonu şeklinde modellenmiştir (Şekil 1). Bu birinci dereceden transfer fonksiyonunun periyodu 0.4s olarak belirlenmiştir. Bu transfer fonksiyonuna benzer şekilde uçağın yanal ivme komutlarını takip edeceği varsayılmıştır.



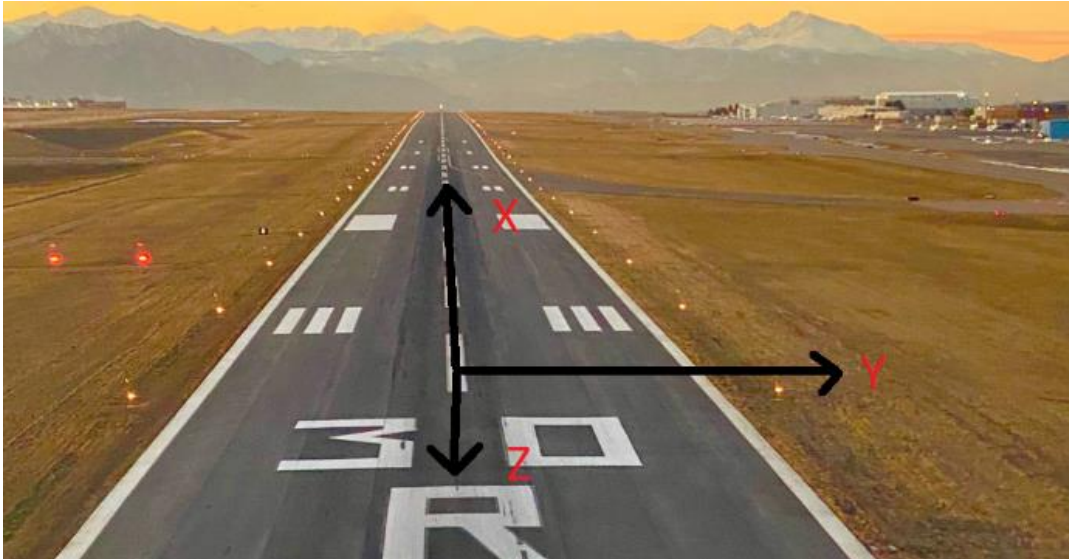
Şekil 1. Dış döngü ve iç döngü

3. Güdüm Algoritmaları

Güdüm algoritmalarını tanıtmadan önce hesaplamada kullanılan koordinat sistemi tanıtılmalıdır.

3.1 Pist Koordinat Sistemi

Uçağın tekerlek koyduğu nokta orijin olarak kabul edilmiştir. Uçağın iniş yaptığı pist yönü x eksenini, aşağı yön z eksenini ve x eksenini z eksenini yönünde 90 derece döndüğü zaman y eksenini olmaktadır (Şekil 2). Bu eksen takımı havacılıkta sıklıkla kullanılan NED eksen takımındaki x ekseninin uçağın iniş yaptığı pist yönüne çevrilmesi şeklinde oluşturulmaktadır.



Şekil 2. Pist koordinat sistemi [6]

3.2 Güdüm Algoritması Başarı Kriteri

Algoritma seçimi yapılmadan önce başarı kriteri belirlenmelidir. İniş esnasında uçaktan beklenen mümkün olduğunca az manevra yaparak düz bir şekilde giderek pist içerisinde kalmasıdır ve eğer mümkünse pisti ortalaması da ekstradan bir artı olarak değerlendirilebilir ancak şart değildir. Önemli olan güvenli bir şekilde pist içerisinde kalmasıdır. Güdüm algoritmalarında referans ivmenin büyüklüğü 1 m/s^2 ile sınırlandırılacaktır. Bu şekilde uçağın sert manevralar yapmasının önüne geçilecektir.

Bütün algoritmalar için orta hat hatasının integrali ve yanal ivmenin integrali alınarak hata ve kontrol eforları hesaplanacak ve karşılaştırılacaktır. Hatanın ve kontrol eforunun ikisinin de düşük olması beklenmektedir.

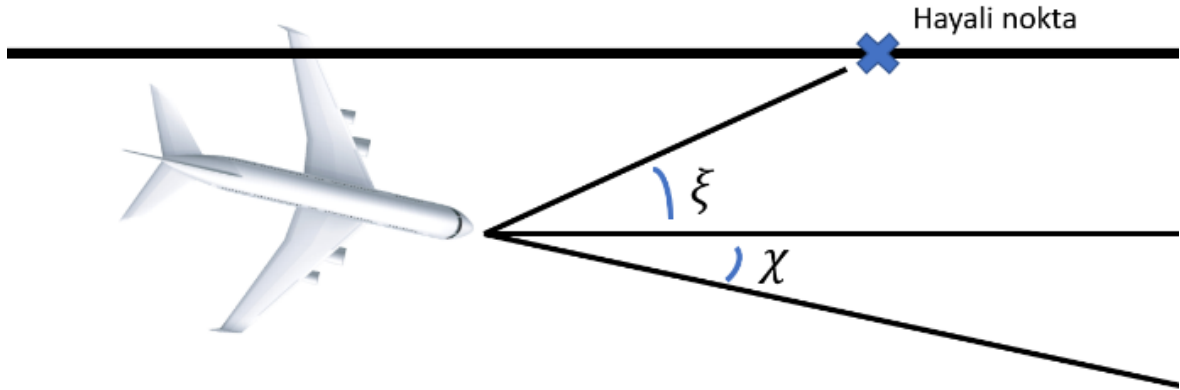
3.3 Modifiye Edilmiş Orantılı Havuç Takip Algoritması

Orantılı güdüme (Denklemler 4) bir nokta takip edilmektedir.

$$a_n = N\lambda V \quad (4)$$

Eşitlikteki a_n ivme komutunu, N orantı katsayısını, λ araç ve hedef arasındaki görüş çizgisi açısının değişimini, V araç ve hedef arasındaki bağıl hızın büyüklüğünü göstermektedir.

Burada yapılması gereken çizgi üzerinde hayali bir hedef belirlemektir. Bu çalışmada teklif edilen bu hayali hedef ise uçağın x konumundan $\Delta x + V\Delta t$ ileride ve çizgi üzerinde olan hayali bir hareketli noktadır (Şekil 3). Burada V uçağın yere göre sürati olarak alınmıştır.



Şekil 3. Modifiye edilmiş orantılı güdüme algoritması

Burada tanımlanması gereken iki adet açı vardır. Bunlardan χ uçağın hız vektörünün pist eksenine göre açısıdır. ξ ise hayali hedef noktasının uçağa göre pist eksenindeki açısıdır (Şekil 3). Bu açıların toplamı uçağın hız vektörünün hayali hedef noktasıyla yaptığı açıyı göstermektedir. χ ile X ve Y pozisyonları arasındaki ilişki Denklem 5 ve 6'da gösterilmiştir. χ ile yanal ivme a_y arasındaki ilişki Denklem 7'de gösterilmiştir.

$$\dot{X} = V \cos \chi \quad (5)$$

$$\dot{Y} = V \sin \chi \quad (6)$$

$$\dot{\chi} = a_y / V \quad (7)$$

ξ açısının hız ve pozisyonla ilişkisi Denklem 8 ve 9'da gösterilmiştir. Eşitlik 8'in zamana göre türevi alınarak Denklem 9 elde edilmiştir.

$$\xi = -\tan^{-1}\left(\frac{Y}{V\Delta t + \Delta x}\right) \quad (8)$$

$$\dot{\xi} = -\left(\frac{1}{1+\left(\frac{Y}{V\Delta t + \Delta x}\right)^2}\right)\frac{\dot{Y}(V\Delta t + \Delta x) - Y\dot{V}\Delta t}{(V\Delta t + \Delta x)^2} \quad (9)$$

a_y ile $a_{y_{ref}}$ arasındaki ilişki Denklem 10'da verilmiştir.

$$\dot{a}_y = (a_{y_{ref}} - a_y)\frac{1}{T_{a_y}} \quad (10)$$

Güdümlü kanunu Denklem 11'de verilmiştir.

$$a_{y_{ref}} = N(\dot{\xi} - \dot{\chi})V \quad (11)$$

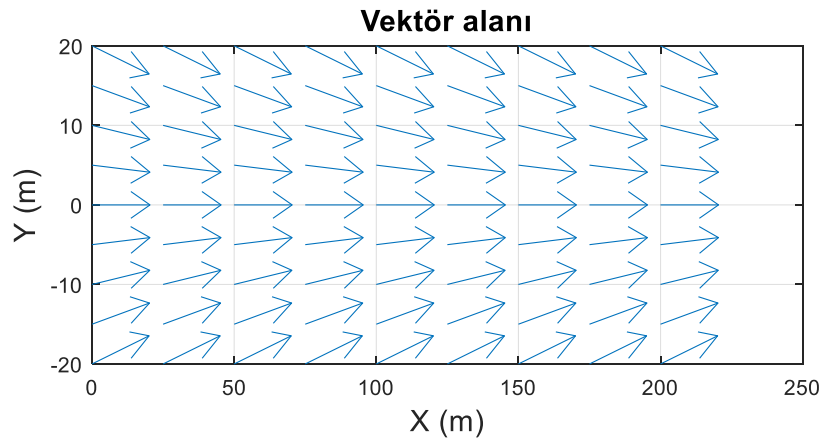
Hava aracının sabit -4 m/s^2 ivme ile yavaşladığı varsayılmıştır. Modellemede kullanılan durumlar Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Modifiye Edilmiş Orantılı Güdümlü Algoritması Simülasyon Durumları

Durum Simgesi	Durum Adı
X	X pozisyonu
Y	Y pozisyonu
V	Hava aracı yere göre sürati
χ	Hava aracı rota açısı
a_y	Hava aracı yanal ivmesi

3.4 Vektör Alanı Güdümlü Algoritması

Bu güdümlü algoritmasında önceden belirlenmiş bir vektör alanı vardır. Bu çalışmada kullanılan vektör alanı Şekil 4'te gösterilmiştir. Vektör alanında farklı Y konumuna bağlı olarak uçağın takip etmesi istenen χ açısı gösterilmiştir. Bu alan doğrusal olarak Y konumuyla orantılı olarak değişecek şekilde belirlenmiştir.



Şekil 4. Pist üzerindeki vektör alanları

Denklem 5, 6, 7 ve 10 bu algoritmada da geçerlidir. Güdümlü kanunu Denklem 12'de verilmiştir. Referans χ değerinin takip edilmesi için orantılı güdümlü kanunundan yararlanılmıştır. Süratteki değişime göre bir ayarlama

yapılması için V_{ref} adında yeni bir terim eklenmiştir. Orantılı güdüm belirlenmiş bir referans hıza göre ayarlanıp diğer hızlara göre düzenlenmektedir. Sıfıra yakın hızlarda sorun yaşanmaması amacıyla 10 m/s altındaki hızlarda 10 m/s'ye göre ayarlama yapılmaktadır.

$$a_{y_{ref}} = N(\chi_{ref} - \chi) \frac{V_{ref}}{\max([V, 10])} \quad (12)$$

3.5 Kayan Kip GÜDÜM Algoritması

Bu algoritmada yanal pozisyon ve yanal hızın belli bir kayan manifoldu takip etmesi gerekmektedir. Bu manifoldun iki tarafı için algoritma farklı komutlar verecektir. Bu manifoldu ve komutları gösteren ilişkiler Denklem 13'te verilmiştir.

$$a_{y_{ref}} = \begin{cases} 1, & \dot{Y} \leq -0.1 \text{ sign } Y Y^2 \\ -1, & \dot{Y} > -0.1 \text{ sign } Y Y^2 \end{cases} \quad (13)$$

Bu algoritmanın simülasyonunda da 5, 6, 7 ve 10 numaralı denklemler geçerlidir.

3.6 Doğrusal Kayan Kip GÜDÜM Algoritması

Kayan kip güdüm algoritmasının doğrusal hale getirilmesi için manifold denkleminin doğrusal olması ve manifoldun iki tarafındaki geçişin de doğrusal bir şekilde yapılması gerekmektedir.

Doğrusal manifold denklemi Denklem 14'te verilmiştir. Kayan manifoldun zaman sabiti uçağın iç döngüsünden daha yavaş olacak şekilde mantıklı bir değer seçilmiştir.

$$\dot{Y} = -0.3Y \quad (14)$$

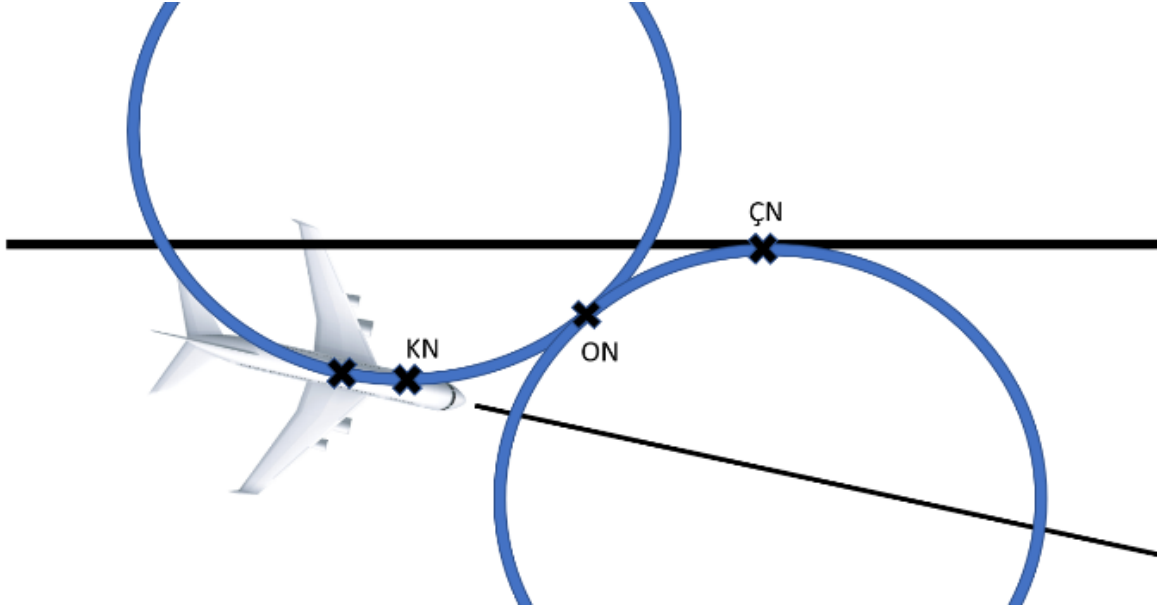
Manifoldun iki tarafındaki geçişin doğrusal olarak yapılabilmesi için güdüm kanunu Denklem 15'te verilmiştir.

$$a_{y_{ref}} = (\dot{Y} - (-0.3Y)) * (-3) \quad (15)$$

$a_{y_{ref}}$ değeri -1 ile 1 arasında kalacak şekilde sınırlandırılmaktadır. Bu iki değer arasındayken de Denklem 15'teki kanuna göre doğrusal bir şekilde değişmektedir.

3.7 Geometrik Öngörülü GÜDÜM

Bu algoritmada uçağın hız vektörüne göre maksimum yanal ivmeye göre çizilen iki adet minimum yarıçaptaki çembere göre geometrik bir çözüm yapıлып ona göre manevranın yönü belirlenir [7]. Bu çemberler ve bu çemberlerdeki kritik nokta (KN), orta nokta (ON), çizgi noktası (ÇN) noktaları Şekil 5'te verilmiştir. KN uçağın hız vektörünün orta hatla paralele hale geleceği yerdeki noktadır. ÇN orta hatta teğet çemberin geçtiği noktadır. ON ise iki çemberin teğet olduğu noktadır. Geometrik hesaplamalar sonucunda KN ve ON noktaları arasındaki ve ON ve ÇN noktaları arasındaki X ve Y yönündeki mesafelerin eşit olduğu bulunabilir. Yani ON noktasının Y koordinatı KN noktasının Y koordinatının yarısıdır. Bu geometrik bilgi sonraki hesaplamalarda kullanılmaktadır.



Şekil 5. Geometrik öngörülü güdüm

Şekil 5'teki noktaların koordinatlarının bulunması için öncelikle çember yarıçapı hesaplanmalıdır (Denklem 16). Bu eşitlikte a_y değeri 1 m/s^2 alınmıştır.

$$r = \frac{v^2}{a_y} \quad (16)$$

Güdüm kanunu Denklem 17'de verilmiştir. KN ve ON koordinatları hesaplanır. Eğer uçak KN'ye henüz gelmediyse ON'ye doğru maksimum yanıl ivme komutu verilir, eğer uçak KN ile ON arasındaysa yine aynı şekilde ON'ye doğru maksimum ivme komutu verilir, eğer uçak ON'yi geçmiş ise tam tersi yönde maksimum ivme komutu verilir.

$Y \leq 0 \Rightarrow$

$$X_{kn} = X - r \sin \chi$$

$$Y_{kn} = Y - r \sin \chi \sin \chi$$

$$Y_{on} = Y_{kn}/2$$

$$X_{kn} > X \Rightarrow$$

$$a_{y_{ref}} = 1$$

$$X_{kn} \leq X \Rightarrow$$

$$\frac{Y}{Y_{on}} < 1 \Rightarrow$$

$$a_{y_{ref}} = -1$$

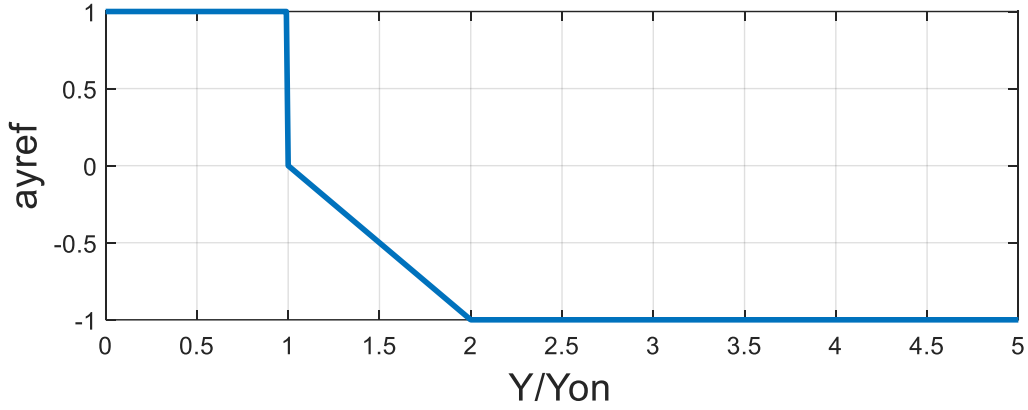
$$\frac{Y}{Y_{on}} \geq 1 \Rightarrow$$

$$a_{y_{ref}} = 1$$

$Y > 0 \Rightarrow$

$$\begin{aligned}
X_{kn} &= X + r \sin \chi \\
Y_{kn} &= Y + r \sin \chi \sin \chi \\
Y_{on} &= Y_{kn}/2 \\
X_{kn} > X &\Rightarrow \\
&\quad a_{y_{ref}} = -1 \\
X_{kn} \leq X &\Rightarrow \\
&\quad \frac{Y}{Y_{on}} < 1 \Rightarrow \\
&\quad \quad a_{y_{ref}} = 1 \\
&\quad \frac{Y}{Y_{on}} \geq 1 \Rightarrow \\
&\quad \quad a_{y_{ref}} = -1
\end{aligned} \tag{17}$$

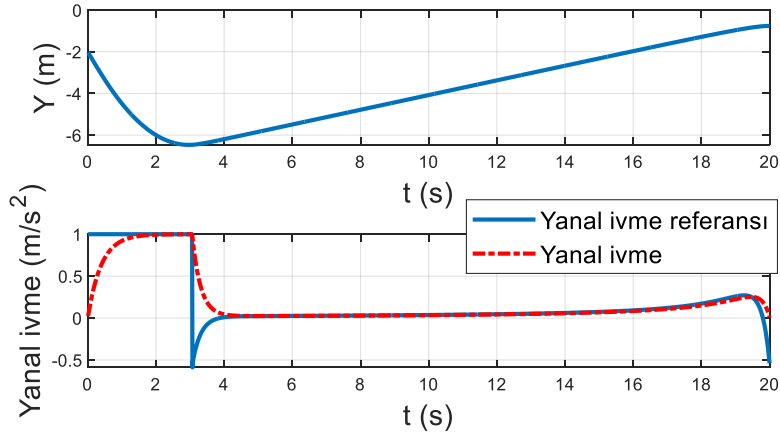
Güdümlü kanunundaki KN ile ON arasındaki bölümde maksimum komut verirse en kısa sürede orta hatta ulaşılır ancak buna gerek yoktur. Bu bölümü yumuşatmak için güdümlü kanununda bir ayarlama yapılabilir. Örnek bir ayarlama Şekil 6'da verilmiştir.



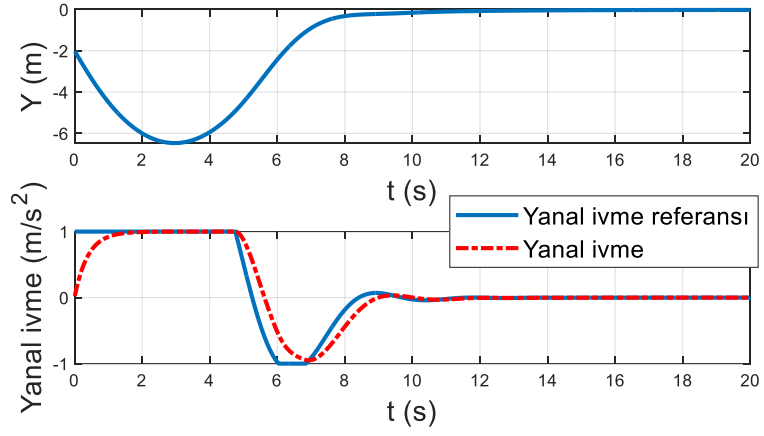
Şekil 6. $Y > 0$ için örnek bir referans ivme ayarlaması

4. Sonuç

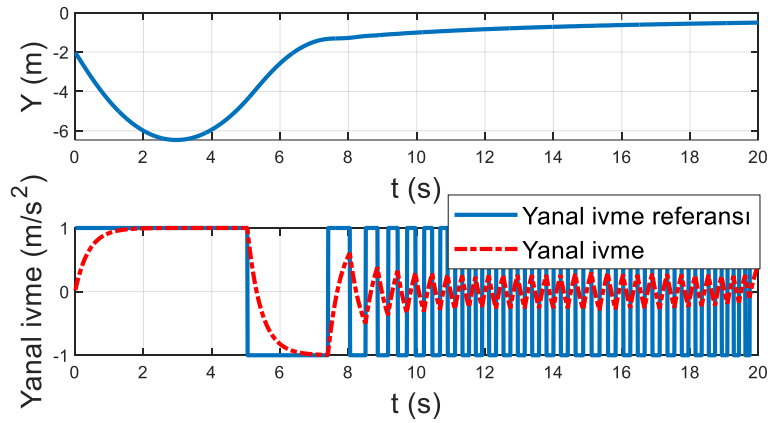
Hava aracı 80 m/s hızla -2 metre Y konumundan -2° ve 2° rota açılarıyla başlatılmıştır. Şekil 7,8,9,10 ve 11'de -2° rota açısı için ve Şekil 12,13,14,15 ve 16'da ise 2° rota açısı için güdümlü algoritması simülasyonlarının sonuçları gösterilmiştir.



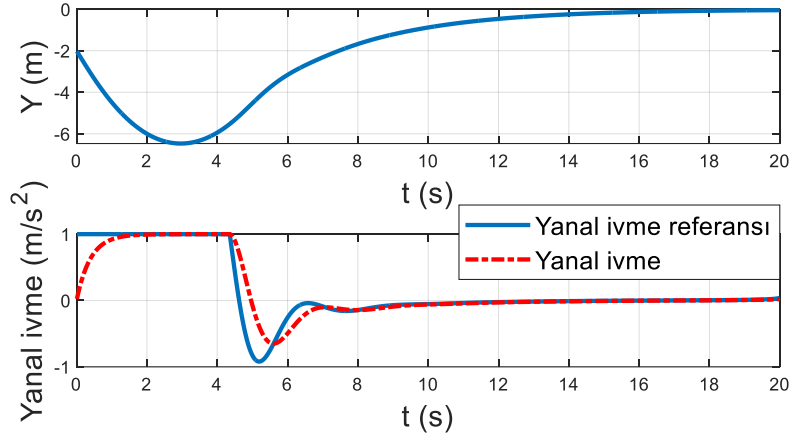
Şekil 7. Modifiye edilmiş orantılı havuç takip güdüm algoritması performansı



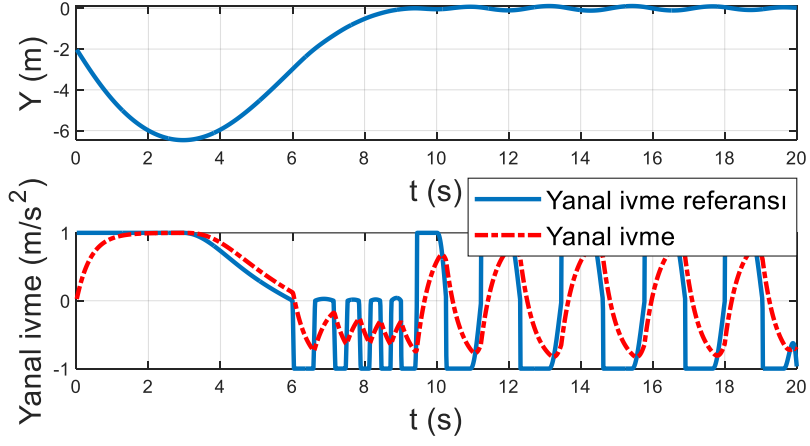
Şekil 8. Vektör alanı güdüm algoritması performansı



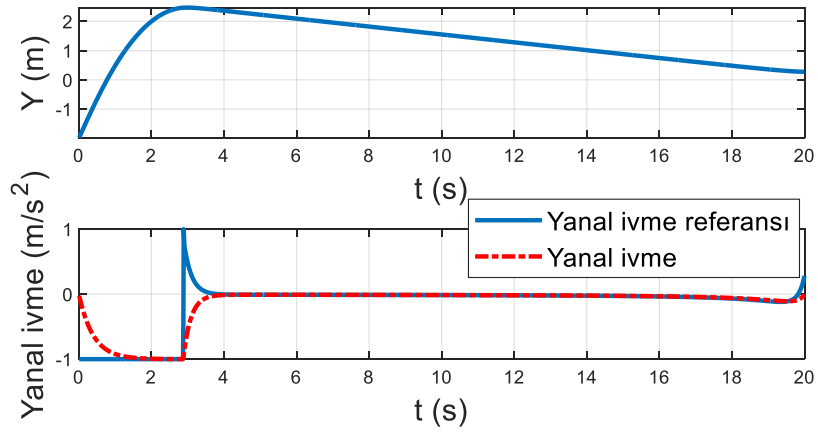
Şekil 9. Kayan kip güdüm performansı



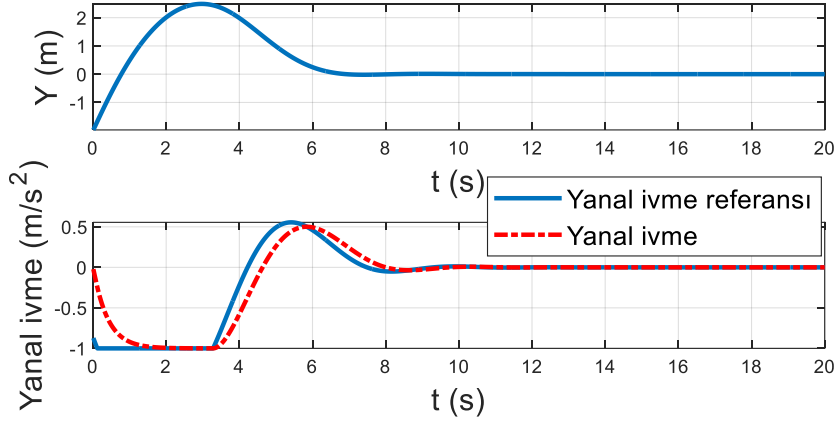
Şekil 10. Doğrusal kayan kip güdüm performansı



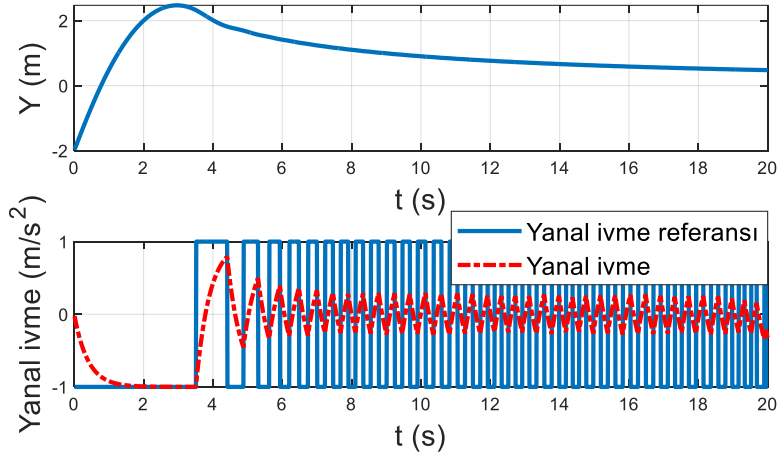
Şekil 11. Geometrik öngörülü güdüm performansı



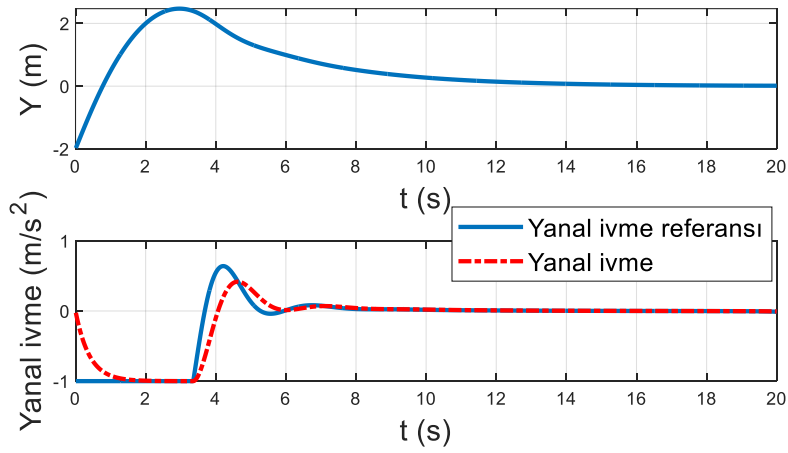
Şekil 12. Modifiye edilmiş orantılı havuç takip güdüm algoritması performansı



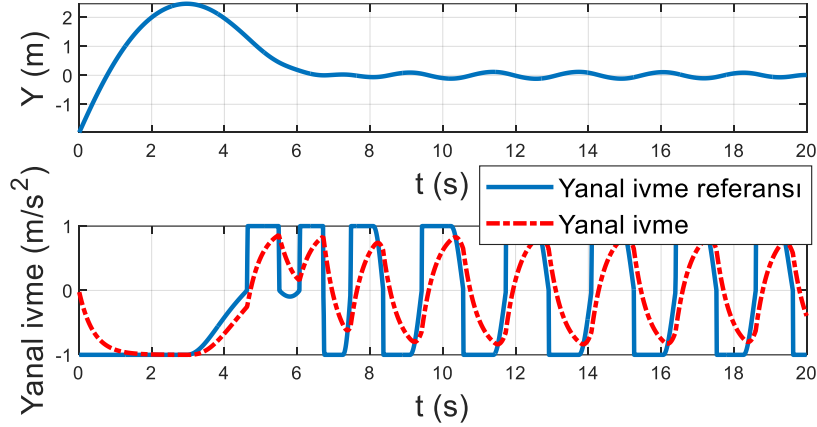
Şekil 13. Vektör alanı güdüm algoritması performansı



Şekil 14. Kayan kip güdüm algoritması performansı



Şekil 15. Doğrusal kayan kip güdüm algoritması performansı



Şekil 16. Geometrik öngörülü güdüm algoritması performansı

İki farklı başlangıç koşulu için hata ve kontrol eforları Tablo 2’de görülmektedir. Literatürdeki bulgularla paralel olarak çizgi takibi hatası en düşük olan yaklaşımın vektör alanı güdüm algoritması olduğu, en düşük kontrol eforuna sahip yaklaşımın modifiye edilmiş orantılı havuç takip algoritması olduğu, doğrusal kayan kip güdüm algoritmasının ise bu ikisinin arasında sonuç verdiği görülmüştür. Kalan iki algoritma için ise çok fazla kontrol eforu gerektirdiklerinden bu uygulama için pratik olmadıkları söylenebilir.

Tablo 2. Algoritmaların çizgi takibi performansı ve kontrol eforu değerleri

Algoritma	Pozisyon hata integrali (Çizgi takibi)		Yanal ivme integrali (Kontrol eforu)	
	-2	2	-2	2
Rota açısı (derece)				
Modifiye edilmiş orantılı havuç takip algoritması	75.48	27.46	4.03	3.14
Vektör alanı güdüm algoritması	33.07	8.98	6.80	4.68
Kayan kip güdüm algoritması	42.55	20.99	42.98	21.31
Doğrusal kayan kip güdüm algoritması	40.15	12.57	5.56	4.00
Geometrik öngörülü güdüm algoritması	34.45	9.52	11.55	11.73

Gelecek çalışmalarda iniş takımı modeli de olan bir uçak modeli ve iç kontrol döngüsü kullanılarak seçilmiş olan üç algoritmanın daha detaylı karşılaştırılması planlanmaktadır.

Kaynaklar

- [1] P.B. Sujit, S. Saripalli ve J.B. Sousa, “An Evaluation of UAV Path Following Algorithms”, European Control Conference, Zurich, Switzerland, s:3332-3337, 2013.
- [2] S. Park, J. Deyst ve J.P. How “Performance and Lyapunov Stability of a Non-Linear Path Following Guidance Method” Journal of Guidance, Control and Dynamics, Cilt: 30, No: 6, s:1718-1728, 2007.
- [3] D.R. Nelson, D.B. Barber, T.W. McLain ve R.W. Beard “Vector Field Path Following for Miniature Air Vehicles” IEEE Trans. on Robotics, Cilt: 23, No: 3, s:519-529, 2007.
- [4] A. Ratnoo, P.B. Sujit ve M. Kothari, “Adaptive Optimal Path Following for High Wind Flights”, IFAC World Congress, Milano, Italy, s: 12985-12990, 2011.
- [5] H. Tiftikci, “Vektör Alanı ile Eğrilerin Takibi ve Seyrüsefer”, 6. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, 2018.
- [6] S. Martin, “Runway Stripes and Markings, Explained”, 29/03/2022, url: <https://www.boldmethod.com/learn-to-fly/regulations/runway-markings-and-spacing-fly-better-patterns-to-landing-explained/>
- [7] E. Hatipoglu ve E. Kutluay, “Geometric Path Planning for Parallel Parking and Relevant Parameters” Advances in Automotive Engineering, Cilt: 2, No: 1, s:1-14, 2021.

Farklı GÜDÜM Kurallarının Havadan Atılan GÜDÜMLÜ Bir Havan Mermisi Üzerinde Karşılaştırılması

Bülent ÖZKAN^{1*}

¹ Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye
*¹ bozkan37@gmail.com

(Geliş/Received: 10/10/2022;

Kabul/Accepted: 05/01/2023)

Öz: Çevresel unsurlara verilecek zararı asgari düzeye indirmeyi amaçlayan nokta hedef savunma konsepti dahilinde son yıllarda yaygın kullanım alanı bulan güdümlü mühimmat sınıfında yer alan güdümlü mermiler, özellikle insansız hava platformlarından atılma olanağının da söz konusu olması sayesinde önemli bir seçenek haline gelmiştir. Nispeten küçük boyutlara sahip ve hafif yapıda olmaları, güdümsüz genel maksat mermilerin burun kısımlarına güdümlü kiti takılması yoluyla elde edilen bu mühimmatın uygulanabilirliğini artırmıştır. Bu çalışmada, bahsedilen tipte bir mühimmat olan havan mermisinin güdümlü hale getirilerek insansız hava platformlarından sabit yer hedeflerine doğru atılması durumunda ulaşılabilecek hedeften sapma ve uçuş süresi değerleri, göz önüne alınan üç farklı güdümlü kuralı ve karşılaştırma kriterleri doğrultusunda, bilgisayar benzetimleri kullanılarak incelenmeye çalışılmıştır.

Anahtar kelimeler: Güdümlü havan mermisi, güdümlü, havan mermisi, sabit hedef, benzetim.

Comparison of the Noteable Guidance Laws on a Guided Mortar Released from Aerial Platforms

Abstract: The guided projectiles which are classified among the guided munition having a wide-use in recent years in accordance with the point-target defense concept aiming at minimizing the collateral damage on the surrounding entities have become a significant choice especially when the opportunity of releasing them from unmanned aerial platforms is apparent. The properties of relatively small size and light weight make the applicability of these munitions which are configured by mounting a guidance kit to the nose sections of the general purpose projectiles increase. In this study, the miss distance and flight duration quantities which can be attained when these guided projectiles are fired from unmanned aerial platforms towards stationary ground targets are investigated by means of the relevant computer simulations for three different guidance laws and comparison criteria.

Key words: Guided mortar, guidance, mortar, stationary target, simulation.

1. Giriş

Hedef olmayan tali unsurlara mümkün olduğunca az zarar vererek yalnızca amaçlanan noktaların imhasına dayanan modern savunma konsepti dahilinde yaygın kullanım alanı bulan güdümlü mühimmat arasında yer alan akıllı bomba ve güdümlü mermiler, eldeki güdümsüz genel maksat bomba ve mermilerini nispeten düşük maliyetli kitleler marifetiyle güdümlü hale getirilerek elde edilmeleri dolayısıyla popüler bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Bahsedilen maliyet etkinliklerinin yanı sıra uygun şekilde tasarlanan güdümlü ve denetim algoritmaları sayesinde hedeften sapma miktarlarının da ciddi şekilde düşürülmesi, belirtilen mühimmattan güdümlü mermileri son dönemde tercih edilir hale gelmiştir. Güdümlü mermiler, diğer güdümlü mühimmata nazaran önemli ölçüde hafif ve küçük olmaları dolayısıyla, son dönemde popüler hale gelen insansız hava platformlarından da atılabilmektedir [1].

Yer platformlarından yer hedeflerine doğru fırlatılan havan mermileri, farklı yaklaşımlarla denetimli hale getirilebilmektedir [2-4]. Öte yandan, insansız hava araçlarının sağladığı üstünlük de dikkate alınarak, güdümlü havan mermilerinin hava platformlarından yer hedeflerine doğru atılması da yakın dönemde ele alınan bir husus olmuştur. Hava platformlarından atılması öngörülen güdümlü havan mermilerinin denetimi için göz önüne alınan yöntemlerden biri de mermilerin burun kısmına takılan güdümlü kiti vasıtasıyla uygulanan ve mevcut örnekleri Şekil 1, Şekil 2 ve Şekil 3 ile verilen aktif yönlendirilmiştir.

* Sorumlu yazar: bozkan37@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0003-3112-9723



Şekil 1. İki Kanatçıklı 81mm Precision Air-Dropped Guided Mortar (ADM)-General Dynamics [5].

Bu çalışmada, burun kısmına takılan güdüm kiti aracılığıyla güdümlü hale getirilen bir havan mermisinin insansız bir hava platformundan yer hedeflerine karşı atılması durumu ele alınmaktadır. Belirtilen yaklaşım çerçevesinde, yaygın olarak kullanılan güdüm kuralları dikkate alınarak, oluşturulan modeller üzerinden farklı otopilot, kanatçık açısı, anahtarlama süresi ve yan rüzgâr değerleri için gerçekleştirilen bilgisayar benzetimleri sonucunda, incelenen havan mermisi konfigürasyonu için en uygun güdüm yöntemi belirlenmeye çalışılmıştır. Burada göz önünde bulundurulanan denetim yaklaşımı, mermi boylamasına eksenine etrafında tek serbestlik dereceli bir dönüşe sahip olan elektromekanik eyletimli bir bileziğin üzerindeki bir çift sabit kanatçık sayesinde yunuslama ve yandönme otopilotlarının sıralı biçimde etkin hale getirilmesi yönüyle de özgünlük arz etmektedir [1].



Şekil 2. Dört Kanatçıklı 81mm Precision Air-Dropped Guided Munition (ADM)-General Dynamics [6].



Şekil 3. Hava platformundan düşey olarak atılan güdüm kitli mühimmat [7].

2. Güdüm Kiti Konfigürasyonu

Çalışma kapsamında göz önüne alınan güdümsüz merminin burun kısmına takılacak (btnlenecek) güdüm kiti, Şekil 4 ile şematik olarak belirtildiği üzere uç kısmında bir adet tapa, mermiyle bağlantısının yapıldığı arka kısımda üzerine sabit açılı bir çift kanatçık bütünlenmiş olan eyletici, tasarlanan güdüm ve denetim şemasına uygun olarak seçilen algılayıcılar, elektronik kartlar ve g biriminden (batarya) oluşmaktadır [1].



Şekil 4. Öngörülen güdümlü mermi geometrisi.

Güdümlü merminin denetimi, eyletici rotorunun dışına geçirilen bileziğin (metal kılıfın) üzerine sabit yönelim açısı (İng. cant angle) ile karşılıklı olarak (aralarında 180° açı olacak şekilde) bir çift halinde yerleştirilen denetim kanatçıklarının (kit kanatçıklarının) rotor tarafından sağlanan açısal konumları sayesinde, ardışık olarak yunuslama ve yandönme düzlemlerindeki açısal hareketinin elde edilmesi prensibine göre yapılmaktadır. Bir başka deyişle güdümlü mermi ve denetim döngüsü, ele alınan güdümlü mermi konfigürasyonunda yunuslama ve yandönme düzlemlerinde aynı anda çalışmamaktadır [1].

3. Mermi Dinamik Modeli

Ele alınan güdümlü mermi takılı haldeki (güdümlü) merminin hareket denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir [1, 8]:

$$\dot{u} - rv + qw = (X + X_T)/m + g_x \quad (1)$$

$$\dot{v} + ru - pw = (Y + Y_T)/m + g_y \quad (2)$$

$$\dot{w} - qu + pv = (Z + Z_T)/m + g_z \quad (3)$$

$$\dot{p} = L/I_a \quad (4)$$

$$\dot{q} - pr = (M + M_T)/I_t \quad (5)$$

$$\dot{r} + pq = (N + N_T)/I_t \quad (6)$$

Buradaki ilgili vektörlerin sırasıyla mermi gövdesine yapışık olduğu varsayılan eksen takımının (F_b 'nin) boylamasına, yanlamasına ve düşey eksenleri üzerindeki bileşenlerini göstermek üzere, (1)'den (6)'ya kadar olan denklem takımında aşağıdaki tanımlamalar yapılmıştır:

m : Mermi kütlesi

I_a ve I_t : Eksenel ve yanal eylemsizlik momenti bileşenleri

p , q ve r : Yuvarlanma, yunuslama ve yandönme yönündeki açısal hız bileşenleri

u , v ve w : Doğrusal hız vektörü bileşenleri

X , Y ve Z : Mermi kütle merkezine etkiyen aerodinamik kuvvet bileşenleri

L , M ve N : Mermi gövdesine etkiyen aerodinamik momentin yuvarlanma, yunuslama ve yandönme yönündeki bileşenleri

X_T , Y_T ve Z_T : Mermi kütle merkezine etkiyen itki kuvveti bileşenleri

L_T , M_T ve N_T : Mermi gövdesi üzerine etkiyen itki kaçıklığı momenti bileşenleri

g_x , g_y ve g_z : Mermi kütle merkezine etkiyen yerçekimi ivmesi bileşenleri

Düşük hızlı hava platformundan atılması sonrasında yuvarlanma eksenini etrafındaki açısal hız bileşeninin çok düşük olacağı ($p \approx 0$) kabulüyle, güdümlü merminin yunuslama ve yandönme düzlemlerindeki davranışını tanımlayan (2), (3), (5) ve (6) numaralı denklemler aşağıdaki gibi sadeleştirilebilir [1, 8]:

$$\dot{w} - qu = (Z/m) + g_z \quad (7)$$

$$\dot{q} = M/I_t \quad (8)$$

$$\dot{v} + ru = (Y/m) + g_y \quad (9)$$

$$\dot{r} = N/I_t \quad (10)$$

(7)'den (10)'a kadar olan denklemlerde yer alan aerodinamik kuvvet ve moment bileşenleri Y , Z , M ve N aşağıdaki şekilde yaklaşık olarak tanımlanabilir [1, 8]:

$$Y = C_y q_\infty S_M \quad (11)$$

$$Z = C_z q_\infty S_M \quad (12)$$

$$M = C_m q_\infty S_M d_M \quad (13)$$

$$N = C_n q_\infty S_M d_M \quad (14)$$

Yukarıdaki eşitliklerde q_∞ , S_M ve d_M sırasıyla mermi üzerine etkiyen dinamik basınç, mermi kesit alanı ve mermi çapını göstermekte olup C_y , C_z , C_m ve C_n ile ifade edilen aerodinamik kuvvet ve moment katsayıları, hücum açısı (α), yana kayma açısı (β), yükseliş dümeni açısı (δ_e), yandönme dümeni açısı (δ_r), q ve r parametrelerinin fonksiyonu olarak yazılabilir [1, 8]:

$$C_y = C_{y\beta} \beta + C_{y\delta} \delta_r + C_{yr} [d_M / (2v_M)] r \quad (15)$$

$$C_z = C_{z\alpha} \alpha + C_{z\delta} \delta_e + C_{zq} [d_M / (2v_M)] q \quad (16)$$

$$C_m = C_{m\alpha} \alpha + C_{m\delta} \delta_e + C_{mq} [d_M / (2v_M)] q \quad (17)$$

$$C_n = C_{n\beta} \beta + C_{n\delta} \delta_r + C_{nr} [d_M / (2v_M)] r \quad (18)$$

Burada verilen ifadelerde v_M mermi doğrusal hız vektörünün genliğini göstermekte olup $C_{y\beta}$, $C_{y\delta}$, C_{yr} , $C_{z\alpha}$, $C_{z\delta}$, C_{zq} , $C_{m\alpha}$, $C_{m\delta}$, C_{mq} , $C_{n\beta}$, $C_{n\delta}$ ve C_{nr} ile gösterilen ve Mach sayısının (M_∞) fonksiyonu olarak tanımlanan kararlılık türevleri, bilgisayar benzetimleri esnasında anlık olarak güncellenmektedir [1, 8].

4. Güdüm Kuralları

Güdümlü mermi için oluşturulan güdüm ve denetim şemasında, oransal seyrüsefer (OS), gövde takibi (GT) ve doğrusal hedef takibi (DHT) güdüm kurallarının başarım özellikleri ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Güdüm komutunu merminin yanal ivme bileşenleri cinsinden üreten OS yaklaşımına göre yunuslama ve yandönme düzlemlerinin komutları aşağıdaki gibi oluşturulur [9, 10]:

$$a_p^c = -N_p v_M \lambda_p \cos(\lambda_y - \eta_m) \quad (19)$$

$$a_y^c = N_y v_M [\lambda_y \cos(\gamma_m) - \lambda_p \sin(\gamma_m) \sin(\lambda_y - \eta_m)] \quad (20)$$

Yukarıdaki denklemlerde γ_m ve η_m sembolleri mermi hız vektörünün sırasıyla yunuslama ve yandönme düzlemleriyle yaptığı aılları temsil etmekte olup, p ve y alt indisleri sırasıyla yunuslama ve yandönme düzlemlerini göstermek üzere, a_p^c ve a_y^c füze denetim sistemi referans ivme sinyallerini, N_p ve N_y etkin seyrüsefer oranını ve λ_p ve λ_y de görüş çizgisi açısını göstermektedir [9, 10].

Çalışma kapsamında göz önüne alınan aı esaslı güdüm yöntemlerinden gövde takibi (GT) yaklaşımında mermi boylamasına eksenini, mermi ile hedef arasındaki görüş çizgisinin üzerine oturtulmaya çalışılmaktadır. Bir başka deyişle, yunuslama ve yandönme düzlemlerindeki güdüm komutları, merminin belirtilen düzlemlerindeki açısal yönelimleri sırasıyla θ ve ψ sembolleri ile gösterilmek üzere, aşağıdaki gibi türetilbilir [9, 10]:

$$\theta^c = \lambda_p \quad (21)$$

$$\psi^c = \lambda_y \quad (22)$$

Merminin gdmn uygulandığı süre boyunca mermi, hedef ve planlanan çarpışma noktasından oluşan çarpışma geni üzerinde tutulması esasına dayanan doğrusal hedef takibi (DHT) güdüm kuralında ise, şekil 5'te de gösterildiği gibi güdümlü mermi hız vektörü sürekli olarak planlanan çarpışma noktasına doğru yönlendirilmektedir [9, 10].

şekil 5'teki O_e , M , T ve P harfleri, sırasıyla sabit eksen takımı orijini, mermi, hedef ve planlanan çarpışma noktasını; $\vec{v}_{M_{actual}}$ ve $\vec{v}_{M_{ideal}}$ ise gerçek ve ideal (merminin çarpışma geni üzerinde tutulabilmesi için gereken) mermi hız vektörünü temsil etmektedir [9, 10].

DHT güdüm kuralında mermi denetim sistemine gönderilecek referans sinyalleri, OS kuralından farklı olarak merminin uçuş yörüngesi aılları cinsinden oluşturulmaktadır. Bu anlamda, merminin yunuslama ve yandönme düzlemleri için komut aılları aşağıdaki gibi yazılabilir [9, 10]:

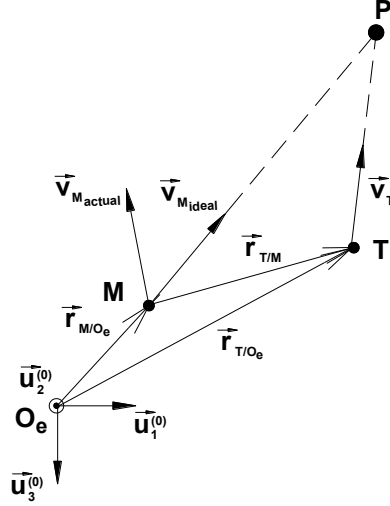
$$\gamma_m^c = \arctan \left[(\Delta z - v_{Tz} \Delta t) / (c_x \cos(\eta_m) + c_y \sin(\eta_m)) \right] \quad (23)$$

$$\eta_m^c = \arctan\left[\frac{(v_{Ty}\Delta t - \Delta y)}{(v_{Tx}\Delta t - \Delta x)}\right] \quad (24)$$

Yukarıdaki denklemlerde, $i=x, y$ ve z ve $j=M$ ve T olmak üzere ve x, y ve z sırasıyla sabit eksen takımı üzerindeki konum bileşenlerini gösterecek şekilde, aşağıdaki tanımlamalar yapılmıştır:

$$\zeta_x = v_{Tx}\Delta t - \Delta x, \zeta_y = v_{Ty}\Delta t - \Delta y, \Delta i = i_M - i_T.$$

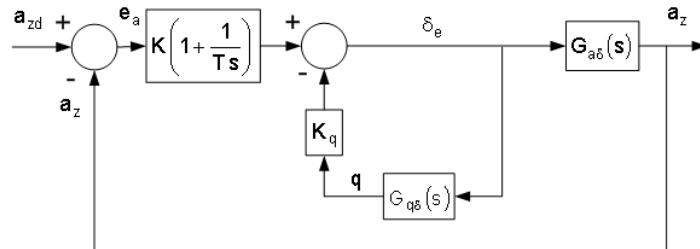
Burada Δt , anlık olarak merminin bulunduğu konumdan planlanan çarpışma noktasına ulaşması için gereken süreyi göstermekte olup, mermi ve hedefin konum ve hız bileşenlerinin bir fonksiyonudur [9, 10].



Şekil 5. Doğrusal hedef takibi güdüm kuralı geometrisi [9].

5. Mermi Denetim Sistemi

Uygulanan güdüm kuralı tarafından oluşturulan doğrusal ivme komut sinyalini gerçekleyecek şekilde tasarlanan güdümlü mermi denetim sistemi (otopilotu), esas olarak denetleyici, kanat tahrik sistemi (KTS), dönüölçerler, ivmeölçerler ve planttan (güdümlü mermi) oluşmakta olup yunuslama ve yandönme düzlemlerinde birbirinden bağımsız olarak ve mevcut denetim şemasında dönüşümlü olarak çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Yunuslama düzlemi için tasarlanan otopilot Şekil 6 ile verildiği gibidir. Burada a_{zd} , a_z , e_a , K , T ve K_q sembolleri sırasıyla doğrusal ivme vektörünün yunuslama düzlemindeki bileşeninin istenen (referans) değerini, doğrusal ivme vektörünün ölçülen yunuslama düzlemi bileşenini, doğrusal ivme yunuslama bileşeni hatasını, denetim sisteminin oransal kazancını, denetim sisteminin tümlev zaman sabitini ve mermi açısız hızının yunuslama bileşenine etkileyen kazancı temsil etmekte olup yandönme düzleminde de yunuslama düzlemi otopilotu ile aynı yapıdaki bir denetim sistemi kullanılmıştır [1].



Şekil 6. Yunuslama düzlemi ivme otopilotu [11].

Yunuslama veya yandönme hızı geribeslemesiyle oransal ve tümlevsel (İng. proportional plus integral, PI) denetim kuralına göre düzeltme yapacak şekilde oluşturulan otopilotların kazançları (yunuslama otopilotu için K_p , T_p ve K_q ve yandönme otopilotu için K_y , T_y ve K_r), M_∞ , yunuslama/yandönme hızı ve q_∞ değerine bağlı olarak güdümlü merminin hareketi boyunca sürekli olarak güncellenmekte; böylelikle değişen uçuş koşullarına karşın otopilotların sürekli kararlı kalması sağlanmaya çalışılmaktadır [1].

Otopilot katsayılarının bulunabilmesi amacıyla, doğrusallaştırılmış mermi dinamiğinin kullanıldığı kapalı çevrim otopilot transfer fonksiyonu yunuslama ve yandönme düzlemleri için aşağıdaki gibi çıkarılmıştır [11]:

$$\frac{a_z(s)}{a_{zd}(s)} = \frac{(T_p s + 1)(n_{p2} s^2 + n_{p1} s + 1)}{a_{p3} s^3 + a_{p2} s^2 + a_{p1} s + 1} \quad (25)$$

$$\frac{a_y(s)}{a_{yd}(s)} = \frac{(T_y s + 1)(n_{y2} s^2 + n_{y1} s + 1)}{a_{y3} s^3 + a_{y2} s^2 + a_{y1} s + 1} \quad (26)$$

(25) ve (26) numaralı denklemlerde $a_{zd} = a_p^c$ ve $a_{yd} = a_y^c$ olup, T_p , n_{p1} , n_{p2} , a_{p1} , a_{p2} , a_{p3} , T_y , n_{y1} , n_{y2} , a_{y1} , a_{y2} ve a_{y3} parametreleri; otopilot katsayıları, mermi çapı, mermi kütlesi, mermi eylemsizlik momenti ve hız bileşenleri ile q_∞ ve aerodinamik katsayıların fonksiyonudur.

Otopilotları kararlı kılacak K_p (K_y), T_p (T_y) ve K_q (K_r) katsayıları, (25) ve (26) numaralı denklemlerde verilen transfer fonksiyonlarının karakteristik polinomunun (payda polinomunun), (27) numaralı denklemdeki gibi üçüncü dereceden Butterworth polinomuna (boyutsuz sönüm oranı $\zeta=0,707$ alınarak) eşitlenmesi ile elde edilebilir [11].

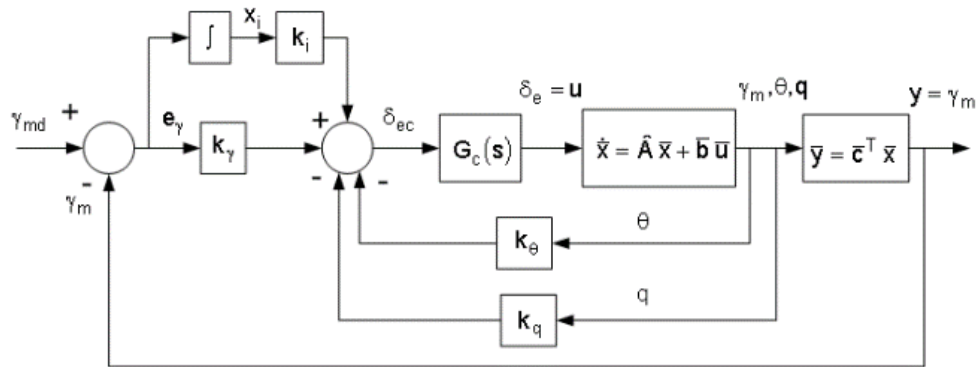
$$B(s) = (1/\omega_c^3)s^3 + (2/\omega_c^2)s^2 + (2/\omega_c)s + 1 \quad (27)$$

GT ve DHT güdüm kuralları tarafından oluşturulan aı komutlarının güdümlü mermi tarafından yerine getirilebilmesi amacıyla, denetlenen durum değişkeni olan uçuş yörüngesi açıların referans ve gerçek (llen) değerleri arasındaki hatanın tümlevinin de ek durum değişkeni olarak tanımlandığı durum geribeslemeli bir denetim sistemi (otopilot) oluşturulmuştur. Burada, DHT kuralı tarafından mermi hız vektörünün yönelim açıları şeklinde oluşturulan komutlar doğrudan kullanılırken, GT kuralı tarafından mermi gövdesinin yere göre yönelim açıları cinsinden türetilen komut açıları aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hız vektörü açısı komutlarına dönüştürülmektedir. Böylece, yunuslama düzlemi için tasarlanan geometrisi Şekil 7’de verilen aı otopilotunun, GT ile de kullanılması sağlanmaktadır [9].

$$\gamma_m^c = \theta^c - \alpha \quad (28)$$

$$\eta_m^c = \psi^c + [\beta / \cos(\theta)] \quad (29)$$

Burada st indis olarak verilen ‘‘c’’ harfi, ilgili aı için güdüm kuralı tarafından oluşturulan komut sinyalinin işaret etmektedir.



Şekil 7. Yunuslama düzlemi aı otopilotu [11].

Şekil 7’de görülen aı otopilotunda kullanılan k_θ , k_q , k_y ve k_i sembolleri durum geribeslemeli aı otopilotunun kazançlarını göstermekte olup A , b ve c harfleri durum uzayında ifade edilen mermi dinamiğinin sistem, girdi ve

çıkıktı matrislerini, $G_c(s)$ de KTS transfer fonksiyonuna karşılık gelmektedir. Ayrıca, γ_{md} ile mermi hız vektörünün yunuslama düzlemiyle yaptığı açının istenen değeri temsil edilmektedir [9].

Uygulamada açı otopilotunun kazançları, M_x , yunuslama/yandönme hızı ve q_∞ değerine bağlı olarak merminin hareketi boyunca sürekli olarak güncellenmektedir [9].

Otopilot katsayılarının bulunabilmesi amacıyla, doğrusallaştırılmış mermi dinamiğinin kullanıldığı kapalı çevrim denetim sistemi transfer fonksiyonu, yunuslama ve yandönme düzlemleri için aşağıdaki gibi elde edilmiştir [9]:

$$\frac{\gamma_m(s)}{\gamma_{md}(s)} = \frac{n_{\gamma 3}s^3 + n_{\gamma 2}s^2 + n_{\gamma 1}s + 1}{d_{\gamma 4}s^4 + d_{\gamma 3}s^3 + d_{\gamma 2}s^2 + d_{\gamma 1}s + 1} \quad (30)$$

$$\frac{\eta_m(s)}{\eta_{md}(s)} = \frac{n_{\eta 3}s^3 + n_{\eta 2}s^2 + n_{\eta 1}s + 1}{d_{\eta 4}s^4 + d_{\eta 3}s^3 + d_{\eta 2}s^2 + d_{\eta 1}s + 1} \quad (31)$$

(30) ve (31) numaralı denklemlerde $\gamma_{md} = \gamma_m^c$ ve $\eta_{md} = \eta_m^c$ olup, $n_{\gamma 3}$, $n_{\gamma 2}$, $n_{\gamma 1}$, $d_{\gamma 4}$, $d_{\gamma 3}$, $d_{\gamma 2}$, $d_{\gamma 1}$, $n_{\eta 3}$, $n_{\eta 2}$, $n_{\eta 1}$, $d_{\eta 4}$, $d_{\eta 3}$, $d_{\eta 2}$ ve $d_{\eta 1}$ katsayıları; otopilot katsayıları, mermi çapı, mermi kütlesi, mermi eylemsizlik momentleri ve hız bileşenleri ile q_∞ ve aerodinamik katsayıların fonksiyonudur [9].

Açı denetim sistemini kararlı kılacak ve bant genişliğinin istenen değerinde olmasını sağlayacak otopilot katsayıları, ivme otopilotuna benzer şekilde (30) ve (31) numaralı denklemlerde verilen transfer fonksiyonlarının karakteristik polinomuna dördüncü dereceden Butterworth polinomu eşitlenerek elde edilmiştir [9].

6. Eşleşme Modeli

Güdümlü mermi ile sabit hedef noktası arasındaki uzaklığı temsil eden hayali görüş çizgisi mesafesi ($r_{T/M}$) ile λ_p ve λ_y için aşağıdaki eşitlikler yazılabilir [11]:

$$r_{T/M} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (32)$$

$$\lambda_p = \arctan[-\Delta z \cos(\lambda_y) / \Delta x] \quad (33)$$

$$\lambda_y = \arctan(\Delta y / \Delta x) \quad (34)$$

Çalışmada sabit yer hedefi göz önüne alındığı için, $r_{T/M}$ 'nin düşey bileşeninin sıfıra eşit olduğu durumda ($\Delta z=0$), eşleşme sonundaki ($t=t_F$) hedeften nihai sapma miktarı (d_{miss}) aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanabilir [11]:

$$d_{miss} = \sqrt{\Delta x^2(t_F) + \Delta y^2(t_F)} \quad (35)$$

7. Bilgisayar Benzetimleri

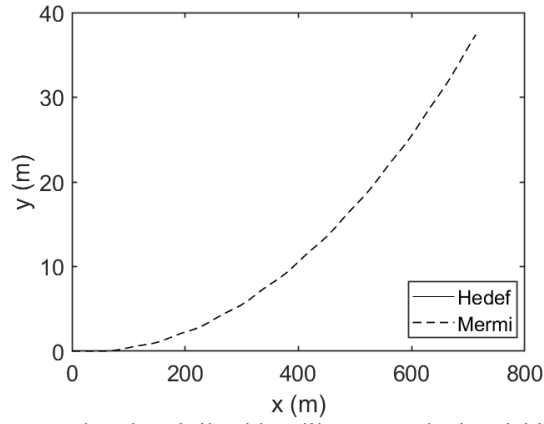
Mevcut çalışmada, atıcı hava platformu olarak seçilen sabit hızla (v_{p0}) ilerleyen silahlı insansız bir hava aracından önceden kararlaştırılan hareketsiz (sabit) bir yer hedefine karşı belirli bir irtifada (z_{p0}) serbest bırakılan güdümlü bir havanın mermisi ele alınmıştır. Güdümlü merminin toplam boyu L_M ve hareketsiz yer hedefinin merminin hava aracından bırakıldığı andaki boylamasına uzaklığı x_{TF} sembolleri ile gösterilmek üzere, Tablo 1'de verilen parametre sayısal değerleri göz önüne alınarak bilgisayar benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Tablo 1'de yer alan v_{M0} ve z_{M0} da merminin hava platformundan bırakıldığı andaki sırasıyla doğrusal hızı ve yerden yüksekliğini ifade etmektedir. Sabit güdüm kiti kanatçık açısı, otopilot anahtarlama süresi ve yan rüzgâr parametrelerinin olası farklı değerleri için oluşturulan sekiz farklı eşleşme durumu için icra edilen benzetimlerin sonunda elde edilen hedeften nihai sapma ve mermi uçuş süresi büyüklükleri, bahsedilen durumlarla birlikte Tablo 2'de sunulmaktadır. Burada amaç, başlangıçta hedef değer olarak belirlenen azami 55 m'lik hedeften nihai sapma değerinin aşılmasını sağlayacak sabit güdüm kanatçığı açısı ve otopilot anahtarlama süresini haiz koşulların belirlenebilmesidir. Seçilen örnek durum için, bilgisayar benzetimleri ile elde edilen yatay ve düşey eşleşme geometrileri (güdümlü mermi yörüngeleri) ile mermi mutlak hızı ve otopilot çalışma sırasını gösteren grafikler Şekil 8 ile Şekil 13 arasında verilmektedir.

Tablo 1. Bilgisayar benzetimlerinde kullanılan sayısal değerler

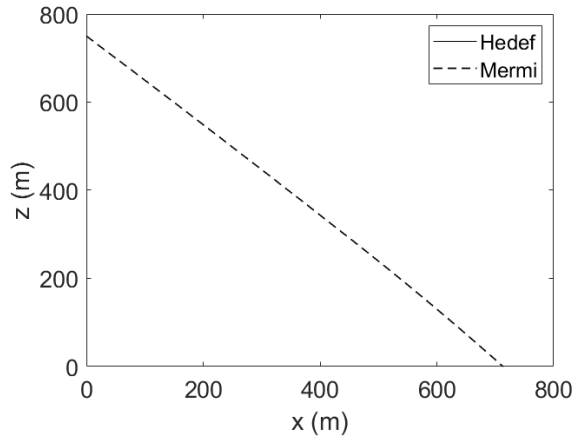
Parametre	Sayısal Değer	Parametre	Sayısal Değer
d_M	50 mm	V_{M0}	0,8·Mach (=272 m/s)
L_M	500 mm	Z_{M0}	750 m
m	15 kg	X_{MF}	750 m
I_a	0,018 kg·m ²	ω_c (= $\omega_{cy}=\omega_{cp}$)	10 Hz
I_t	5,005 kg·m ²	ζ (= $\zeta_y=\zeta_p$)	0,707

Tablo 2. Bilgisayar benzetimleri sonuçları

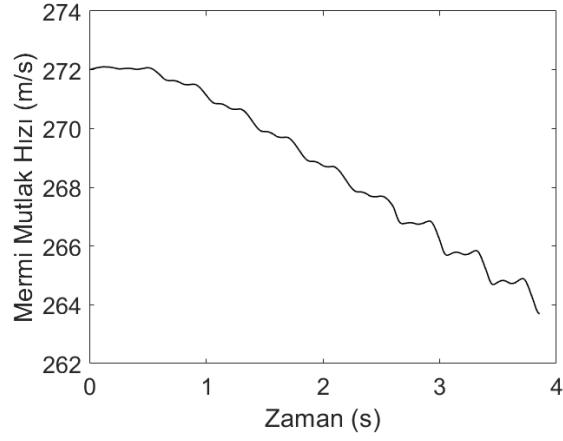
Durum No.	Yan Rüzgâr Hızı (m/s)	Kanatçık Açısı (°)	Otopilot Anahtarlama Süresi (s)	Hedeften Nihai Sapma (m)			Mermi Uçuş Süresi (s)		
				OS	GT	DHT	OS	GT	DHT
1	0	1	0,2	52,414	47,054	9,912	3,857	4,249	4,145
2			0,5	42,040	52,599	10,847	3,837	4,262	4,119
3		5	0,2	242,785	118,930	64,539	4,980	4,085	4,231
4			0,5	200,263	46,836	76,918	4,953	4,294	4,297
5	5	1	0,2	64,050	38,629	30,691	3,893	4,194	4,348
6			0,5	59,623	37,899	19,895	3,841	4,147	4,172
7		5	0,2	267,279	65,346	56,967	5,264	4,491	4,498
8			0,5	204,036	104,962	119,684	4,925	4,869	4,150



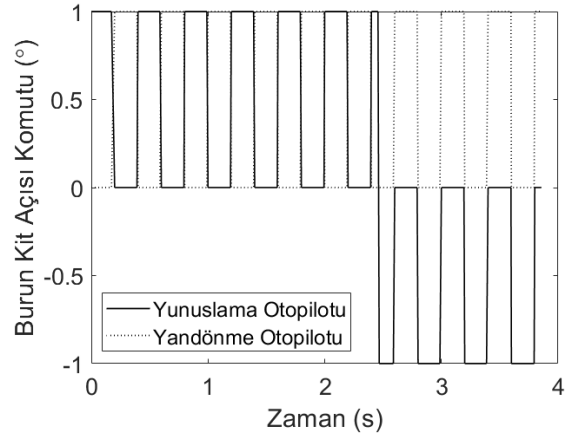
Şekil 8. Durum 1 OS güdüm kuralı ile elde edilen yatay düzlemdeki eşleşme geometrisi.



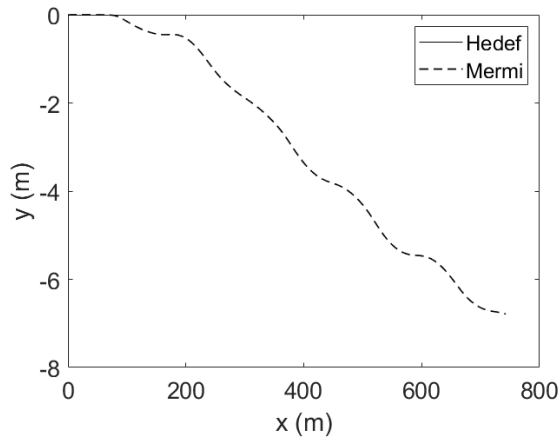
Şekil 9. Durum 1 OS güdüm kuralı ile elde edilen düşey düzlemdeki eşleşme geometrisi.



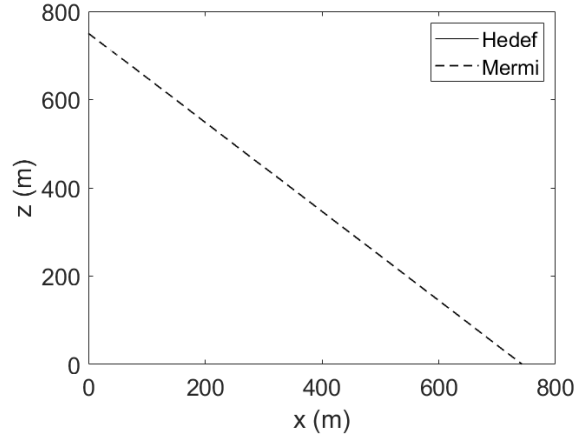
Şekil 10. Durum 1 OS güdüm kuralı ile elde edilen mermi mutlak hızının zamanla değişimi.



Şekil 11. Durum 1 OS güdüm kuralı ile elde edilen mermi yunuslama ve yandönme otopilotlarının çalışma sırası.



Şekil 12. Durum 1 DHT güdüm kuralı ile elde edilen yatay düzlemdeki eşleşme geometrisi.



Şekil 13. Durum 1 DHT güdüm kuralı ile elde edilen düşey düzlemdeki eşleşme geometrisi.

8. Tartışma ve Sonuç

Ele alınan sekiz farklı atış durumu için gerçekleştirilen bilgisayar benzetimleri sonucunda Tablo 2'deki gibi elde edilen veriler incelendiğinde, yan rüzgâr ve kanatçık açısı değerlerindeki artışın ele alınan güdüm kurallarının tamamı için hem hedeften sapma hem de mermi uçuş süresini artırdığı, bunun yanında otopilot anahtarlama süresindeki artış veya azalışa bağlı genel bir eğiliminin ortaya çıkmadığı gözlenmektedir. Genel olarak, DHT kuralı ile ulaşılan hedeften nihai sapma miktarlarının OS ve GT kurallarına nazaran daha az olduğu, mermi uçuş süreleri bakımından da güdüm kuralları arasında belirgin bir üstünlük bulunmadığı görülmektedir. Hedeften sapma miktarı kıstası bakımından, GT güdüm kuralının, daha popüler bir yöntem olan OS kuralından daha düşük sonuçlara sebebiyet vermesi de çalışmanın ilgi çekici sonuçlarından biridir. Belirtilen hususlar doğrultusunda, ele alınacak mermi-hedef eşleşme koşullarına bağlı olarak uygun olan güdüm kuralıyla birlikte kanatçık açısı ve otopilot anahtarlama süresi parametrelerinin seçilmesinin doğru olacağı değerlendirilmektedir.

Kaynaklar

- [1] Özkan B. Hava platformlarından atılan havan mermilerinin güdüm ve denetimi. 20. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu; 2021; Dicle Üniversitesi, Diyarbakır, Türkiye.
- [2] Özkan B. Dönü kararlı mermilerin dinamik modellemesi. 19. Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu; 2019, İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay, Türkiye.
- [3] Fresconi F, Cooper G, Celmins I, DeSpirito J, Costello M. Flight mechanics of a novel guided spin-stabilized projectile concept. Proc. Inst. Mech. Eng., Part G: J. Aerosp. Eng. 2011; 226: 327-340.
- [4] Ilg MD. Guidance, navigation, and control for munitions. Doktora Tezi, Drexel Üniversitesi, ABD, 2008.
- [5] <http://pena-abad.blogspot.com/2010/04/air-dropped-mortar-successfully.html>, Erişim: 21 Mayıs 2021.
- [6] <https://www.gd-ots.com/wp-content/uploads/2017/11/81mm-Air-Dropped-Guided-Mortar-ADM.pdf>, Erişim: 21 Mayıs 2021.
- [7] <https://twitter.com/RALee85/status/1112658613565308930/photo/1>, Erişim: 21 Mayıs 2021.
- [8] Özkan B. Otopilot bant genişliğinin güdüm ve denetim sistemi başarımına etkisinin incelenmesi. TOK2019-Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Ulusal Toplantısı; 2019; Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla, Türkiye.
- [9] Özkan B, Özgören MK, Mahmutyazıcıoğlu G. Havadan karaya kısa menzilli bir füzeye uygulanabilecek ivme ve açı esaslı güdüm kurallarının karşılaştırılması. TOK2008-Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı; 2008; İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- [10] Özkan B, Özgören MK, Mahmutyazıcıoğlu G. Performance comparison of the notable acceleration- and angle-based guidance laws for a short-range air-to-surface missile. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences 2017; 25: 3591-3606.
- [11] Özkan B. Dynamic modeling, guidance, and control of homing missiles. Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 2005.

SWARA, ARAS ve WASPAS Yöntemleri ile Yeni Şube Yeri Seçimi: Bir Kargo Firması Örneği

Emine Elif NEBATI^{1*}, Eda VATANSEVER², Gülnihal MAKAS³

^{1,2,3} Endüstri Mühendisliği, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

*¹ emine.nebati@izu.edu.tr, ² vatansever979@gmail.com, ³ gulnihalmks@gmail.com

(Geliş/Received: 11/10/2022;

Kabul/Accepted: 22/02/2023)

Öz: Kuruluş yeri işletmelerin temel faaliyetlerini, ekonomik hayatlarını sürdürdükleri yerdir. Kuruluş yeri seçimi, maliyetli ve telafisi uzun zaman aldığından doğru seçim yapmak işletmeler için büyük önem arz etmektedir. Kargo işletmelerinde de kuruluş yeri seçimi kararı piyasadaki rekabet üstünlüğü ve işletme verimliliğini etkileyen önemli faaliyetlerden biridir. İşletmelerin “yaşam alanı” olarak adlandırılan kuruluş yeri seçimine karar verilirken çeşitli sayısal yöntemlerden yararlanılmaktadır. Bu çalışma ile ÇKKV (Çok Kriterli Karar Verme) tekniklerinden SWARA (Step-Wise Weight Assessment Ratio Analysis) yöntemiyle şube yeri seçiminde kriter önem ağırlıklarının belirlenmesi WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product Assessment) ve ARAS (Additive Ratio Assessment) yöntemleri karşılaştırmalı kullanılarak işletme için en uygun yerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Önerilen model kapsamında, 5 ana kriter ve 15 alt kriter olmak üzere toplam 20 kriter belirlenmiş ve 3 yer alternatifi sunulmuştur. Seçilen konu ve önerilen yaklaşım ile ilgili literatürde sınırlı sayıda çalışma bulunmasından dolayı, bu çalışmanın konusu ve uygulamasıyla diğer çalışmalara yardımcı olması amaçlanmıştır. Çalışma bulgularına göre, en önemli kriterin “Konum” ve işletmenin yeni şubesi için en uygun alternatifin her iki yöntemde de “Esenyurt” olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: SWARA, ARAS, WASPAS, ÇKKV, Yer seçimi

Selection of new branch location with SWARA, ARAS and WASPAS methods: An example of a cargo company in the logistics sector

Abstract: The establishment location is the place where businesses maintain their main activities and economic lives. As the decision of the establishment location is costly and takes a long time to compensate, it is paramount for businesses to make the right choice for location. In cargo businesses, the choice of establishment location is one of the important activities that affect the competitive advantage and operational efficiency in the market. Many quantitative methods are utilized when deciding on the establishment location which is called the "living space" of the business. In the study, determining the criterion importance weights in location selection with the SWARA (Step-Wise Weight Assessment Ratio Analysis) method, which is one of the MCDM (Multi-Criteria Decision Making) techniques, WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product Assessment) and ARAS (Additive Ratio Assessment) methods were used comparatively to determine the most optimal value and appropriate location for the businesses. Within the scope the model, a total of 20 criteria, including 5 main and 15 sub-criteria, and 3 location alternatives were determined. Due to the scarcity of the studies in the literature on the topic and the proposed approach, it is aimed to assist other studies with the subject and implementation of the study. Based on findings, it has been revealed that the most important criterion is “location” and the most suitable alternative for the new branch of the business is “Esenyurt” according to the both methods.

Key words: SWARA, ARAS, WASPAS, MCDM, Selection of location

1. Giriş

Dünya ticaretinde geline nokta; teknolojinin gelişimi, iletişimin hızlanması ve bunlara bağlı olarak erişimin kolaylaşması ile ülkeler arası sınırlar ortadan kalkmış, dolayısı ile işletmeler arasındaki rekabet de artmıştır. İşletmeler rekabet üstünlüğünü elde etmek için fark oluşturmayı hedeflemektedir. Lojistik sektörü de kapsamlı bir çalışma alanına sahip olması ile işletmelerin bu farkı yakalayabileceği alanların başında gelmektedir. Verimli bir lojistik yönetimi ile maliyetler uygun seviyelerde tutulabilir, buna bağlı olarak da fiyatlandırma konusunda bir üstünlük sağlanabilir. Ayrıca müşteri memnuniyeti açısından değerlendirme yapıldığında; teslimat süreleri ve ürünün göndericiden alınıp alıcıya teslim edilmesi sürecinin güvenli bir şekilde gerçekleşmesi de

* Sorumlu yazar: emine.nebati@izu.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-3950-4279, ² 0000-0002-4754-3120, ³ 0000-0003-2785-6426

oldukça önem arz eden konulardır. Bu alanlardaki farkı yaratmak içinse, neredeyse lojistik ile bütünleşmiş olan, taşımacılık kavramı ön plana çıkmaktadır. Taşımacılık; içerisinde farklı ulaşım ağları, çeşitli yol ve güzergâhlar, maliyet, sosyal etkenler gibi birçok faktör barındıran oldukça geniş bir kavramdır. Tüm bunların doğru şekilde planlanması da işletmeleri bir adım öne çıkaracaktır. Bu planlamanın ilk adımı ise yer seçiminin olabilecek en optimal şekilde belirlenmesidir. Yer seçimi, hangi sektörde olduğu fark etmeksizin her işletmenin vermesi gereken en önemli kararlardan biridir. Verilecek bu karar işletmenin amaçlarına en iyi şekilde hizmet edebilecek, gelirlerinin yüksek olmasını sağlarken giderlerini de olabilecek en düşük seviyede tutarak kârı maksimize edebilecek stratejik bir noktada olmalıdır. [1] İşletmenin kuruluş yeri kararının yanlış vermesi, ekonomik ömrü boyunca katlanması gereken ek maliyetlere neden olacaktır. [2] Bu durum da ana hedef olan kârın maksimizasyonu bakımından işletmeyi olumsuz etkileyecektir. Özellikle günümüz dünya koşulları beraberinde ekonominin hızlı değişimini de getirmektedir. Bu nedenle “doğru yerde, doğru yatırım” ilkesi ekonominin en önemli unsurlarından biri haline gelmiştir. Faaliyet alanı taşımacılık olan kargo işletmeleri içinse bu durum çok daha önemlidir.

Bir kargo işletmesi için yeni bir şube ya da depo açmak oldukça yüksek maliyetlerle gerçekleştirilen bir eylemdir. İşletmeyi etkileyecek tüm kriterler göz önüne alınıp ileriye dönük olarak en verimli kuruluş yerinin seçilmesi gerekmektedir. Yazında bu alanda, çeşitli çalışmalara yer verilmiştir. Örnek vermek gerekirse, kargo firması için şube yeri seçimi [3], hastane için uygun yerin belirlenmesi [4], lojistik köy kuruluş yeri belirlenmesi [5], İHA’lar için tesis yeri seçimi [6], hazır giyim işletmesinin kuruluş yeri seçimi [7], afet istasyonlarının yer seçimi [8], rüzgâr enerji santrali yer seçimi [9],[10] AVM kuruluş yer seçimi [11], mermer fabrikasının kuruluş yeri [12], depo için yer seçimi [13],[14] gibi çalışmalara yer verilmiştir. Öne çıkan diğer çalışmalar değerlendirildiğinde, lojistik [15]-[28], mobilya endüstrisi [29], perakende [30], [31] enerji [32], [33] otomotiv [34] gibi çeşitli sektörlerde çalışmaların olduğu söylenebilir. Çalışmalarda, lojistik sektöründe kuruluş yeri seçiminin büyük önem arz ettiği gözlenmiştir.

Kuruluş yeri seçiminde incelenen çalışmalardan yola çıkarak, optimal yer seçimi için çeşitli analizlerin kullanıldığı görülmektedir. Belirlenen alternatiflerin değerlendirilmesinde kullanılacak olan kriterler göz önünde bulundurulduğunda karar verme problemi karmaşık bir yapıdadır. Bu doğrultuda, doğru karar alınabilmesi için ÇKKV gibi matematiksel temellere dayanan yöntemlerin kullanılması doğru olacaktır [35]. Alınacak kararın etkisini anlamak ve değerlendirmek için, kriterlere ait bilgiler sayısallaştırarak ölçülebilen bir duruma dönüştürülmektedir. [36], [37]. Yazındaki incelemeler sonucunda, yer seçiminde en doğru alternatifi belirleyebilmek için, ÇKKV yöntemlerinin sıklıkla tercih edildiği gözlenmiştir. Çalışmada, ÇKKV yöntemlerinden SWARA, WASPAS ve ARAS yöntemleri kullanılmıştır. SWARA yöntemi tercih sebebi, uygulama yönünden basit yapısı, aynı amaç için çalışan farklı disiplinlerdeki insanları ortak noktada buluşturabilmesi ve klasik yöntemlere göre daha yeni ve yazında az sayıda çalışmanın olmasıdır [38]. Ayrıca doğru kuruluş yeri seçiminde çok sayıda kriter etkin rol oynamaktadır. Doğru kararın verilmesi için bu kriterlerin ağırlıklandırılmasının basit ve anlaşılır olması önem arz etmektedir. Bu nedenle SWARA yönteminin seçilmesine karar verilmiştir. WASPAS yöntemi, diğer metotlarla karşılaştırıldığında daha doğru sonuçlar verdiği belirlenmiştir ve bu özelliği metodolojiyi son yıllarda etkin bir karar verme aracı olarak görülmesine katkı sağladığından tercih edilmiştir [39]. ARAS metodu ise, oransal derecelendirmede etkin bir yöntemdir [40]. Sıralamaların yapılmasında belirtilen WASPAS ve ARAS yöntemlerinin beraber kullanılmasında ise, çalışma sonucunun tutarlılığı tespit edilmesi amaçlanmıştır, bu açıdan bahsedilen yöntemlerin uygulama adımlarının benzer olması etkili olmuştur. Çalışmada tercih edilen ÇKKV yöntemlerini yazında ele alan çalışmalar incelendiğinde, Karabaşević ve diğerleri [41] insan kaynaklarında personel seçimi problemini SWARA ve WASPAS yöntemleri ile ele almıştır. İpekçi [42] sualtı akıntısından enerji elde edebilecek bir tesisin seçimi SWARA-WASPAS yöntemleri ile araştırılmıştır. Majeed ve Breesam Bağdan [43] belediyesinde katı atıkların düzenli depolama alanlarının seçim problemini SWARA ile ele alınmıştır. Doğan [44] lojistik sektöründeki bir şirketin satış ve pazarlama departmanı personelleri için performans değerlendirme modeli sunulmuştur. Çalışmada, SWARA ve WASPAS yöntemlerini tercih etmiştir. Yazıcı [45] uluslararası bir diş kliniğinin yer seçim problemini SWARA ve WASPAS ile incelemiştir. Maruf ve Özdemir [46] Türkiye’deki 15 ticari bankanın web sitelerinin performans kriterlerine göre sıralanmasını amaçlanmıştır. Bu kapsamda çalışmada SWARA ve ARAS yöntemlerini kullanılmıştır. Yücenur ve İpekçi [47] yenilenebilir enerji üretimi için tesis yer seçimi problemini ele almış ve SWARA-WASPAS yöntemleri ile değerlendirmiştir. Maruf [48] E-ticaret sitelerinin SWARA-ARAS yöntemleri ile performanslarına göre sıralanması konusunda çalışma yapmıştır. Akpınar [49] üçüncü parti lojistik sağlayıcısı seçimi problemini SWARA-WASPAS yöntemleri üzerinden ele almıştır. Terzioğlu ve diğerleri [50] Borsa İstanbul enerji sektöründeki firmaların finansal performansları SWARA-VIKOR ve SWARA-WASPAS metotlarıyla karşılaştırmıştır.

Bu çalışmada, bir kargo firması için kuruluş yeri seçimi problemi ele alınmıştır. Çalışmanın amacı, işletme için kuruluş yeri seçimi aşamasında, bu seçimi etkileyen faktörlerden yararlanarak alternatifler arasından işletme

için en uygun yeri belirlemektir. Önerilen modelde, yazındaki çeşitli kaynaklardan ve kurumdaki karar verici görüşlerinden faydalanılarak kuruluş yeri seçimini etkileyen 5 ana ve 15 alt kriter belirlenmiştir. Çalışma kapsamında, yer seçimini etkileyen kriterlerin önem ağırlıklandırılması SWARA metodu ile 3 alternatifin sıralaması ise, WASPAS ve ARAS yöntemleri ile karşılaştırmalı belirlenmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde, belirlenen yer seçimi problemi ve yöntemler ile ilgili literatür taraması kısmı yer almaktadır. Üçüncü bölümünde, kullanılan yöntemlere yer verilmiştir. Dördüncü bölümünde lojistikte kuruluş yeri seçimi probleminin Kargo Firması uygulaması ve duyarlılık analizi yer almaktadır. Çalışmanın son bölümünde ise sonuç ve gelecek çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

2. Metodoloji

Kuruluş yeri seçimi probleminin çözümü için kullanılan yöntemler belirlenirken yazın araştırması yapılmış ve bir kargo firması için kuruluş yeri seçiminde SWARA, WASPAS ve ARAS yöntemlerinin kullanımının oldukça az olduğu görülmüştür. Bu nedenle çalışmada, SWARA tabanlı WASPAS ve ARAS yöntemleri karşılaştırmalı analizler ile kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan SWARA yöntemi uzman odaklı yöntem olarak da adlandırılmaktadır. WASPAS yöntemi ise, alternatiflerin kriter bazındaki performans değerlerini kullanması ve alternatiflere ilişkin bir sıralama sunmaktadır [51]. ARAS yönteminde ise, çalışmadaki alternatiflerin fayda fonksiyon değerleri ve optimal alternatife ait fayda fonksiyon değerleri karşılaştırılır [52].

2.1 Kriterlerin ve alternatiflerin belirlenmesi

Kuruluş yeri seçimi her sektör için verilmesi gereken en önemli kararlardan biridir. Lojistik sektörü içinde yer alan kargo işletmelerinde de bu karar oldukça önemlidir. Kargo taşımacılığı kargonun zamanında ve sağlam bir şekilde ulaştırılmasını kapsayan lojistik faaliyetlerdir. Kargo işletmeleri kuruluş yerini belirlerken işletme hedeflerini ve fonksiyonlarını en verimli şekilde gerçekleştirebilecekleri bir yer seçmeyi amaçlamaktadır. Çünkü verilecek bu karar hem oldukça maliyetli ve uzun dönemli planlama gerektiren bir girişim sürecidir. Bu nedenle işletme kuruluş yeriyle ilgili karar alırken birçok faktör göz önünde bulundurulmalıdır. Kuruluş yeri seçimini etkileyen kriterleri belirlemek ve bu kriterleri analiz etmek için lojistikte kuruluş yeri seçimi ile ilgili geçmiş çalışmalar incelenmiştir. Yapılan incelemelerden yola çıkarak kriterler belirlenmiş ve Tablo 1’de kriterlerin açıklamaları, Tablo 2’de ise, kriterlerin referans tablosu paylaşılmıştır. Alternatif olarak ise, Alternatif olarak ise, Esenyurt – Arnavutköy – Levent olarak üç lokasyon belirlenmiştir.

Tablo 1. Yer seçim probleminde kullanılan kriterler

Kriter Adı	Alt Kriter Açıklaması
Ekonomik Ana Kriteri	Kuruluş yeri seçimi yapılırken ele alınması gereken en önemli faktörlerden biri ekonomik faktörlerdir. Yer seçiminde daha az gider gerektiren ve daha az masraflı olanın seçilmesi amaçlanır.
<i>Arazi Maliyeti</i>	Bir lojistik firması için kuruluş yeri seçiminde önemli olan faktörlerden biri, kurulması düşünülen ildeki veya bölgedeki birim metrekare arazi fiyatlarıdır. Fiyatlara bağlı olarak kuruluş yeri seçiminde değişiklikler olabilir.
<i>Pazar Fırsatları</i>	Kurulacak yerdeki pazarın genişliği, pazarda firmanın rakipleri, karlılık ve pazarın büyüme potansiyeli gibi faktörler yer seçimini doğrudan etkileyen noktalardır.
<i>Taşıma Maliyeti</i>	Bir lojistik firması için hiç kuşkusuz en önemli şeylerden biri de taşımadır. Kargoların taşınması sırasında ulaşım ve nakliye için teslim şekline göre yakıt, navlun ve sigorta giderleri lojistik firması için yer seçiminde önemli bir kriterdir.
Çevre Ana Kriteri	Seçilecek kuruluş yerinde insanların etkileşim içinde oldukları fiziki, sosyal, biyolojik ve kültürel ortamın ele alınmasıdır.
<i>Afet Bölgesi</i>	Yer seçimi yapılırken ayrıca seçim yapılacak bölgenin muhtemel afet bölgelerine uzak olması da hem can hem mal güvenliği açısından önemli bir kriter olarak yer almaktadır.
<i>Kentsel Trafik Oranı</i>	Bir lojistik merkezi için zaman önemli bir faktördür. Seçilecek bölgenin trafik yoğunluğu lojistik firmasının kendi yaratacağı trafik yoğunluğu ile trafik sıkışmasına sebep olabilir. Bu durum firmanın faaliyetlerinde aksamaya sebep olabilir. Bu nedenle trafik yoğunluğu önemli bir kriterdir.
<i>Çevresel Sürdürülebilirlik</i>	Hava kirliliği, su kullanımı, enerji kullanımı, katı atıkların çevreye az zararlı toplanması gibi çevreye duyarlı adımların atılması önemli bir kriterdir.
Sosyal Ana Kriteri	Seçilecek kuruluş yerinde insanların ve sosyal organizmaların ilişkilerini dikkate alan, aynı zamanda toplumla ilgisini inceleyen kriterlerdir.
<i>İş İklimi</i>	Her sektörde olduğu gibi lojistik sektörü için de iş gücü oldukça önemli bir etmendir. Seçilecek bölgedeki istihdam, işsizlik oranı, çalışanların kazançları ve iş memnuniyeti lojistik merkezi seçiminde önemli kriterlerden biridir.
<i>Kanunlar ve Politika</i>	Bölgede iş yeri açmak için gerekli hukuksal düzenlemelerin sağlanması.
<i>Emniyet ve Güvenlik</i>	Diğer kriterlerle beraber seçilecek bölgenin hırsızlık, terör olayları gibi faktörden uzak güvenli bir alanda kurulmuş olması yer seçimi kriterleri arasında yer almaktadır.
Konum Ana Kriteri	Lojistik sektörü için bir diğer trafik yoğunluğu önemli bir kriter olan konum, seçilecek yerin belirlenmesinde sosyal ve beşeri şartları ele alarak belirlenir.
<i>Taşıma Modu Sayısı</i>	Lojistik sektörü için ulaşım konusu oldukça önemli bir yere sahiptir. Seçilecek bölgede aktif kullanılacak ulaşım modu sayısı- yollar, demiryolları, hava yolu ve deniz yolu- kargoların müşterilere zamanında ulaşması açısından önemli bir kriterdir.
<i>Tedarikçilere Yakınlık</i>	Seçilen bölgenin, lojistik firmasının anlaşmalı olduğu tedarikçilerinin depo yerlerine yakın olması, lojistik firmasının kargoları taşınması konusunda pozitif etki sağlayacaktır.
<i>Ulaşım</i>	Lojistik sektöründe tüketicilerin ihtiyaçlarının karşılanmasındaki en önemli kriterlerden biri de ulaşım imkânlarıdır. Seçilecek bölgenin ulaşım imkânlarına yakın olması gerekmektedir. Bunlar anayolları, limanlar, havaalanları, demiryolları olabilir.
<i>İmkânlarına Yakınlık</i>	Seçilecek bölgenin işletme amaçlarına uygunluğu ve sonradan yapılabilecek değişikliklere esnek olabilmesine olanak sağlayan kriterlerdir.
Arazi Ana Kriteri	Lojistik firmaları için depolama alanları kilit rol oynamaktadır. Bu yüzden seçilen bölgede saklanacak kargoların depolama ve stok alanı yer seçimini doğrudan etkileyen faktörlerin arasında yer almaktadır.
<i>Kapasite:</i>	Lojistik firmasında yaşanan durumlara göre depo alanında genişlemeye ihtiyaç duyduğu zamanlar olabilir. Seçilecek bölgenin duruma göre kargolarda yaşanan artmalardan kaynaklı gelecek için genişlemeyebilme/büyüme imkânının olup olmadığı önemli bir etmendir.
<i>Genişleme Olanakları</i>	Seçilecek bölgenin doğalgaz, su, elektrik, internet imkânları gibi altyapının uygunluğu.
<i>Altyapı Olanakları</i>	

Tablo 2. Yer seçim probleminde kullanılan kriterlerin kaynakları

Ana/Alt Kriterler	(Keleş ve Pekkaya 2020)	(Yalçın 2020)	(Yılmaz 2019)	(Erdal ve Aydoğmuş 2019)	(Sürmeli ve vd. 2015)	(Atalay ve vd. 2017)	(İmren ve vd. 2016)	(Yavuz ve Deveci 2014)	(Önel 2014)	(Pham ve vd. 2017)	(Pamuçar ve Božanić 2019)
Ekonomi	√			√	√	√	√				√
Arazi Maliyeti	√		√	√			√		√	√	
Pazar Fırsatları	√										
Taşıma Maliyeti	√				√		√		√	√	
Çevre	√				√	√	√		√		
Afet Bölgesi		√				√					
Kentsel Trafik Oranı	√		√	√		√		√			√
Çevresel Sürdürülebilirlik	√									√	√
Sosyal	√			√		√		√			
İş İklimi	√	√							√		
Kanunlar ve Politika	√							√	√	√	
Emniyet ve Güvenlik		√	√			√					
Konum	√			√	√						
Taşıma modu sayısı	√								√		√
Tedarikçilere Yakınlık		√	√	√				√	√	√	√
Ulaşım imkânlarına yakınlık	√	√	√	√		√				√	√
Arazi	√		√	√							
Kapasite	√			√			√				√
Genişleme	√			√		√		√		√	√
Olanakları											
Altyapı Olanakları	√		√	√				√			√

2.2 SWARA yöntemi

Keršulienė, Zavadskas ve Turskis 2010 yılında SWARA (Step-Weight Assessment Ratio Analysis) yöntemini geliştirmiştir. ÇKKV yöntemlerinden biri olan bu yöntem birçok problemin çözümünde uygulanmış ve başarıya ulaşmıştır [53]. SWARA yönteminin uygulamasında 5 temel adım bulunmaktadır. Bu adımlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir [54].

Adım 1: Uzman görüşleri doğrultusunda problemin çözümü için belirlenen kriterlerin önem sırası belirlenir. Bu sıralama azalan düzende yapılır.

Adım 2: Kriterlerin göreceli önem düzeyleri belirlenir. Sıralamanın en başındaki kriter j . Kriter olarak adlandırıldığında, kendinden bir sonraki kriter yani $(j + 1)$. Kriter ile j . Kriter arasındaki fark belirlenir. Burada bulunan değer s_j (ortalama değerlerin karşılaştırmalı önemi) olarak ifade edilir.

Adım 3: Her kriter için k_j katsayısı Eşitlik 1'e göre belirlenir.

$$k_j = \begin{cases} 1, & j = 1 \\ s_j + 1, & j > 1 \end{cases} \quad (1)$$

Adım 4: Kriterlerin q_j önem vektörü Eşitlik 2'ye göre belirlenir.

$$q_j = \begin{cases} 1, & j = 1 \\ \frac{q_{j-1}}{k_j}, & j > 1 \end{cases} \quad (2)$$

Adım 5: Kriterlere ait nihai önem ağırlıkları w_j , Eşitlik 3 ile hesaplanır. Bu hesaplanan değer w_j , j kriterinin göreceli önemini gösterir.

$$w_j = \frac{q_j}{\sum_{k=1}^n q_k} \quad (3)$$

2.3 ARAS yöntemi

ARAS yöntemi (Additive Ratio Assessment) E.K. Zavadskas ve Z. Turskis tarafından 2010'da ortaya çıkarılmıştır. Bu yöntemle göre, alternatiflerin performans düzeyleri ve ideal alternatife oranları hesaplanabilir [57]. Yöntemin uygulama aşamaları sırasıyla şu şekildedir [58]:

Adım 1: Karar verme matrisi oluşturulmaktadır. Aşağıda gösterilen karar verme matrisinde “m”, alternatifleri ve “n”, kriterleri ifade etmektedir. “ x_{ij} ” j kriterine göre i alternatifinin performans değerini temsil eden değerdir. “ x_{0j} ” ise j kriterinin optimal değeridir.

$$X = \begin{bmatrix} x_{01} & \cdot & x_{0j} & \cdot & x_{0n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ x_{i1} & \cdot & x_{ij} & \cdot & x_{in} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ x_{m1} & \cdot & x_{mj} & \cdot & x_{mn} \end{bmatrix}; i = 0, \dots, m; j = 1, \dots, n \quad (4)$$

Eğer en iyi j kriteri değeri bilinmiyorsa;

Eğer $\max_i x_{ij}$ tercih edilirse, $x_{0j} = \max_i x_{ij}$,

Eğer $\min_i x_{ij}^*$ tercih edilirse, $x_{0j} = \min_i x_{ij}^*$ olur.

Adım 2: Karar verme matrisi normalize edilir. Normalleştirilmiş karar verme matrisi \bar{X} 'in, \bar{x}_{ij} değerleri tanımlanır.

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} \hat{x}_{01} & \cdot & \hat{x}_{0j} & \cdot & \hat{x}_{0n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \hat{x}_{i1} & \cdot & \hat{x}_{ij} & \cdot & \hat{x}_{in} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \hat{x}_{m1} & \cdot & \hat{x}_{mj} & \cdot & \hat{x}_{mn} \end{bmatrix}; i = 0, \dots, m; j = 1, \dots, n \quad (5)$$

Tercih edilen değerleri maksimum olan kriterler aşağıdaki gibi normalize edilir:

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=0}^m x_{ij}} \quad (6)$$

Tercih edilen değerleri minimum olan kriterler, iki aşamalı prosedür uygulayarak normalleştirilir:

$$x_{ij} = \frac{1}{x_{ij}^*}; \bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=0}^m x_{ij}} \quad (7)$$

Adım3: Normalleştirilmiş ağırlıklı matrisi \bar{X} tanımlamaktır. $0 < w_j < 1$ olan ağırlıkları olan kriterleri değerlendirmek mümkündür. Ağırlıkların toplamı w_j şu şekilde sınırlandırılacaktır:

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad (8)$$

$$\hat{X} = \begin{bmatrix} \hat{x}_{01} & \cdot & \hat{x}_{0j} & \cdot & \hat{x}_{0n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \hat{x}_{i1} & \cdot & \hat{x}_{ij} & \cdot & \hat{x}_{in} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \hat{x}_{m1} & \cdot & \hat{x}_{mj} & \cdot & \hat{x}_{mn} \end{bmatrix}; i = 0, \dots, m; j = 1, \dots, n \quad (9)$$

Bütün kriterlerin normalleştirilmiş ağırlıklı değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\hat{x}_{ij} = \bar{x}_{ij} w_j; i = 0, \dots, m \quad (10)$$

Yukarıdaki denklemde yer alan " w_j " j kriterinin ağırlığını (önemi) ve " \bar{x}_{ij} ", j kriterinin normalize edilmiş değerini göstermektedir.

Adım 4: ARAS yönteminin son adımında, alternatiflerin değerlendirilmesi için aşağıdaki denklem optimalite fonksiyonunun değerlerini belirlemektedir:

$$S_i = \sum_{j=1}^n \hat{x}_{ij}; i = 0, \dots, m \quad (11)$$

Burada " S_i ", i alternatifinin optimalite fonksiyonunun değeridir. Alternatiflerin öncelikleri S_i değerine göre belirlenebilir. Alternatifin fayda derecesi, analiz edilen değişkenin, ideal olarak en iyi bir S_0 ile karşılaştırılmasıyla saptanır. Alternatif bir a_i 'nin fayda derecesi K_i 'nin hesaplanması için kullanılan Eşitlik 20 aşağıda verilmiştir:

$$K_i = \frac{S_i}{S_n}; i = 0, \dots, m \quad (12)$$

Adım 5: Eşitliklerde yer alan " S_i " ve " S_0 " optimalite kriter değerleridir. Hesaplanan K_i değerleri [0,1] aralığındadır. Alternatifler " K_i " değerlerine göre sıralanır.

2.4 WASPAS yöntemi

2012 yılında geliştirilmiş yeni bir yöntem olan WASPAS yöntemi mevcut alternatiflerin değerlendirilmesinde ve sıralanmasında kullanılmaktadır. [48] WASPAS yönteminde Ağırlıklı Toplam Modeli (WSM-Weighted Sum Model) ve Ağırlıklı Çarpım Modellerinin (WPM-Weighted Product Model) birlikte kullanılması geliştirilen bir yöntemdir. Bu iki yöntemin birlikte kullanılması sonuçların güvenilirliğini arttırmakta ve sıralamanın doğru şekilde gerçekleşmesini sağlamaktadır. Ayrıca, duyarlılık analizi ile sonucun tutarlılığı kontrol edilebilir [56]. Yöntemin uygulama aşamalarında yer alan değişkenler aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

- m : karar alternatif sayısı ($i = 1, 2, 3, \dots, m$)
- n : değerlendirme kriteri sayısı ($j = 1, 2, \dots, n$)
- x_{ij} j. değerlendirme kriterine göre i. alternatifin aldığı değer ($j=1, 2, \dots, n$)
- x_{ij}^* j. değerlendirme kriterine göre i. alternatifin aldığı normalize edilmiş değer ($j=1, 2, \dots, n$)
- w_j : j. değerlendirme kriterinin ağırlığı ($j = 1, 2, \dots, n$)

Adım 1: İlk aşamada x_{ij} değerlerinden oluşan karar matrisi Eşitlik 4'te gösterilen şekilde oluşturulmuştur.

$$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Adım 2: Karar matrisindeki alternatifleri normalize etmek için ise aşağıda belirtilen iki denklemden yararlanılmaktadır. Normalizasyon işleminde fayda sağlayan kriterler için Eşitlik 5' den, fayda sağlamayan maliyet yönlü kriterler için Eşitlik 6'den yararlanılır. Eşitlikler aşağıda belirtildiği gibidir:

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\max_i(x_{ij})} \quad (14)$$

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

$$x_{ij} = \frac{\min_i(x_{ij})}{x_{ij}} \quad (15)$$

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

Adım 3: Bu iki eşitlik göz önüne alınarak eş zamanlı en iyi ölçüm kriteri aranmaktadır. Ağırlıklı ortalama başarı kriteri, VSM yöntemiyle benzerlik göstermektedir. Ağırlıklı toplam modeli (WSM) ile alternatiflerin toplam görelî önemleri hesaplanabilmektedir. Bu da Eşitlik 7 'te ki şekilde yapılmaktadır:

$$Q_i^{(1)} = \sum_{j=1}^n w_j x_{ij}^* \quad (16)$$

Adım 4: Bu adımda alternatiflerin toplam göreceli önemi hesaplanmaktadır. Bir alternatifin kriter bazında aldığı normalize değerlerin kriter ağırlığı kadar kuvveti alınarak ve bulunan değerlerin her bir alternatif için sırasıyla çarpılmasıyla belirlenir. Eşitlik 8 yardımıyla hesaplanır.

$$Q_i^{(2)} = \prod_{j=1}^n (x_{ij}^*)^{w_j} \quad (17)$$

Adım 5: Bu aşamada Eşitlik 9 yardımıyla ağırlıklandırılmış ortak genel kriter değeri (Q_i) hesaplanır.

$$Q_i = 0,5Q_i^{(1)} + 0,5 Q_i^{(2)} = 0,5 \prod_{j=1}^n x_{ij}^* w_j + 0,5 \prod_{j=1}^n (x_{ij}^*)^{w_{ij}} \quad (18)$$

Adım 6: Alternatiflerin göreceli ve toplam önem düzeylerini belirlemek için Eşitlik 10'da gösterilen formül kullanılmaktadır:

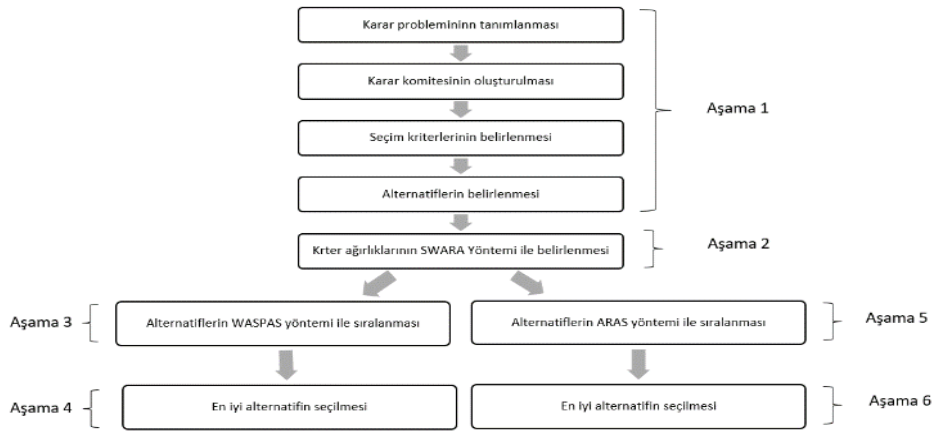
$$Q_i = \lambda Q_i^{(1)} + (1 - \lambda) Q_i^{(2)} = \lambda \sum_{j=1}^n (x_{ij}^*) w_j + (1 - \lambda) \prod_{j=1}^n (x_{ij}^*)^{w_{ij}} \quad (19)$$

Ayrıca formüllerde kullanılan λ değeri WASPAS yönteminde kullanılan bir parametredir. Eşitlik 11'de gösterilen formülle hesaplanmaktadır.

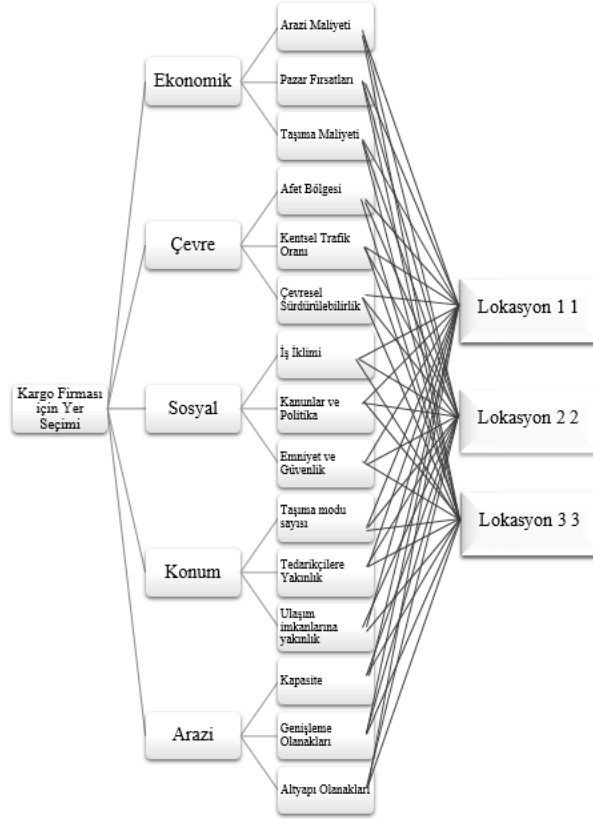
$$\lambda = Q_i^{(2)} \frac{\sigma^2(Q_i^{(2)})}{\sigma^2(Q_i^{(1)}) + \sigma^2(Q_i^{(2)})} \quad (20)$$

3. Uygulama

Çalışmanın bu bölümünde SWARA, WASPAS ve ARAS yöntemlerinin uygulama sonuçlarına yer verilmiştir. Çalışmada önerilen model kapsamında, lojistik sektöründe kuruluş yer seçimi için 5 ana kriter ve 15 alt kriter ve 3 yer alternatif yer seçimi belirlenmiştir. SWARA ile kriterlerin ağırlıklandırılması, WASPAS ve ARAS yöntemleri ile alternatiflerin sıralaması yapılmıştır. Önerilen araştırma metodolojisi Şekil 1 ve önerilen model Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Önerilen araştırma metodolojisi



Şekil 2. Önerilen model şeması

3.1 SWARA uygulaması

Bu bölümde, ana ve alt kriterlere ait kriter ağırlıkları SWARA yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

3.1.1 Ana kriterlerin SWARA yöntemi ile ağırlıklandırılması

Kargo işletmesi için en iyi kuruluş yeri seçiminde kullanılan ana kriterler Tablo 3' de sunulmuştur.

Tablo 3. Ana kriterler

Ana Kriterler	
C1	Ekonomik
C2	Çevre
C3	Sosyal
C4	Konum
C5	Arazi

Tablo 3' de ki değerlendirme kriterlerinin önem düzeylerinin belirlenebilmesi için üç karar verici belirlenmiştir. Öncelikle kriterlerin önem sırası tüm karar vericiler tarafından belirlenmiştir. Daha sonra her bir karar vericiye göre değerlendirme kriterlerinin göreceli önem düzeyleri elde edilmiştir. Bu adımda, ikinci kriterden başlanarak her bir kriter kendinden bir önceki kriter (j) ile karşılaştırılmış ve kriterleri birbirlerine göre karşılaştırmalı önemleri (s_j) belirlenmiştir. Eşitlik 1 ile kriterlerin karşılaştırmalı önemlerine ait katsayılar (k_j) elde edilmiştir. Kriterlerin q_j önem vektörü Eşitlik 2'ye göre belirlenmiştir. Sonra, kritere ait nihai önem ağırlıkları w_j , Eşitlik 3 ile hesaplanmıştır. Tüm karar vericiler için adımlar tekrar edilmiştir.

Adım 1- 2-3: Karar Verici 1-2-3 için değerlendirme sonuçları Tablo 4, Tablo 5 ve Tablo 6' da gösterilmiştir.

Tablo 4. KV- 1 kriter ağırlıkları

KV- 1							
Kriterler	Önem Sırası	Sıralama	sj	kj	qj	wj	
C 1	4	C 4	1	1	1	0,238	
C 2	2	C 2	2	0,1	1,1	0,952	0,227
C 3	5	C 5	3	0,1	1,1	0,907	0,216
C 4	1	C 1	4	0,2	1,2	0,756	0,180
C 5	3	C 3	5	0,3	1,3	0,581	0,139

Tablo 5. KV- 2 kriter ağırlıkları

KV- 2							
Kriterler	Önem Sırası	Sıralama	sj	kj	qj	wj	
C 1	1	C 1	1	1	1	0,305	
C 2	3	C 4	2	0,3	1,3	0,8	0,244
C 3	4	C 2	3	0,4	1,4	0,571	0,174
C 4	2	C 3	4	0,2	1,2	0,476	0,145
C 5	5	C 5	5	0,1	1,1	0,433	0,132

Tablo 6. KV- 3 kriter ağırlıkları

KV- 3							
Kriterler	Önem Sırası	Sıralama	sj	kj	qj	wj	
C 1	2	C 4	1	1	1	0,360	
C 2	3	C 1	2	0,4	1,4	0,714	0,257
C 3	5	C 2	3	0,6	1,6	0,446	0,161
C 4	1	C 5	4	0,2	1,2	0,388	0,140
C 5	4	C 3	5	0,7	1,7	0,228	0,082

Adım 4: Tüm karar vericiler için ayrı hesaplanan kriter ağırlıklarının (q_j değerleri) geometrik ortalamaları alınarak genel kriter ağırlıkları Tablo 7' de elde edilmiştir.

Tablo 7. Nihai ana kriterlerin ağırlıkları

Son Ağırlıklar					
Kriterler	KV- 1	KV- 2	KV- 3	Son Kriter Ağırlığı	Sıralama
C 1	0,180	0,305	0,257	0,242	2
C 2	0,227	0,174	0,161	0,185	3
C 3	0,139	0,145	0,082	0,118	5
C 4	0,238	0,244	0,360	0,276	1
C 5	0,216	0,132	0,140	0,159	4

Adım 5: Tablo 7' de belirlenen ağırlıklara göre şube yeri seçimi için en önemli kriter C4 (Konum) kriteri (0,276) iken, en az öneme sahip kriter C3 (Sosyal) (0.118) kriteridir.

3.1.2. Alt Kriterlerin SWARA Yöntemi ile Ağırlıklandırılması

Tablo 8' da kuruluş yeri seçiminde kullanılan alt kriterler gösterilmiştir.

Tablo 8. Alt kriterler

KRİTER	ALT KRİTER
C1: Ekonomik	C1.1: Arazi Maliyeti
	C1.2: Pazar Fırsatları
	C1.3: Taşıma Maliyeti
C2: Çevre	C2.1: Afet Bölgesi
	C2.2: Kentsel Trafik Oramı
	C2.3: Çevresel Sürdürülebilirlik
C3: Sosyal	C3.1: İş İklimi
	C3.2: Kanunlar ve Politika
	C3.3: Emniyet ve Güvenlik
C4: Konum	C4.1: Taşıma Modu Sayısı
	C4.2: Tedarikçilere Yakınlık
	C4.3: Ulaşım İmkanlarına Yakınlık
C5: Arazi	C5.1: Kapasite
	C5.2: Genişleme Olanakları
	C5.3: Altyapı Olanakları

Adım 1: Ana kriter hesaplamaları alt kriterler içinde tekrar edilmiştir. Tablo 8’ de alt kriterler önem düzeylerini üç karar verici belirlemiştir. Öncelikle alt kriterlerin önem sırasını her karar verici belirlemiştir

Adım 2: Her karar vericiye göre değerlendirme alt kriterlerinin göreceli önem düzeyleri belirlenmiştir. Ardından, ikinci kriterden başlanarak her bir alt kriter kendinden bir önceki alt kriter (j) ile karşılaştırılmış ve alt kriterlerin birbirlerine göre karşılaştırmalı önemleri (s_j) belirlenmiştir.

Adım 3: Eşitlik 1 ile alt kriterlerin karşılaştırmalı önemlerine ait katsayılar (k_j) elde edilmiştir.

Adım 4: Alt Kriterlerin q_j önem vektörü Eşitlik 2’ye ile elde edilmiştir. Son olarak, alt kriterlere ait nihai önem ağırlıkları w_j , Eşitlik 3 ile hesaplanmış ve diğer karar vericiler için aynı adımlar tekrar edilmiştir.

Adım 5: Karar verici 1-2-3 için alt kriterlerin ağırlıkları elde edilmiştir. Bu sonuçlar sırasıyla Tablo 9, Tablo 10 ve Tablo 11’ de gösterilmiştir.

Tablo 9. Karar verici 1'e göre alt kriterlere ait ağırlıklar

KV- 1						
Alt Kriterler	Önem Sırası	Sıralama	s_j	k_j	q_j	w_j
C 1						
C 1.1	3	C 1.2	1	1	1	0,370
C 1.2	1	C 1.3	2	0,1	1,1	0,909
C 1.3	2	C 1.1	3	0,2	1,2	0,791
C 2						
C 2.1	3	C 2.3	1	1	1	0,371
C 2.2	2	C 2.2	2	0,2	1,2	0,870
C 2.3	1	C 2.1	3	0,1	1,1	0,828
C 3						
C 3.1	3	C 3.3	1	1	1	0,396
C 3.2	2	C 3.2	2	0,2	1,2	0,833
C 3.3	1	C 3.1	3	0,2	1,2	0,694
C 4						
C 4.1	2	C 4.2	1	1	1	0,350
C 4.2	1	C 4.1	2	0,1	1,1	0,952
C 4.3	3	C 4.3	3	0,1	1,1	0,907
C 5						
C 5.1	2	C 5.3	1	1	1	0,355
C 5.2	3	C 5.1	2	0,1	1,1	0,952
C 5.3	1	C 5.2	3	0,1	1,1	0,866

Tablo 10. Karar verici 2'ye göre alt kriterlere ait ağırlıklar

KV- 2							
Alt Kriterler	Önem Sırası	Sıralama	sj	kj	qj	wj	
C 1							
C 1.1	1	C 1.1	1	1	1	0,481	
C 1.2	2	C 1.2	2	0,7	1,7	0,588	0,283
C 1.3	3	C 1.3	3	0,2	1,2	0,490	0,236
C 2							
C 2.1	3	C 2.2	1	1	1	0,504	
C 2.2	1	C 2.3	2	0,8	1,8	0,556	0,280
C 2.3	2	C 2.1	3	0,3	1,3	0,427	0,216
C 3							
C 3.1	3	C 3.3	1	1	1	0,370	
C 3.2	2	C 3.2	2	0,3	1,3	0,909	0,337
C 3.3	1	C 3.1	3	0,6	1,6	0,791	0,293
C 4							
C 4.1	3	C 4.2	1	1	1	0,491	
C 4.2	1	C 4.3	2	0,5	1,5	0,667	0,327
C 4.3	2	C 4.1	3	0,8	1,8	0,370	0,182
C 5							
C 5.1	1	C 5.1	1	1	1	0,533	
C 5.2	2	C 5.2	2	0,9	1,9	0,526	0,280
C 5.3	3	C 5.3	3	0,5	1,5	0,351	0,187

Tablo 11. Karar verici 3'e göre alt kriterlere ait ağırlıklar

KV- 3							
Alt Kriterler	Önem Sırası	Sıralama	sj	kj	qj	wj	
C 1							
C 1.1	3	C 1.2	1	1	1	0,398	
C 1.2	1	C 1.3	2	0,4	1,4	0,741	0,295
C 1.3	2	C 1.1	3	0,3	1,3	0,769	0,306
C 2							
C 2.1	2	C 2.2	1	1	1	0,429	
C 2.2	1	C 2.1	2	0,3	1,3	0,800	0,343
C 2.3	3	C 2.3	3	0,5	1,5	0,533	0,229
C 3							
C 3.1	3	C 3.3	1	1	1	0,401	
C 3.2	2	C 3.2	2	0,3	1,3	0,800	0,321
C 3.3	1	C 3.1	3	0,2	1,2	0,696	0,279
C 4							
C 4.1	2	C 4.2	1	1	1	0,466	
C 4.2	1	C 4.1	2	0,6	1,6	0,63	0,291
C 4.3	3	C 4.3	3	0,2	1,2	0,521	0,243
C 5							
C 5.1	1	C 5.1	1	1	1	0,386	
C 5.2	3	C 5.3	2	0,2	1,2	0,833	0,322
C 5.3	2	C 5.2	3	0,1	1,1	0,758	0,292

Adım 6: Tüm karar vericiler için hesaplanan alt kriter ağırlıklarının (q_j değerleri) geometrik ortalamaları bulunmuş ve genel kriter ağırlıkları elde edilmiştir. Elde edilen kriter ağırlıkları Tablo 12' te gösterilmiştir.

Tablo 12. Nihai alt kriter ağırlıkları

Alt Kriterler	Son Ağırlıklar			Son Kriter Ağırlığı	Sıralama
	KV- 1	KV- 2	KV- 3		
C 1					
C 1.1	0,293	0,481	0,306	0,351	1
C 1.2	0,370	0,283	0,398	0,347	2
C 1.3	0,337	0,236	0,295	0,286	3
C 2					
C 2.1	0,307	0,504	0,343	0,376	1
C 2.2	0,332	0,280	0,429	0,342	2
C 2.3	0,371	0,216	0,229	0,264	3
C 3					
C 3.1	0,275	0,293	0,279	0,282	3
C 3.2	0,330	0,337	0,321	0,329	2
C 3.3	0,396	0,37	0,401	0,389	1
C 4					
C 4.1	0,333	0,491	0,291	0,362	2
C 4.2	0,350	0,327	0,466	0,377	1
C 4.3	0,317	0,182	0,243	0,241	3
C 5					
C 5.1	0,338	0,533	0,386	0,411	1
C 5.2	0,307	0,280	0,292	0,293	2
C 5.3	0,355	0,187	0,322	0,277	3

Tablo 12’de belirlenen değerlere göre alt kriterlerin kendi içinde önem sıraları belirlenmiştir. C1 (Ekonomik) kriterlerde en önemlisi C1.1 (Arazi Maliyeti) iken en az önemli kriter C1.3 (Taşıma Maliyeti) olmuştur. C2 (Çevre) kriterinin en önemli alt kriteri C2.1 (Afet Bölgesi) olarak belirlenirken, C3 (Sosyal) kriterinin en önemli alt kriteri C3.3 (Emniyet ve Güvenlik), C4 (Konum) için en önemli alt kriterin C4.2 (Tedarikçilere Yakınlık) ve C5 (Arazi) için en önemli alt kriterin C5.1 (Kapasite) olduğu saptanmıştır.

Tablo 13. Kriterlerin global ağırlıkları

Ana Kriterler	Alt Kriterler	Yerel Ağırlık	Global Ağırlık
C 1		0,242	
	C 1.1	0,351	0,085
	C 1.2	0,347	0,084
	C 1.3	0,286	0,069
C 2		0,185	
	C 2.1	0,376	0,070
	C 2.2	0,342	0,063
	C 2.3	0,264	0,049
C 3		0,118	
	C 3.1	0,282	0,033
	C 3.2	0,329	0,039
	C 3.3	0,389	0,046
C 4		0,276	
	C 4.1	0,362	0,100
	C 4.2	0,377	0,104
	C 4.3	0,241	0,066
C 5		0,159	
	C 5.1	0,411	0,065
	C 5.2	0,293	0,046
	C 5.3	0,277	0,044

Önceki aşamalarda bulunan ana kriterlerin yerel ağırlıkları, bulunan alt kriter ağırlıklarıyla çarpılarak alt kriterlerin global ağırlıkları belirlenmiştir. Tablo 14’ de bulunan değerlere göre C1.1 (Arazi Maliyeti), C1(Ekonomik) kriterinin en yüksek ağırlığa sahip alt kriteridir. Aynı zamanda C2.1 (Afet bölgesi), C2 (Çevre) için, C3.3(Emniyet ve Güvenlik) C3 (Sosyal) kriteri için, C4.1 (Tedarikçilere Yakınlık), C4 (Konum) için ve C5.1

(Kapasite), C5 (Arazi) için en yüksek global ağırlığa sahip alt kriterlerdir. Bulunan global ağırlıklar en iyi alternatifin belirlenmesinde kullanılacak WASPAS ve ARAS yöntemlerinde de kullanılacaktır.

3.2 ARAS uygulaması

ARAS yönteminin ilk adımında, karar matrisi oluşturulur. Karar vericiler 1-5 skalasını baz alarak Çok iyi:5, İyi:4, Orta:3, Kötü:2 ve Çok kötü:1 olmak üzere kriterleri değerlendirmiştir.

Adım 1: Değerlendirme sonucunda karar vericilerin verdikleri puanların geometrik ortalaması alınmış ve kriterlerin maliyet yönü (min) ve fayda yönü (max) olduğu karar matrisinde Tablo 14'de yer verilmiştir.

Tablo 14. Karar matrisi

Alternatifler/Kriterler	C 1.1	C 1.2	C 1.3	C 2.1	C 2.2	C 2.3	C 3.1	C 3.2	C 3.3	C 4.1	C 4.2	C 4.3	C 5.1	C 5.2	C 5.3
Kriter Yönü	(-)	(+)	(-)	(-)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)
A 1	3,634	5,000	2,884	1,587	1,587	2,621	1,817	3,634	3,634	2,884	1,817	2,621	2,621	1,817	2,289
A 2	3,634	3,420	3,420	2,466	2,466	3,175	2,714	3,684	3,915	4,309	2,714	2,000	4,217	4,309	2,884
A 3	5,000	4,642	3,302	2,289	2,884	2,621	2,884	2,520	4,309	3,684	3,915	3,915	3,915	3,684	4,309

Adım 2: Karar matrisine kriter ağırlıklarının bulunduğu bir satır ve kriterler için optimum değer bulunduğunu yeni bir satır eklenmiştir. Buna göre minimize edilmesi gereken kriterlerde bir başka deyişle maliyet kriterlerinde sütunda yer alan minimum değer alınmış, maksimize edilmesi gereken fayda kriterlerinde sütunda yer alan maksimum değer alınmıştır. Oluşturulan yeni karar matrisi Tablo 15'de gösterilmiştir.

Tablo 15. Optimum değerlerin belirlendiği karar matrisi

Alternatifler/Kriterler	C 1.1	C 1.2	C 1.3	C 2.1	C 2.2	C 2.3	C 3.1	C 3.2	C 3.3	C 4.1	C 4.2	C 4.3	C 5.1	C 5.2	C 5.3
W	0,085	0,084	0,069	0,070	0,063	0,049	0,033	0,039	0,046	0,100	0,104	0,066	0,065	0,046	0,044
Optimum	3,634	5,000	2,884	1,587	1,587	3,175	2,884	3,684	4,309	4,309	3,915	3,915	4,217	4,309	4,309
A 1	3,634	5,000	2,884	1,587	1,587	2,621	1,817	3,634	3,634	2,884	1,817	2,621	2,621	1,817	2,289
A 2	3,634	3,420	3,420	2,466	2,466	3,175	2,714	3,684	3,915	4,309	2,714	2,000	4,217	4,309	2,884
A 3	5,000	4,642	3,302	2,289	2,884	2,621	2,884	2,520	4,309	3,684	3,915	3,915	3,915	3,684	4,309

Normalize karar matrisinin oluşturulması için ilk olarak maliyet yönlü kriterler normalizasyona uygun hale getirilir. Bu işlem sonucunda oluşan yeni karar matrisi Tablo 16'da gösterilmiştir.

Tablo 16. Fayda yönlü dönüştürülmüş karar matrisi

Alternatifler/Kriterler	C 1.1	C 1.2	C 1.3	C 2.1	C 2.2	C 2.3	C 3.1	C 3.2	C 3.3	C 4.1	C 4.2	C 4.3	C 5.1	C 5.2	C 5.3
W	0,085	0,084	0,069	0,070	0,063	0,049	0,033	0,039	0,046	0,100	0,104	0,066	0,065	0,046	0,044
Optimum	0,275	5,000	0,347	0,630	0,630	3,175	2,884	3,684	4,309	4,309	3,915	3,915	4,217	4,309	4,309
A 1	0,275	5,000	0,347	0,630	0,630	2,621	1,817	3,634	3,634	2,884	1,817	2,621	2,621	1,817	2,289
A 2	0,275	3,420	0,292	0,405	0,405	3,175	2,714	3,684	3,915	4,309	2,714	2,000	4,217	4,309	2,884
A 3	0,200	4,642	0,303	0,437	0,347	2,621	2,884	2,520	4,309	3,684	3,915	3,915	3,915	3,684	4,309

Sonrasında tüm tablo için normalizasyon işlemi gerçekleştirilir. Oluşturulan normalize karar matrisi Tablo 17'deki gibidir.

Tablo 17. Normalize karar matrisi

Alternatifler/ Kriterler	C 1.1	C 1.2	C 1.3	C 2.1	C 2.2	C 2.3	C 3.1	C 3.2	C 3.3	C 4.1	C 4.2	C 4.3	C 5.1	C 5.2	C 5.3
W	0,085	0,084	0,069	0,070	0,063	0,049	0,033	0,039	0,046	0,100	0,104	0,066	0,065	0,046	0,044
Optimum	0,2683	0,277	0,269	0,299	0,313	0,274	0,280	0,273	0,267	0,284	0,317	0,314	0,282	0,305	0,312
A 1	0,2683	0,277	0,269	0,299	0,313	0,226	0,176	0,269	0,225	0,190	0,147	0,211	0,175	0,129	0,166
A 2	0,2683	0,189	0,227	0,193	0,202	0,274	0,264	0,27	0,242	0,284	0,220	0,161	0,282	0,305	0,209
A 3	0,1950	0,257	0,235	0,208	0,172	0,226	0,280	0,186	0,267	0,243	0,317	0,314	0,262	0,261	0,312

Adım 3: Bu adımda, oluşturulmuş olan normalize karar matrisi daha öncesinde SWARA Yöntemi ile belirlenen kriter ağırlıkları ile çarpılarak ağırlıklandırılmış normalize karar matrisi elde edilir. Elde edilen bu yeni karar matrisi Tablo 18’de gösterilmiştir.

Tablo 18. Ağırlıklandırılmış normalize karar matrisi

Alternatifler/ Kriterler	C 1.1	C 1.2	C 1.3	C 2.1	C 2.2	C 2.3	C 3.1	C 3.2	C 3.3	C 4.1	C 4.2	C 4.3	C 5.1	C 5.2	C 5.3
W	0,085	0,084	0,069	0,070	0,063	0,049	0,033	0,039	0,046	0,100	0,104	0,066	0,065	0,046	0,044
Optimum	0,023	0,023	0,019	0,021	0,020	0,013	0,009	0,011	0,012	0,028	0,033	0,021	0,018	0,014	0,014
A 1	0,023	0,023	0,019	0,021	0,020	0,011	0,006	0,010	0,010	0,019	0,015	0,014	0,011	0,006	0,007
A 2	0,023	0,016	0,016	0,013	0,013	0,013	0,009	0,011	0,011	0,028	0,023	0,011	0,018	0,014	0,009
A 3	0,017	0,022	0,016	0,014	0,011	0,011	0,009	0,007	0,012	0,024	0,033	0,021	0,017	0,012	0,014

Adım 4: Optimallik fonksiyon değerleri Eşitlik (19) yardımıyla hesaplandıktan sonra her bir alternatifin fayda derecesi Eşitlik (20) kullanılarak belirlenmiştir. Alternatiflerin optimallik fonksiyon değeri (S_i) ve fayda dereceleri (K_i) Tablo 19’daki gibidir.

Adım 5: Son olarak K_i değerleri büyükten küçüğe sıralanmıştır ve 3 alternatif arasındaki sıralama Tablo 19’daki gibi bulunmuştur.

Tablo 19. Nihai sıralama

	S_i	K_i	Sıralama
Optimum	0,2792	1,0000	
A 1	0,2158	0,7732	3
A 2	0,2279	0,8164	2
A 3	0,2405	0,8614	1

Uygulanan ARAS Yöntemi sonucuna göre bir kargo firması için kuruluş yeri seçiminde “A3” (Esenyurt) en iyi alternatif olurken, “A1” (Levent) en kötü alternatif olarak belirlenmiştir.

3.3 WASPAS uygulaması

3.3.1 Alternatiflerin sıralanması için WASPAS yönteminin uygulanması

Kargo firması için en uygun kuruluş yeri seçiminde kriter ağırlıkları belirlendikten sonra, üç karar vericinin cevapları WASPAS yöntemiyle değerlendirilmiştir.

Adım 1: İlk olarak her bir kriter için üç karar vericinin verdikleri performans değerleri sonucunda karar matrisi oluşturulmuştur. Üç karar vericinin verdikleri puanların geometrik ortalaması alınmıştır. Sonuçlar Tablo 20’de gösterilmiştir.

Tablo 20. Karar matrisi

Kriter Yönü	min	max	min	min	min	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max
Alternatifler/Kriterler	C 1.1	C 1.2	C 1.3	C 2.1	C 2.2	C 2.3	C 3.1	C 3.2	C 3.3	C 4.1	C 4.2	C 4.3	C 5.1	C 5.2	C 5.3
A 1	3,634	5,000	2,884	1,587	1,587	2,621	1,817	3,634	3,634	2,884	1,817	2,621	2,621	1,817	2,289
A 2	3,634	3,420	3,420	2,466	2,466	3,175	2,714	3,684	3,915	4,309	2,714	2,000	4,217	4,309	2,884
A 3	5,000	4,642	3,302	2,289	2,884	2,621	2,884	2,520	4,309	3,684	3,915	3,915	3,915	3,684	4,309

Adım 2: Karar matrisi elde edildikten sonra WASPAS için kullanılan Eşitlik 14 ve Eşitlik 15 kullanılarak normalize edilmiştir. Değerler Tablo 21’ de gösterilmiştir.

Tablo 21. Normalize karar matrisi

Kriter Yönü	min	max	min	min	min	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max
Alternatifler/Kriterler	C 1.1	C 1.2	C 1.3	C 2.1	C 2.2	C 2.3	C 3.1	C 3.2	C 3.3	C 4.1	C 4.2	C 4.3	C 5.1	C 5.2	C 5.3
A 1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,825	0,630	0,986	0,843	0,669	0,464	0,669	0,621	0,422	0,531
A 2	1,000	0,684	0,843	0,644	0,644	1,000	0,941	1,000	0,909	1,000	0,693	0,511	1,000	1,000	0,669
A 3	0,727	0,928	0,874	0,693	0,550	0,825	1,000	0,684	1,000	0,855	1,000	1,000	0,928	0,855	1,000
Kriterler	C 1.1	C 1.2	C 1.3	C 2.1	C 2.2	C 2.3	C 3.1	C 3.2	C 3.3	C 4.1	C 4.2	C 4.3	C 5.1	C 5.2	C 5.3
Ağırlık	0,085	0,084	0,069	0,070	0,063	0,049	0,033	0,039	0,046	0,100	0,104	0,066	0,065	0,046	0,044

Adım 3: WSM’ ye göre alternatiflerin toplam görelî önemi ($Q_i^{(1)}$) Eşitlik 16 ile hesaplanmıştır. Sonuçlar Tablo 22’ de paylaşılmıştır.

Tablo 22. Ağırlıklı toplam yöntemine göre nispi önem değeri

Alternatifler/ Kriterler	C 1.1	C 1.2	C 1.3	C 2.1	C 2.2	C 2.3	C 3.1	C 3.2	C 3.3	C 4.1	C 4.2	C 4.3	C 5.1	C 5.2	C 5.3	$Q_i^{(1)}$
A 1	0.0 85	0.0 84	0.0 69	0.0 70	0.0 63	0.0 40	0.0 21	0.0 38	0.0 39	0.0 67	0.0 48	0.0 44	0.0 41	0.0 20	0.0 23	0.7 52
A 2	0.0 85	0.0 57	0.0 58	0.0 45	0.0 41	0.0 49	0.0 31	0.0 39	0.0 42	0.1 00	0.0 72	0.0 34	0.0 65	0.0 46	0.0 29	0.7 94
A 3	0.0 62	0.0 78	0.0 60	0.0 48	0.0 35	0.0 40	0.0 33	0.0 27	0.0 46	0.0 85	0.1 04	0.0 66	0.0 61	0.0 40	0.0 44	0.8 29

Adım 4: Alternatiflerin her bir kriter için performans değerinin kriter ağırlığı oranında kuvvetinin çarpımı olarak hesaplanmıştır. Hesaplama Eşitlik 17 kullanılır ve $Q_i^{(2)}$ değeri bulunur. Sonuçlar Tablo 23’ de gösterilmiştir.

Tablo 23. Ağırlıklı çarpım yöntemine göre nispi önem değeri

Kriterler/ Alternatifler	C 1.1	C 1.2	C 1.3	C 2.1	C 2.2	C 2.3	C 3.1	C 3.2	C 3.3	C 4.1	C 4.2	C 4.3	C 5.1	C 5.2	C 5.3	$Q_i^{(2)}$
A 1	1.00 0	1.00 0	1.00 0	1.00 0	1.00 0	0.99 1	0.98 5	0.99 9	0.99 2	0.96 1	0.92 3	0.97 4	0.96 9	0.96 1	0.97 3	0.75 7
A 2	1.00 0	0.96 9	0.98 8	0.97 0	0.97 2	1.00 0	0.99 8	1.00 0	0.99 6	1.00 0	0.96 3	0.95 6	1.00 0	1.00 0	0.98 2	0.81 2
A 3	0.97 3	0.99 4	0.99 1	0.97 5	0.96 3	0.99 1	1.00 0	0.98 5	1.00 0	0.98 4	1.00 0	1.00 0	0.99 5	0.99 3	1.00 0	0.85 4

Adım 5: Ağırlıklı Çarpım ve Ağırlıklı Toplam yöntemlerine göre hesaplanan $Q_i^{(1)}$ ve $Q_i^{(2)}$ değerleri kullanılarak elde edilen nihai Q_i değeri Eşitlik 18 ile bulunmuştur.

Adım 6: Çalışmada λ değeri 0.5 kabul edilerek sonuca ulaşılmıştır. Buna göre belirlenen alternatiflere ait sıralama Tablo 24’ de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en iyi alternatif “A3” (Esenyurt) olurken, verilen kriterler doğrultusunda en kötü alternatif “A1” (Levent) olmuştur.

Tablo 24. Qi değerleri

Alternatifler	Qi	Sıralama
A 1	0.75453	3
A 2	0.80261	2
A 3	0.84148	1

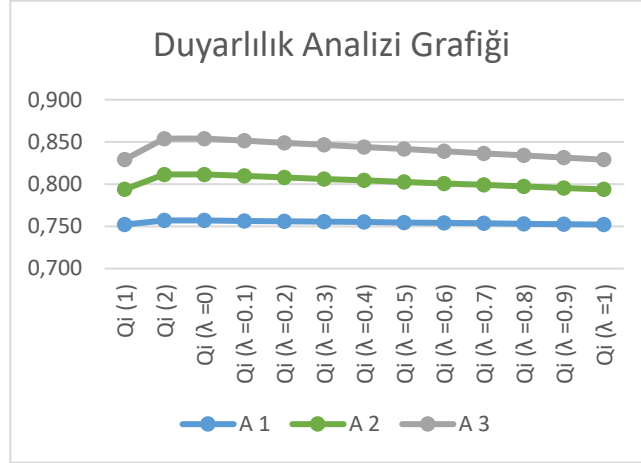
3.3.2 WASPAS Yöntemi Duyarlılık Analizi

Ağırlıklı Çarpım ve Ağırlıklı Toplam yöntemlerine göre hesaplanan alternatiflerin toplam görelî önemleri (Qi) Eşitlik 19 ile genelleştirilebilir. Eşitlik 18 ve Eşitlik 19'da kullanılan λ değeri 0 ila 1 aralığında değer alır ve WASPAS yönteminde bir parametredir. WASPAS yöntemi $\lambda=0$ olarak varsayıldığında Ağırlıklı Çarpım ve $\lambda=1$ olarak varsayıldığında, Ağırlıklı Toplam yöntemlerine dönüşür.

Adım 6: Bu adımda, duyarlılık analizi gerçekleştirilmiş ve farklı λ değerlerinde alternatiflerin göreceli önem değerleri (Qi) hesaplanmıştır: Tablo 25'de görüldüğü üzere λ değerinin farklı değerler alması sıralamayı değiştirmemektedir. Sıralama A3> A2> A1 (Esenyurt > Arnavutköy > Levent) şeklindedir.

Tablo 25. Farklı λ değerlerine ait sıralama

c	A 1	A 2	A 3
Qi (1)	0,752	0,794	0,829
Qi (2)	0,757	0,812	0,854
Qi ($\lambda=0$)	0,757	0,812	0,854
Qi ($\lambda=0,1$)	0,756	0,810	0,851
Qi ($\lambda=0,2$)	0,756	0,808	0,849
Qi ($\lambda=0,3$)	0,756	0,806	0,846
Qi ($\lambda=0,4$)	0,755	0,804	0,844
Qi ($\lambda=0,5$)	0,755	0,803	0,841
Qi ($\lambda=0,6$)	0,754	0,801	0,839
Qi ($\lambda=0,7$)	0,754	0,799	0,836
Qi ($\lambda=0,8$)	0,753	0,797	0,834
Qi ($\lambda=0,9$)	0,753	0,795	0,831
Qi ($\lambda=1$)	0,752	0,794	0,829



Şekil 3. Duyarlılık analizi

Duyarlılık analizi sonucuna göre, Tablo 25 ve Şekil 3’de, görüldüğü üzere her λ değeri için alternatiflerin göreceli değerlerine (Q_i) göre sıralamaların aynı olduğu gözlenmiştir. Bu bağlamda, hesaplamaların ve geliştirilen yöntemin tutarlı olduğu ortaya çıkmıştır.

4. Sonuçlar

Teknolojinin her geçen gün ilerlemesi ve yeni boyutlar kazanması ülkeler arası ilişkilerin yaygınlaşmasına, ekonomik kavramların yeni anlamlar kazanmasına, ulusal ve uluslararası ilişki ağlarının öne çıkmasına ortam hazırlamıştır. Günümüzde firmalar pazarda varlığını sürdürebilmek için, gelişen teknoloji ve rekabet ortamına ayak uydurmalıdır. Bu gelişmeler doğrultusunda varlıklarını sürdürmek isteyen işletmeler için doğru kuruluş yeri seçimi önemli hususlardan biridir. İşletmelerin verecekleri bu önemli karar onları uzun vadede etkileyecektir. İşletmelerin faaliyetlerini sürdürecekleri yer, misyon ve vizyonlarını gerçekleştirecekleri yerdir. Firmalar için doğru kuruluş yeri işletme verimliliğini artırırken maliyetlerin azalmasını ve bunlarla beraber müşteri memnuniyetinin artmasını sağlamaktadır. Doğru yer seçimi kararının işletmelere avantaj sağlamasının yanı sıra verilecek yanlış yer seçimi kararları işletmelere doğrudan büyük maliyetlere sebep olacaktır. Tüm sektörlerde olduğu gibi taşımacılık sektöründe de yer seçiminin oldukça büyük bir önemi vardır. Taşımacılık, bir malın ya da yükün varılması istenen yere doğru zamanda, doğru rotayla sorunsuz ulaşması faaliyetidir. Taşımacılıkta yer seçimi, maliyeti doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle yer seçim kararının doğru verilebilmesi son derece önemlidir.

Bu çalışmada, bir kargo firması için en uygun şube yeri seçiminin belirlenmesi için ilk olarak SWARA yöntemiyle kriter önem ağırlıkları belirlenmiştir. Hesaplamalar sonucunda en önemli ana kriterin 0,276 puanla “C1” (Konum), en az önemli ana kriterin ise 0,118 puanla “C3” (Sosyal) kriteri olduğu görülmüştür. Aynı şekilde SWARA yöntemi kullanılarak alt kriter ağırlıkları hesaplandıktan sonra C1 (Ekonomi) ana kriteri için en önemli alt kriteri için 0,085 puanla “C1.1” (Arazi Maliyeti), en az önemli alt kriterin ise 0,069 puanla “C1.3” (Taşıma Maliyeti), “C2” (Çevre) kriteri için 0,070 puanla “C2.1” (Afet Bölgesi), “C3” (Sosyal) ana kriteri için 0,046 puanla “C3.3” (Emniyet ve Güvenlik), “C4” (Konum) için en önemli alt kriterin 0,104 puanla “C4.2” (Tedarikçilere Yakınlık) ve “C5” (Arazi) için en önemli alt kriterin 0,065 puanla “C5.1” (Kapasite) olduğu saptanmıştır. Kurum için yer seçiminde etkili olan tüm alt kriterler değerlendirildiğinde en önemli kriterin “C4.2” (Tedarikçilere Yakınlık) ve en az öneme sahip kriterin “C5.3” (Altyapı Olanakları) olduğu ortaya çıkmıştır. Elde edilen bulgular gösteriyor ki kurum için yer seçiminde konumun önemi diğer kriterlere göre daha fazla önem arz etmektedir.

Kriter ağırlıkları belirlendikten sonra WASPAS yöntemiyle sıralama yapılmıştır. Elde edilen bulgular sonucunda, sıralama “A3- A2- A1” (Esenyurt – Arnavutköy - Levent) şeklinde bulunup en uygun alternatifin “A3” (Esenyurt) olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bulgular duyarlılık analizi ile desteklenerek sonuçların farklı λ değerleri için aynı çıktığı gözlenmiştir. Problemin ARAS yöntemi ile çözümünde ise bulunan optimalite fonksiyon değeri ve fayda dereceleri belirlenip sıralama yapıldıktan sonra oluşan sıralama “A3-A2-A1” (Esenyurt – Arnavutköy - Levent) şeklinde olup kurum için en uygun alternatifin “A3” (Esenyurt) olduğu saptanmıştır.

Yöntemlerden elde edilen sonuçlara bakıldığında sonuçların tutarlı çıktığı ve en uygun şube yerinin “A3” (Esenyurt) olduğu tespit edilmiştir. WASPAS ve ARAS yöntemlerinde elde edilen sıralamaların birbirini desteklemesi çalışmanın tutarlılığını ortaya koymuştur.

Kargo işletmeleri için yer seçimi probleminin çözümüne yönelik, önerilen yöntemlerle yapılan çalışma sayısının yetersiz olmasından dolayı bu çalışmanın literatüre katkısının önemli olacağı düşünülmektedir. Ayrıca, çalışma gerçek bir vaka çalışması ile ÇKKV yöntemlerinin uygulama adımlarını detaylı açıklamıştır. Bu bağlamda, şube yeri seçimi problemlerinde uygulanabilirliği örnek teşkil edecek şekilde ortaya konmuştur. Aynı zamanda gelecek çalışmalarda araştırmacılar bu çalışmada önerilen ÇKKV yöntemlerinden olan SWARA, WASPAS ve ARAS yöntemlerini farklı problemlerin çözümünde örneğin firma seçimi, AVM kuruluş yeri, depo kuruluş yeri seçimi, mağaza kuruluş yeri seçimi gibi farklı alanlarda kullanabilirler. Önerilen model kapsamında kriter sayısı genişletilerek daha kapsamlı analizler yapılabilir.

Kaynaklar

- [1] Önel F. “Kuruluş Yeri Seçiminin Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle Uygulanması”. Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Anabilim Dalı, 2014.
- [2] Eleren A. “Kobilerde Optimal Kuruluş Yeri ve Kapasite Seçiminin Rekabet Gücüne Etkileri” Afyon Kocatepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 1 (1), 99-112, 1999
- [3] Yücel M, Ulutaş A. “Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinden ELECTRE Yöntemi ile Malatyada Bir Kargo Firması için Yer Seçimi”. SÜ İBF Sosyal ve Ekonomik Araştırmalar Dergisi, 9 (17), 327-344, 2009.
- [4] Aydın Ö.” Bulanık AHP ile Ankara için Hastane Yer Seçimi”. Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 24(2), 87-107, 2009.
- [5] Elgün MN, Elitaş C. “Ulusal ve Uluslararası Taşıma ve Ticarete Lojistik Köylerin Yapılanma Esasları ve Uygun Kuruluş Yeri Seçimi”. CBÜ Sosyal Bilimler Dergisi, 13(2), 203-226, 2011.
- [6] Ayöperken E, Ermiş M. “İnsansız Hava Araçları İçin Üs Konumlarının Kapsama Alanı Problemi Olarak Modellenmesi ve En İyilenmesi”. Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, 5(1), 61-71, 2011.
- [7] Alp S, Erdin C.” Kuruluş Yeri Seçiminde Analitik Hiyerarşi Prosesi ve Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi Uygulaması” Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 4(1), 7-25, 2012.
- [8] Çiçekdağ Hİ, Kırış Ş. “Afet İstasyonu ve Toplanma Merkezi İçin Yer Seçimi ve Bir Uygulama”. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 28, 67-76, 2012.
- [9] Aydın Y. “Bulanık TOPSIS ve VİKOR Yöntemi Kullanılarak Rüzgâr Enerjisi Santral Yer Seçimi”. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2013.
- [10] Kara, M., Ercan, Y., Yumuşak, R., Cürebat, A., Eren, T. “Yenilenebilir Hibrit Enerji Santrali Uygulamasında Tesis Yer Seçimi” Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 14 (1), 208-227, 2022, doi: 10.29137/umagd.1011212
- [11] Yavuz S, Deveci M. “Bulanık TOPSIS ve Bulanık VİKOR Yöntemleriyle Alışveriş Merkezi Kuruluş Yeri Seçimi ve Bir Uygulama”. Ege Akademik Bakış, 14(3), 463-479, 2014.
- [12] Önel F. “Kuruluş Yeri Seçiminin Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleriyle Uygulanması”. Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Anabilim Dalı, 2014
- [13] Aktepe A, Ersöz S. “AHP-VİKOR ve MOORA Yöntemlerinin Depo Yeri Seçim Probleminde Uygulanması”. Endüstri Mühendisliği Dergisi, 25(1), 2-15, 2014.
- [14] Yıldız, A., Soner Kara, S., Özkan, C. “Sağlık kurumlarının ve eczanelerin taleplerine yönelik ecza deposu yer seçimi problemi”. GÜFBED/GUSTIJ 11 (2), 452-465, 2021, doi: 10.17714/gumusfenbil.676376
- [15] Tomic V, Marinkovic D, Markovic D. “The Selection of Logistic Centers Location Using Multi-Criteria Comparison: Case Study of the Balkan Peninsula”. Acta Polytechnica Hungarica, 11(19), 97-113, 2014.
- [16] Stević Ž, Vesković S, Vasiljević M, Tepić, G. “The Selection of The Logistics Center Location Using AHP Method”. 2nd Logistics International Conference Belgrade, Serbia. Belgrade, 2015.
- [17] Făgărășan M, Cristea C. “Logistics Center Location: Selection Using Multicriteria Decision Making”. Annals Of The Oradea University Fascicle of Management and Technological Engineering, 157-162, 2015, doi: 10.15660/auofmte.2015-1.13125
- [18] Uysal F, Gülmez M. “Türkiye’de Akdeniz Bölgesi’nde Lojistik Merkez Yeri Seçimi İçin Bulanık Serim Teori ve Matris Yaklaşımı Uygulaması”. Verimlilik Dergisi, 1, 89-104, 2015.
- [19] Sürmeli G, Kaya İ, Erdoğan M. “A Fuzzy Multi-Criteria Decision-Making Approach for Choosing a Logistics Center Location in Turkey”. 6th International Conference on Modeling, Simulation, and Applied Optimization (ICMSAO), 2015.
- [20] Atalay Ö, Karakaş A, Akça M. “Türkiye’de Lojistik Merkezi Yeri Seçiminde Kriterlerin AHP ile Ağırlıklandırılması: Kars İli Üzerine Bir Analiz”. Kars: II. International Caucasus Central Asia Foreign Trade and Logistics Congress Proceeding Book, 2016.
- [21] Pham TY, Ma HM, Yeo GT. “Application of Fuzzy Delphi TOPSIS to Locate Logistics Centers in Vietnam: The Logisticians’ Perspective”. The Asian Journal of Shipping and Logistics 33(4), 211-219, 2017, doi: 10.1016/j.ajsl.2017.12.004

- [22] Ulutaş A, Karaköy Ç, Arıç KH, Cengiz E. “Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Lojistik Merkezi Yeri Seçimi”. İktisadi Yenilik Dergisi, 5(2), 45-53, 2018.
- [23] Zaralı F, Yazgan HR, Delice Y. “AHP ve VIKOR Bütünleşik yaklaşımıyla Lojistik Merkez Yer Seçimi: Kayseri İli örneği”. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 1-9 2018.
- [24] Pamučar D, Božanić D. “Selection Of A Location for The Development Of Multimodal Logistics Center: Application Of Single-Valued Neutrosophic Mabac Model”. Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications, 55-71 2019, doi: 10.31181/oresta1902039p
- [25] Yılmaz F. “Mekânsal Anlamda Lojistik Merkez Kavramı ve Hadımköy Lojistik Merkezi”. Rewieved Journal of Urban Culture and Management, 186-199 2019.
- [26] Yavaş V, Özkan YD. “Logistics centers in the new industrial era: A proposed framework for logistics center 4.0”. Transportation Research Part E 135, 2020, doi: 10.1016/j.tre.2020.101864
- [27] Keleş N, Pekkaya M. “Lojistik Köy Yer Seçiminde Dikkate Alınan Değişkenlerin Kıyaslama Yaklaşımı”. Bartın Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 1-14 2021, doi: 10.47129/bartiniibf.840819
- [28] Baki, R. “Lojistik Merkezi Yer Seçimi için Aralık Değerli Sezgisel Bulanık Sayılara Dayalı Genişletilmiş VIKOR Yöntemi” İnsan ve Toplum Bilimleri Araştırma Dergisi, 1821-1837 2022, doi: 10.15869/itobiad.1084212
- [29] İmren E, Karayılmazlar S, Kurt R. “Selection Of Optimal Establishment Place Using AHP (Analytical Hierarchy Process): An Application Of Furniture Industry”. Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 48-54 2016, doi: 10.24011-barofd.267287
- [30] Ünlükara T, Berköz L. “Alışveriş Merkezlerinin Yer Seçimi Kriterleri: İstanbul Örneği”. MAGERON, 437-448 2016, doi: 10.5505/megaron.2016.58066
- [31] Şeker Ö, Alakaş HM. “Bir Lojistik Firması için Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemleri ile İç Anadolu Bölgesinde Depo Yeri Seçimi”. 7th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, 841-850 2019, doi: 10.33793/acperpro.02.03.93
- [32] Taraf F, Yazgan HR. “Jeotermal ve Rüzgâr Enerjisi Santrallerinde Yer Seçimi Probleminin Analitik Ağ Süreci ile Çözülmesi”. Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik ve Sosyal Bilimler Dergisi, 42-55 2018.
- [33] Şekeroğlu A, Özkaynak M, Yeşilyurt Alkan A, Başkan A. “Mekânsal Planlamada Yenilenebilir Enerji Tesisi Yer Seçimi: TR83 Bölgesi Örneği”. Kent Akademisi, 14 (1), 1-19, 2021, doi: 10.35674/kent.780552
- [34] Dörtköşe, S., Yazgan, H. R., Ercan Cömert, S. “Elektrikli Araç Şarj İstasyon Yerlerinin Akış Yakıt İkmal Yer Modeli Kullanılarak Belirlenmesi” Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 371-382 2022.
- [35] Kara A, Masri A, Kaya GK. “AHP, ARAS ve bulanık TOPSIS ile yeni şube yeri seçimi: Denizcilik sektöründe bir tedarikçi firma örneği “. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28 (1), 148-159, 2022, doi: 10.5505/pajes.2021.40460
- [36] Paksoy S. “Çok Kriterli Karar Vermede Güncel Yaklaşımlar, Adana, Türkiye”. Karahan Kitabevi, 2017.
- [37] Arslanhan H, Tosun Ö. “Ulaştırma modu seçimi probleminin bütünleşik en iyi-en kötü ve WASPAS yöntemleriyle çözülmesi “. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 27 (1), 13-23, 2021, doi: 10.5505/pajes.2020.23427
- [38] Besler D. “SWARA-EDAS Yöntemleri ile Elektrikli Araç Şarj İstasyonu Lokasyonu Seçimi ve İstanbul-Antalya Güzergahı Üzerinde Bir Uygulama”. İstanbul: T.C Beykent Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Endüstri Mühendisliği Bilim Dalı, 2021, doi: 10.51513/jitsa.1015108
- [39] Doğan G. “SWARA ve WASPAS Metotlarına Dayalı Bir Performans Değerlendirme Modeli”. Adana: Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, 2020.
- [40] Kara A, Masri A, Kaya GK. “AHP, ARAS ve bulanık TOPSIS ile yeni şube yeri seçimi: Denizcilik sektöründe bir tedarikçi firma örneği “. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28 (1), 148-159, 2022.
- [41] Karabašević D, Stanujkić D, Urošević S, Maksimović M.” An Approach to Personnel Selection Based on SWARA and WASPAS Methods”. Journal of Economics, Management and Informatics, 1-11 2016, doi: 10.5937/bizinfo1601001K
- [42] İpekçi A. “Türkiye’de Yapılması Planlanan Sualtı Akıntı Enerji Tesisi Kurulumu İçin SWARA ve WASPAS Yöntemleri ile Yer Seçimi”. İstanbul: T.C. Beykent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 2019.
- [43] Majeed RA, Breesam HK. “Application of SWARA Technique to Find Criteria Weights for Selecting Landfill Site in Baghdad Governorate”. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 1090 2020, doi: 10.1088/1757-899X/1090/1/012045
- [44] Doğan G. “SWARA ve WASPAS Metotlarına Dayalı Bir Performans Değerlendirme Modeli”. Adana: Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, 2020.
- [45] Yazıcı MH. “SWARA-WASPAS Yöntemleri ile Bir Diş Kliniği İçin Küresel Yer Seçimi ve Bir Ağız Diş Sağlığı Merkezi İçin Uygulama”. İstanbul: T.C Beykent Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Endüstri Mühendisliği Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, 2020.
- [46] Maruf M, Özdemir K. “Türkiye’deki Ticari Bankalara Ait Web Sitelerin Performanslarının SWARA ve ARAS Yöntemi ile Sıralanması”. Uluslararası Toplum Araştırmaları Dergisi, 1514-1537 2021, doi: 10.26466/opus.888184
- [47] Yücenur GN, İplikçi A. “SWARA/WASPAS Methods for a Marine Current Energy Plant Location Selection Problem”. Renewable Energy, 163, 1287-1298, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2020.08.131
- [48] Maruf, M. “Türkiye’de E- Ticaret Sitelerinin SWARA ve WASPAS Yöntemleri ile Web Sitesi Performansına Göre Sıralanması” Troyacademy 6, 411-421 2021, doi: 10.31454/troyacademy.897589
- [49] Akpınar, M. “E. Third-Party Logistics (3PL) Provider Selection Using Hybrid Model of SWARA and WASPAS” Int. J. Pure Appl. Sci. 7(3), 371- 382 2021, doi: 10.29132/ijpas.972885

- [50] Terzioğlu, M. K., Kurt, E. S., Yaşar, A., Köken, “M. BİST100-Enerji Sektörü Finansal Performansı: SWARA-VIKOR ve SWARA-WASPAS” Alanya Akademik Bakış Dergisi 6 (2), 2439-2455 2021, doi: 10.29023/alanyaakademik.1079820
- [51] Aytaç Adalı E, Tuş Işık A. “Bir Tedarikçi Seçim Problemi İçin SWARA ve WASPAS Yöntemlerine Dayanan Karar Verme Yaklaşımı”. International Review Of Economics And Management, 56-77 2017, doi: 10.18825/iremjournal.335408
- [52] Yıldırım BF. “Çok Kriterli Karar Verme Problemlerinde ARAS Yöntemi”. KAÜ İİBF Dergisi, 285-296 2015.
- [53] Doğan G. “SWARA ve WASPAS Metotlarına Dayalı Bir Performans Değerlendirme Modeli”. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, 2020.
- [54] Besler D. “SWARA-EDAS Yöntemleri ile Elektrikli Araç Şarj İstasyonu Lokasyonu Seçimi ve İstanbul-Antalya Güzergahı Üzerinde Bir Uygulama”. İstanbul: T.C Beykent Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Endüstri Mühendisliği Bilim Dalı, 2021.
- [55] Zavadskas EK, Turskis Z, Antucheviciene J, Zakarevicius A. “Optimization of weighted aggregated sum product assessment”. Elektronika ir Elektrotechnika, 122(6), 3-6 2012, doi: 10.5755/j01.eee.122.6.1810
- [56] Rençber ÖF, Avcı T. “BİST’te işlem gören bankaların sermaye yeterliliklerine göre karşılaştırılması: WASPAS yöntemi ile uygulama”. Anemon Muş Alparslan Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 6(18), 169-175, 2018, doi: 10.18506/anemon.452713
- [57] Kara A, Masri A, Kaya GK.” AHP, ARAS ve bulanık TOPSIS ile yeni şube yeri seçimi: Denizcilik sektöründe bir tedarikçi firma örneği “. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28 (1), 148-159, 2022.
- [58] Zavadskas EK, Turskis Z. “Multiple criteria analysis of foundation instalment alternatives by applying Additive Ratio Assessment (ARAS) method”. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 10(3), 123-141, 2010, doi: 10.1016/S1644-9665(12)60141-1

Filtre Tabanlı Öznitelik Seçim Yöntemleri Kullanılarak Metinlerde Duygu Sınıflandırması Üzerine Karşılaştırmalı Bir Çalışma

Ensar Arif SAĞBAŞ^{1*}

¹ Bilişim Sistemleri Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla, Türkiye
^{*1} arifsagbas@mu.edu.tr

(Geliş/Received: 28/10/2022;

Kabul/Accepted: 15/02/2023)

Öz: Bir metin sınıflandırma problemi olarak duygu analizi, çevrimiçi metin belgelerinden öznel bilgi çıkarmanın kritik bir görevidir. Metin sınıflandırmanın önemli bir sorunu ise yüksek boyutluluktur. Boyut indirgeme, makine öğreniminde sınıflandırma performansını iyileştirmenin etkili bir yoludur. Alakasız özniteliklerin azaltılması eğitim süresini kısaltabilmekte ve sınıflandırma doğruluğunu artırabilmektedir. Farklı öznitelik seçim yöntemlerinin performansı, farklı veri kümelerinin özelliklerine bağlı olarak değişebilmektedir. Bu çalışmada filtre tabanlı 6 farklı öznitelik seçimi yönteminin (Korelasyon tabanlı öznitelik seçimi, Ki-kare, Kazanç oranı, Bilgi kazancı, OneR ve Simetrik belirsizlik katsayısı) performansı duygu sınıflandırmasında sıklıkla kullanılan 9 farklı veri kümesi üzerinde test edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Bütün veri kümelerinde her bir öznitelik seçimi yöntemi için filtre puanları hesaplanmıştır. Elde edilen filtre puanları büyüken küçüğe sıralanmıştır. En yüksek filtre puanına sahip öznitelikten en düşük filtre puanına sahip öznitelige doğru öznitelikler bir önceki alt kümeye eklenerek yeni alt kümeler oluşturulmuş ve sınıflandırılmıştır. Hesaplama sonuçları, önerilen yaklaşımın 9 genel duygu sınıflandırma veri kümesi için Çok terimli Naive Bayes sınıflandırıcısını kullanarak ortalama %94.34 doğruluk oranlarına ulaştığını göstermektedir. Arama uzayı dikkate alındığında, bu yaklaşımın geliştirilebilir ve mevcut yaklaşımlarla rekabet edebilir olduğu sonucuna varılabilir.

Anahtar kelimeler: Duygu sınıflandırma, öznitelik seçimi, makine öğrenmesi, Çok terimli Naive Bayes, doğal dil işleme.

A Comparative Study on Text Sentiment Classification by Using Filter-Based Feature Selection Methods

Abstract: Sentiment analysis as a text classification problem is a critical task of extracting subjective information from online text documents. An important problem of text classification is high dimensionality. Dimension reduction is an effective way to improve classification performance in machine learning. Reducing irrelevant features can reduce training time and improve classification accuracy. The performance of different feature selection methods may vary depending on the characteristics of different datasets. In this study, the performance of 6 different filter-based feature selection methods (Correlation-based feature selection, Chi-square, Gain ratio, Information gain, OneR, and Symmetric uncertainty coefficient) were tested and compared on 9 different datasets that are frequently used in sentiment classification. Filter scores were calculated for each feature selection method in all datasets. The obtained filter scores were sorted descendingly. New feature subsets were created and classified by adding features to the previous subset from the feature with the highest filter score to the feature with the lowest filter score. The computational results show that the proposed approach achieves average accuracy rates of 94.34% using the Multinomial Naive Bayes classifier for 9 general sentiment classification datasets. Considering the search space, it can be concluded that this approach can be improved and is competitive with existing approaches.

Keywords: Sentiment classification, feature selection, machine learning, Multinomial Naive Bayes, natural language processing.

1. Giriş

Bilgi teknolojilerinin hızlı gelişimi ile kullanıcı tarafından oluşturulan içerikler kolaylıkla çevrimiçi olarak yayınlanabilmektedir [1]. Metin tabanlı sosyal medya, müşteriler ve işletmeler arasındaki önemli iletişim araçlarından biri haline gelmiştir. Sosyal medyada kullanıcılar ürün veya hizmetlerle ilgili görüş ve değerlendirmelerini rahatlıkla ifade edebilirler. Bu çevrimiçi kullanıcı deneyimleri, özellikle olumsuz değerlendirmeler, diğer tüketicilerin davranışlarını etkilemektedir. Sonuç olarak, müşterilerin duygularını etkin bir şekilde tespit etmek ve bu olumsuz yorumların girişimcilere büyük zarar vermesini önlemek kritik konulardan biri haline gelmiştir [2]. Fikir madenciliği olarak da bilinen duygu analizi, ana metin sınıflandırma yöntemlerinden biridir ve duygusal metinleri olumlu veya olumsuz etiketlere ayırma ile ilgilenmektedir. Duygu analizi genel olarak üç ayrıntı düzeyinde yapılabilir: [3] belge düzeyi, cümle düzeyi ve görünüm düzeyi [4,5].

* Sorumlu yazar: arifsagbas@mu.edu.tr Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-7463-1150

Otomatik metin sınıflandırıcılar, spam filtreleme, duygu analizi ve haber sınıflandırması gibi birçok gerçek dünya sorununu ele almak için kullanılabilir. Metinler genellikle yüksek boyutlu ve seyrek bir belge terim matrisi ile kelime sıklık sayımlarını içeren kelime dağarcığının boyutuna sahip bir uzayda temsil edilir. Yüksek boyutluluk, boyutluluğun laneti (curse of dimensionality) ve modelin aşırı öğrenmesi gibi bazı sorunlara neden olabilir. Öznitelik seçimi, boyutluluğu azaltmak, alakasız verileri kaldırmak ve öğrenme doğruluğunu artırmak için kullanılmaktadır. Öznitelik seçimi, belirli bir metnin sınıflandırılmasına en çok katkıda bulunan öznitelikleri otomatik veya manuel olarak seçme işlemidir. Metin sınıflandırma problemlerinde, öznitelikler genellikle kelimelerin bir alt kümesinin bir temsilidir. Metin külliyatından çıkarılan özniteliklerin önemli bir alt kümesi, metin sınıflandırma göreviyle ilgili olmayabilir. Bu alakasız öznitelikler, sınıflandırma modellerinin etkinliğini ve doğruluğunu bozabilmektedir [6]. Bu nedenle, metin sınıflandırması için öznitelik seçimi, yapay zekâ ve veri madenciliği çalışmalarında popüler bir araştırma konusu haline gelmiştir [7].

Öznitelik seçme yöntemleri kullanılan amaç fonksiyonlarına göre filtreler ve sarmalayıcılar olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir. Filtre tabanlı yöntemler, belirli bir matematiksel ölçüte göre öznitelik alt kümelerini değerlendirirken, sarmalayıcı tabanlı yöntemler, değerlendirme için tahmin performansını (örneğin, doğruluk) kullanır. Uygun öğrenme modelini kullanarak sarmalayıcı tabanlı yöntemler, filtre tabanlı yöntemlerden daha etkili sonuçlar üretebilmektedir. Bu nedenle sınıflandırma için sarmalayıcı teknikleri yaygın olarak tercih edilmektedir. Sağlayabileceği yüksek tahmin performansına rağmen, öznitelik seçiminin ana dezavantajı, öznitelik sayısı arttıkça öznitelik alt kümesi arama uzayının katlanarak büyümesidir. Ayrıca, sarmalayıcı tabanlı yöntemler bir değerlendirme ölçütü olarak sınıflandırma modellerini kullandığından, filtre tabanlı yöntemlerden daha fazla hesaplama süresi gerektirmektedir [3].

Literatürde duygu sınıflandırması için daha verimli yöntemler arayan çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Wang et al. [8] konuşma parçası analize dayalı duygu sınıflandırması için geliştirilmiş bir Rastgele alt uzay yöntemi, POS-RS önermiştir. Onan et al. [9] sınıflandırıcılara ve sınıflandırma algoritmalarının tahmin performansına dayalı her bir çıktı sınıfına uygun ağırlık değerleri atamak için çok amaçlı, eniyilemeye dayalı ağırlıklı oylama şeması geliştirmeye çalışmışlardır. Onan et al. [10] duygu sınıflandırması için kümeleme ve rastgele aramaya dayalı melez bir topluluk budama şeması önermişlerdir. Jalilvand and Salim [11] sınıflandırmada boyut indirgeme için öznitelik birleştirme adı verilen yeni bir yaklaşım önermiştir. Yang et al. [12] çoklu sınıflandırıcı sistemlerin bir topluluk yöntemi olarak çoğunluk oylamasını kullanmışlardır. Gokalp et al. [3] duygu sınıflandırması için yinelenen açgözlü metasezgisel tabanlı yeni bir sarmalayıcı öznitelik seçim algoritması önermiştir. Ayrıca, önerilen algoritmanın açgözlü yapı kısmı için önceden hesaplanmış filtre puanlarına dayanan bir seçim prosedürü geliştirmişlerdir. Onan [13] metin üzerinden duygu sınıflandırması için iki ayrı çift yönlü long short-term memory (LSTM) ve gated recurrent unit (GRU) katmanı kullanan çift yönlü bir evrimsel tekrarlayan sinir ağı mimarisi önermiştir. Shao and Chen [14] finansal içerikli metinlerde duygu sınıflandırması gerçekleştirmek için derin öğrenme tabanlı bir yaklaşım önermiştir. Khan et al. [15] duygu sınıflandırmasının performansını iyileştirmek için geleneksel öznitelik oluşturma yöntemlerini deep neural network (DNN) tabanlı yöntemlerle entegre etmenin etkili bir yolunu araştırmıştır. Yang et al. [16] dinamik veri belirsizliğini sürekli olarak ele almak için dinamik metin duygu sınıflandırması için zamansal-uzaysal üç yönlü çok parçalı öğrenme çerçevesi yürütmüştür. Ayetiran [17] belge ve boyut düzeyinde duygu verilerini ortaklaşa öğrenen yeni bir derin öğrenme tekniği sunmuştur. Karga vd. [18] COVID-19 salgınının yüksek öğrenim üzerindeki etkisini analiz etmek için derin öğrenmeye dayalı bir duygu analizi yaklaşımı sunmuşlardır. Polat ve Ağca [19] kullanıcılarının Türkçe ve İngilizce yorumlarındaki duygusal eğilimlerin ortaya çıkarılması ve sınıflandırılmasında kullanılan duygu analizi yöntemlerini karşılaştırmıştır. Şahinaslan vd. [20] YouTube yorumları üzerinden Naive Bayes sınıflandırıcısı kullanarak çok dilli duygu analizi gerçekleştirmiştir. Dinçer vd. [21] Twitter verileri üzerinden siber zorbalığın tespiti üzerine çalışmışlardır. Salur ve Aydın [22] metinler üzerinden duygu sınıflandırmada derin öğrenme yöntemleriyle çıkartılan derin öznitelikler ile veri ön işleme aşamasında silinen verilerden elle çıkartılan öznitelikleri birlikte kullanımına dayanan yeni bir model önermişlerdir.

Bu çalışmada, duygu analizi için filtre tabanlı öznitelik seçimi yöntemlerinin başarımlarının ölçülmesi amaçlanmaktadır. Böylece metin sınıflandırma için hem daha yüksek başarımın elde edilmesi hem de boyutun azaltılması hedeflenmektedir. Bu amaçla, duygu sınıflandırması 6 farklı öznitelik seçimi algoritmasının (Korelasyon tabanlı öznitelik seçimi, Bilgi kazancı, Kazanç oranı, Ki-kare, OneR ve Simetrik belirsizlik) performansları değerlendirilmiştir. Sınıflandırma yöntemi olarak ise duygu sınıflandırmasındaki yüksek performans nedeniyle, Çok terimli Naive Bayes (ÇTNB), kullanılmıştır. Öznitelik seçimi algoritmalarının performansını değerlendirmek için Whitehead and Yaeger'den [23] yaygın olarak kullanılan duygu sınıflandırma veri kümeleri üzerinde kapsamlı bir deneysel çalışma yapılmıştır. Etkili öznitelik alt kümeleri oluşturmak amacı ile öznitelik seçimi algoritmalarından elde edilen filtre puanlarını kullanan bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen en iyi N elemanlı alt küme yaklaşımı ile sarmalayıcı yöntemlere göre daha az yineleme ile başarılı sonuçlar

alınabileceği görülmüştür. Kapsamlı deneysel sonuçlar, önerilen filtre tabanlı öznitelik seçimi yaklaşımının, kullanılan 9 ortak veri kümesine dayalı duyu sınıflandırması için başarılı sonuçlar sergilediğini göstermektedir. Ek olarak, elde edilen sonuçlar çeşitli duyu analizi algoritmalarının en gelişmiş sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Ortalama doğruluk oranı incelendiğinde, önerilen yaklaşımın ele alınan 6 son teknoloji yöntemin 4'ünden daha yüksek sınıflandırma başarısı yakaladığı görülmüştür.

Bu makalenin geri kalan bölümleri aşağıdaki gibi özetlenmiştir. Bölüm 2, öznitelik seçme yöntemlerini ve kullanılan sınıflandırma yöntemlerini özetlemektedir. Sonrasında Bölüm 3, ele alınan öznitelik seçimi algoritmalarının değerlendirilmesi için deneysel bir çerçeve sunmakta ve bunu öznitelik seçimi yöntemleri arasında ve son teknoloji çalışmalarla karşılaştırmaktadır. Son olarak, Bölüm 4 makaleyi sonuçlandırmakta ve gelecekteki olası çalışmaları tartışmaktadır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Filtre tabanlı öznitelik seçimi

Filtre tabanlı öznitelik seçimi, tahmin modelleri kullanmak yerine öznitelik alt kümelerini bilgi içeriğine göre değerlendirir. Filtre tabanlı ölçümlerin kullanımı kolaydır, hızlıdır ve farklı sınıflandırıcılar için genelleştirilebilirler [3].

Bu alt bölüm, çalışmada kullanılan ve performansları karşılaştırılan ana filtre tabanlı öznitelik seçim yöntemlerini kısaca açıklamaktadır. Bu yöntemler; Ki-kare, Korelasyon tabanlı öznitelik seçimi, Kazanç oranı, Bilgi kazancı, OneR ve Simetrik belirsizlik katsayısıdır.

2.1.1. Korelasyon tabanlı öznitelik seçimi

Korelasyon tabanlı öznitelik seçimi, bir sınıflandırma işlemi başarıyla gerçekleştirebilen bir öznitelik alt kümesi oluşturan bir öznitelik filtreleme yöntemidir [24]. Korelasyon ölçümü, öznitelik ve sınıf arasındaki Pearson korelasyon katsayısını ölçerek bir özneliğin değerini değerlendirir. Bu ölçü, aralarındaki ilişkinin gücünü temsil eder. Korelasyon katsayısı, +1 ile -1 arasında bir değere sahiptir; burada +1, pozitif doğrusal korelasyonu, 0 doğrusal korelasyonun olmadığını ve -1, negatif doğrusal korelasyonu gösterir ve Denklem (1)'de olduğu gibi tanımlanmaktadır [25].

$$R(i) = \frac{\sum_{k=1}^m (x_{k,i} - \bar{x}_i)(y_k - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{k,i} - \bar{x}_i)^2 \cdot \sum_{k=1}^m (y_k - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

Burada, x özneliği, y sınıfı, m ise veri noktası sayısını göstermektedir.

2.1.2 Ki-kare

Ki-kare ölçüsü, sınıfa göre ki-kare istatistiğinin değerini hesaplayarak bir özneliğin değerini değerlendirir. t ve c arasındaki bağımsızlık eksikliğini ölçmek için kullanılır (burada t terim ve c sınıftır) ve bir serbestlik dereceli χ^2 dağılımı ile karşılaştırılır. Metin sınıflandırması için χ^2 ölçümü Denklem (2)'de verildiği gibi tanımlanmıştır [26].

$$X_{t,c}^2 = \frac{D \cdot (PN - MQ)^2}{(P+M) \cdot (Q+N) \cdot (P+Q) \cdot (M+N)} \quad (2)$$

Burada D, toplam belge sayısıdır. P, t terimini içeren c sınıfı belgelerin sayısıdır. Q, c olmadan meydana gelen t içeren belge sayısıdır. M, t olmadan meydana gelen c sınıfı belge sayısıdır. N, t içermeyen diğer sınıfların belge sayısıdır [3].

2.1.3. Bilgi kazancı

Bilgi kazancı, sınıfa göre kazancı ölçerek bir özneliğin değerini değerlendirir. Entropi bilgisine bağlıdır. Entropi, sistemdeki kaos veya rastgelelik derecesinin bir ölçüsüdür. Bilgi kazancı, belirsizliğin ortadan kaldırılmasından sonraki bilgi miktarını temsil eder [27]. Bilgi kazancı Denklem (3)'te tanımlanmaktadır.

$$BK(X, Y) = H(X) - H(X|Y) \quad (3)$$

Burada X öznitelik, Y ise sınıfı göstermektedir.

2.1.4. Kazanç oranı

Bilgi kazanım oranı olarak da bilinen kazanç oranı, kararlı değerlendirmeye yönelik önyargıyı (bias) azaltır [28]. Öznitelik entropisi (içsel bilgi) tarafından kazanılan bilgilerin bölünmesiyle hesaplanır. Kazanç oranı Denklem (4)'teki formül ile hesaplanmaktadır.

$$KO = \frac{BK(X)}{İçselBilgi(X)} \quad (4)$$

Burada X özniteliği göstermektedir.

2.1.5. OneR

Bu yöntem, 1R sınıflandırıcısını kullanarak her bir özniteliği ayrı ayrı değerlendirmektedir. Bu sınıflandırıcının kuralı sadece öznitelik değerlerine ve konuya bağlıdır. Böylece, her öznitelik ve özniteliğin her bir değeri için, veri kümesini sınıflandırmak için yalnızca o öznitelik kullanılacaksa üretilen hata hesaplanır. Daha sonra hata sayısı en az olan öznitelik seçilir. Bir öznitelik seçme yöntemi olarak, algoritma elde edilen hata oranına göre (her öznitelik tarafından bağımsız olarak) öznitelikleri azalan şekilde sıralar ve istenen ilk öznitelik sayısını korur [29].

2.1.6. Simetrik belirsizlik

Simetrik belirsizlik katsayısı, çok değerli özniteliklere yönelik önyargıyı azaltan bilgi kazancının bir modifikasyonudur. Sınıfa göre simetrik belirsizliği ölçerek bir özniteliğin değerini değerlendirir. Simetrik belirsizlik Denklem (5)'te gösterilmiştir [28].

$$SB(X, Y) = 2 \frac{BK(X, Y)}{H(X) + H(Y)} \in [0, 1] \quad (5)$$

Burada X özniteliği, Y ise sınıfı göstermektedir.

2.2. Sınıflandırma

Sınıflandırma aşaması, etiketli verilere göre kalıba uygun bir kategoriye atar. Bu çalışmada Destek vektör makinesi (DVM), Çok terimli Naive Bayes (ÇTNB) ve Lojistik regresyon (LR) sınıflandırma modelleri kullanılmıştır. Bu öğrenme modelleri aşağıdaki alt bölümlerde kısaca açıklanmaktadır.

2.2.1. Çok terimli Naive Bayes

Çok terimli Naive Bayes modeli, çok değişkenli Bernoulli olay modeli yerine belge uzunluklarının belgelerdeki sınıftan bağımsız olduğunu varsayarak sözcük sıklığı bilgisini kullanan üretken bir modeldir (örneğin, kelimelerin uzayı üzerinde ikili vektör) [30]. Sınıflandırıcı, kelime sıklığı bilgisinden yararlandığı için metin sınıflandırma görevleri için çok uygundur.

2.2.2. Destek vektör makinesi

Destek vektör makinesi, hem doğrusal hem de doğrusal olmayan verileri sınıflandırmak için, sınıflandırma ve regresyon analizi için denetimli bir öğrenme algoritması oluşturur [31]. Destek vektör makinesi ile, orijinal veri kümesinin daha yüksek bir boyuta, yani verileri sınıflara bölmek için karar sınırı görevi gören bir hiper düzleme dönüştürülmesi için doğrusal olmayan bir eşleştirme yöntemi kullanılır [32]. Destek vektör makinesini kullanarak, amaç tipik olarak verileri farklı sınıflara bölmek için en uygun karar sınırını belirlemektir. Metin madenciliği,

yüksek boyutlu öznitelik uzayı, birkaç alakasız öznitelik ve doğrusal olarak ayrılabilir kategorizasyon sergilediği için Destek vektör makinesi metin sınıflandırması için uygun bir algoritmadır [33].

2.2.3. Lojistik regresyon

Lojistik regresyon, olayların meydana gelme olasılığını bir dizi öngörücü değişkenin doğrusal bir fonksiyonu olarak modelleyen ve bağımlı değişkenlerin değerini tahmin etmek için kullanılan bir doğrusal regresyon genellemesidir. Bağımlı değişkenin nokta tahminini tahmin etmek yerine, oluşma ihtimalini tahmin etmek için bir tahmin modeli oluşturur. Lojistik regresyon, sınıflandırma için basit ve etkili bir araç olarak da kullanılabilir [9,34].

3. Deneysel Çalışma

3.1. Deneysel kurulum

Öznitelik seçimi algoritmalarının performans analizi Java programla dili ve WEKA [35] kütüphanesi kullanılarak Intel® Core™ i5 3210M 2.50 GHz CPU konfigürasyonlu bir bilgisayarda tek çekirdekli olarak gerçekleştirilmiştir. Bazı ön testlerden sonra, duygu sınıflandırma veri kümelerini performans sonuçları elde etmek için Destek vektör makinesi, Çok terimli Naive Bayes ve Lojistik regresyon olmak üzere üç sınıflandırıcı kullanılmıştır. Modeller için parametre değerleri WEKA'da varsayılan değerlere ayarlanmıştır. Duygu sınıflandırması veri kümelerini işlemek için kelime torbası çerçevesini (bag-of-words), tek terimli öznitelikler (unigram features) ve terim frekansı-ters belge frekansı (term frequency-inverse document frequency - tf-idf) ölçümü benimsenmiştir. Bu amaçla, dizi özniteliklerini dizgilerdeki metinden sözcük oluşum bilgisini gösteren bir dizi sayısal özniteliğe dönüştürmek için StringToWordVector uygulanmıştır. Ayrıca güvenilir sonuçlar elde etmek için 10 katmanlı çapraz doğrulama uygulanmıştır. Bu işlemde veri seti rastgele 10 parçaya bölünür. Her parça bir test seti olarak kullanılırken, kalan diğer parçalar eğitim seti olarak kullanılır. İşlem 10 kez tekrarlanır ve her seferinde test için farklı katmanlar ele alınır. Daha sonra modelin ortalaması alınır ve sonlandırılır.

3.2. Duygu sınıflandırma veri kümeleri

Bu çalışmada, kullanılan öznitelik seçimi algoritmanın performanslarını değerlendirmek için Whitehead and Yaeger'den [23] 9 adet duygu analizi veri seti kullanılmıştır. 9 açık veri kümesinin adı camera, camp, doctor, drug, laptop, lawyer, music, radio ve tv'dir. Bu veri kümeleri yaklaşık %50 olumlu ve %50 olumsuz incelemeden oluşmaktadır. Veri kümelerinin özellikleri Tablo 1'de listelenmiştir. Fikir madenciliği/duygu madenciliği veri kümelerinin kısa açıklamaları Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan duygu sınıflandırması veri kümelerinin özellikleri

Veri kümesi	Öznitelik sayısı	Olumlu gözlem	Olumsuz gözlem	Gözlem sayısı
camera	1457	250	248	498
camp	1810	402	402	804
doctor	1811	739	739	1478
drug	1312	401	401	802
laptop	1840	88	88	176
lawyer	2123	110	110	220
music	1441	291	291	582
radio	1758	502	502	1004
tv	2423	235	235	470

Tablo 2. Kullanılan duygu sınıflandırması veri kümelerinin açıklamaları

Veri kümesi	Açıklama
camera	Amazon.com'dan dijital kamera incelemeleri
camp	CampRatingz.com'dan yaz kampı incelemeleri
doctor	RateMDs.com'dan doktor yorumları
drug	DrugRatingz.com'dan farmasötik ilaç incelemeleri
laptop	Amazon.com'dan dizüstü bilgisayar incelemeleri
lawyer	LawyerRatingz.com'dan avukatların yorumları
music	Amazon.com'dan müzik CD'si incelemeleri
radio	RadioRatingz.com'dan radyo programı incelemeleri
tv	TVRatingz.com'dan TV şovlarının değerlendirmeleri

3.3. Değerlendirme ölçümleri

Yöntemin performansını değerlendirmek için sınıflandırma doğruluk oranı, kesinlik, duyarlılık ve F-ölçütü dâhil olmak üzere 4 farklı değerlendirme ölçütü kullanılmıştır. Sınıflandırma doğruluğu, gerçek pozitiflerin (True pozitive - TP) ve gerçek negatiflerin (True negative - TN) toplamının toplam örnek sayısına bölünmesiyle hesaplanır. Doğruluk oranı hesaplanması Denklem (6)'da sunulmuştur.

$$\text{Doğruluk oranı} = \frac{\text{TN} + \text{TP}}{\text{Toplam gözlem sayısı}} \quad (6)$$

Kesinlik, pozitif tahmin değeridir. Gerçek pozitiflerin sayısının, gerçek pozitiflerin ve yanlış pozitiflerin (False positive - FP) toplamına bölünmesiyle hesaplanır. Kesinlik formülü Denklem (7)'de tanımlanmıştır.

$$\text{Kesinlik} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}} \quad (7)$$

Duyarlılık, gerçek pozitif oran veya isabet oranıdır. Gerçek pozitiflerin sayısının, gerçek pozitiflerin ve yanlış negatiflerin (False negative - FN) toplamına bölünmesiyle hesaplanır. Duyarlılık formülü Denklem (8)'de tanımlanmıştır.

$$\text{Duyarlılık} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}} \quad (8)$$

F-ölçütü, kesinlik ve duyarlılığın harmonik ortalamasıdır. Denklem (9)'da tanımlanmıştır.

$$F - \text{ölçütü} = 2 * \frac{\text{Kesinlik} * \text{Duyarlılık}}{\text{Kesinlik} + \text{Duyarlılık}} \quad (9)$$

3.4. Ön deneyler

Geçmiş çalışmalarda aynı veri kümesini kullanan çalışmalarda [8-12] Destek vektör makinesi (DVM) ve Lojistik regresyon (LR) yöntemlerinin başarılı sonuçlar sergilediği görülmüştür. Gökalp et al. [3] tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise Bayes yaklaşımlarının performansı test edilmiş ve Çok terimli Naive Bayes (ÇTNB) öne çıkan yöntem olmuştur. Bu bilgiler ışığında, metinden duygu sınıflandırmasında kullanmak için DVM, LR ve ÇTNB olmak üzere üç sınıflandırıcının performansı analiz edip karşılaştırılmıştır. Bu nedenle, öznitelik seçimi olmadan 9 duygu sınıflandırması veri kümesi için sınıflandırıcı başına doğruluk oranları 10 katmanlı çapraz doğrulama ile hesaplanmıştır. Elde edilen doğruluk oranları Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Öznitelik seçimi olmadan DVM, LR ve ÇTNB sınıflandırıcılarının doğruluk oranları (%)

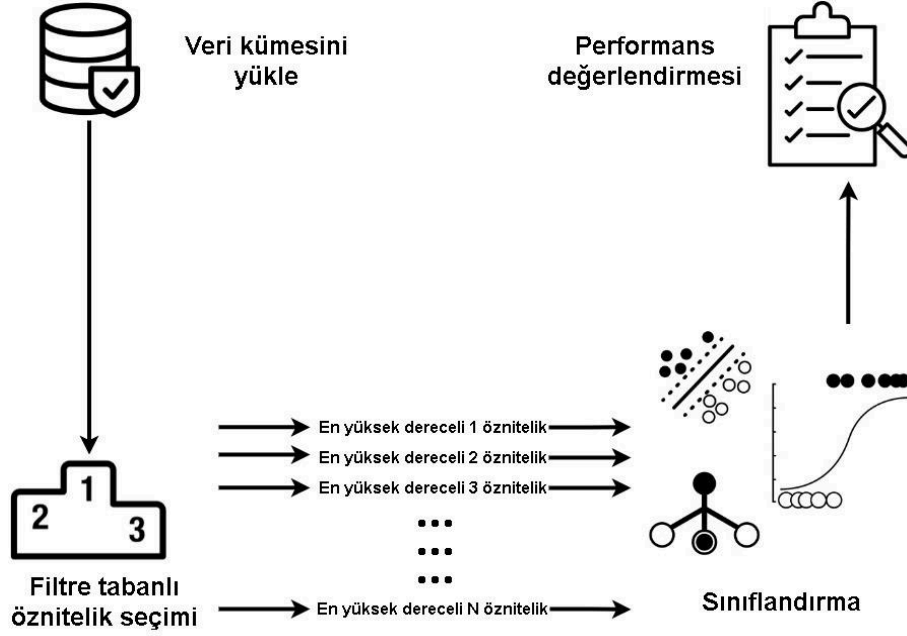
Veri kümesi	DVM	LR	ÇTNB
camera	75.30	77.11	81.33
camp	94.08	79.85	89.55
doctor	85.79	59.07	88.50
drug	70.32	56.23	73.57
laptop	80.11	85.23	88.64
lawyer	85.55	88.18	85.91
music	69.59	70.79	80.07
radio	72.01	69.02	77.79
tv	79.15	80.00	77.45
Ortalama	79.10	73.94	82.53

Ortalama doğruluk değerlerine göre en yüksek ortalama doğruluk değeri ÇTNB için %82,53 hesaplanırken, DVM için %79,10 ve LR için %73,94 hesaplanmıştır. Ortalama doğruluk oranları ele alındığında çalışmanın devamında ÇTNB yönteminin kullanılmasına karar verilmiştir.

3.5. Hesaplama sonuçları

Filtre tabanlı öznitelik seçimi algoritmaları öznitelikleri gerçekleştirdikleri hesaplamalar sonucunda derecelendirmektedir. Bu algoritmalarından elde edilen değerler ile en yüksek puana sahip N elemanlı alt kümeler oluşturulmuş ve sınıflandırma performansları test edilmiştir. Örnek ile açıklanacak olursa, öznitelik seçim

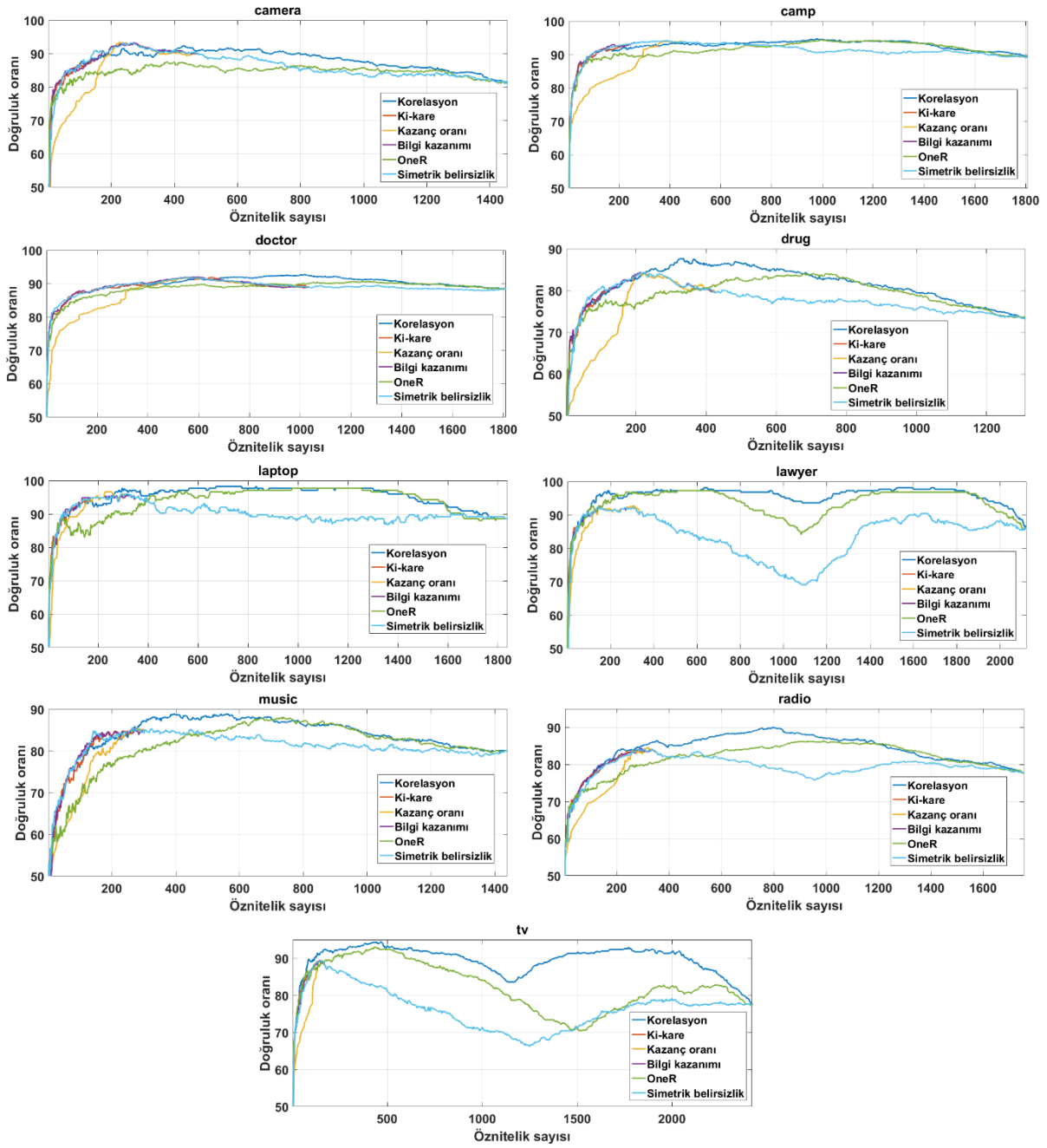
algoritması sonucunda öznitelik puanları büyükten küçüğe F30, F55, F61, F22, ..., F198 gibi bir sıralamaya sahip olsun. Öncelikli olarak F30, devamında F30 ve F55, sonrasında F30, F55 ve F61 olacak şekilde bütün öznitelikler alt kümeye dâhil oluncaya kadar sınıflandırma performansları değerlendirilmiştir. Oluşturulan öznitelik seçimi yönteminin yapısı Şekil 1’de sunulmaktadır.



Şekil 1. En iyi N elemanlı alt küme seçimi yaklaşımı akış şeması

Şekil 1’de önerilen yaklaşımın algoritması Algoritma 1’de detaylandırılmıştır. Bu yaklaşım ile 9 veri kümesi, 6 farklı öznitelik seçimi yöntemi ile test edilmiştir. Veri kümelerine göre elde edilen doğruluk oranlarındaki değişim Şekil 2’de sunulmuştur.

Algoritma 1: En iyi N elemanlı alt küme yaklaşımı algoritması	
1	$V \leftarrow$ veri kümesini yükle;
2	$\text{filtreTabanlıPuanlar}[] \leftarrow$ filtre tabanlı bir yöntemle öznitelikler için puanları hesapla;
3	$\text{oznitelikSirasi}[] \leftarrow$ sırala(V , $\text{filtreTabanlıPuanlar}$);
4	$\text{oznitelikSayisi} \leftarrow$ toplam öznitelik sayısı;
5	for $i \leftarrow 1$ to oznitelikSayisi do
6	$\text{seciliOznitelikler}[i] \leftarrow$ false;
7	end
8	for $j \leftarrow 1$ to oznitelikSayisi do
9	$\text{seciliOznitelikler}[\text{oznitelikSirasi}[j]] \leftarrow$ true;
10	$\text{basariMetrikleri} \leftarrow$ sınıflandır(V , $\text{seciliOznitelikler}$);
11	kaydet(basariMetrikleri);
12	end



Şekil 2. Veri kümelerinin öznitelik seçimi yöntemlerine göre sınıflandırma doğruluklarındaki değişim

Şekil 2 incelendiğinde bütün veri kümelerinde en yüksek sınıflandırma başarısına hemen hemen ilk 400 öznitelik kullanılarak ulaşıldığı görülmektedir. Öyle ki bazı veri kümelerinde ilk 50 öznitelik ile ciddi bir başarı artışının olduğu göze çarpmaktadır. Grafikler incelendiğinde tüm veri kümelerinde Korelasyon tabanlı öznitelik seçimi yaklaşımının başarılı sonuçlar sergilediği, Simetrik belirsizlik katsayısı ve OneR yöntemlerinin derecelendirdiği öznitelikler ile oluşturulan alt kümelerde ise öznitelik sayısı arttıkça sınıflandırma başarısında düşüşün gerçekleştiği görülmektedir. Genel olarak Ki-kare, Bilgi kazancı ve Korelasyon tabanlı öznitelik seçimi yöntemleri hızlı bir şekilde en iyi sonuçlarını yakalarken, Kazanç oranı, OneR ve Simetrik belirsizlik katsayısından elde edilen alt kümelerde en iyi sonucu yakalamak için daha fazla sayıda öznitelige ihtiyaç duyulmuştur. Şekil 2’de sunulan deneylerin en iyi sonuçlarına ait ayrıntılı sayısal veriler Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 4. Veri kümelerinden öznitelik seçimi yöntemlerine göre elde edilen en iyi sonuçlara ait sayısal veriler

	camera					camp				
Yöntem	# öz.	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F-ölç.	# öz.	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F-ölç.
Korelasyon	427	92.37	0.934	0.911	0.922	974	94.65	0.959	0.933	0.946
Ki-Kare	236	93.37	0.935	0.931	0.933	378	94.15	0.956	0.925	0.941
Kazanç Oranı	226	93.57	0.935	0.935	0.935	372	94.28	0.956	0.928	0.942
Bilgi Kazancı	236	93.37	0.935	0.931	0.933	378	94.15	0.956	0.925	0.941
OneR	376	87.55	0.894	0.851	0.872	994	94.40	0.952	0.935	0.944
Simetrik Belirsizlik	236	93.37	0.935	0.931	0.933	378	94.15	0.956	0.925	0.941

	doctor					drug				
Yöntem	# öz.	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F-ölç.	# öz.	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F-ölç.
Korelasyon	1014	92.76	0.939	0.915	0.927	327	87.78	0.867	0.893	0.880
Ki-Kare	563	92.02	0.933	0.905	0.919	211	84.41	0.842	0.848	0.845
Kazanç Oranı	555	91.88	0.932	0.904	0.918	209	84.41	0.842	0.848	0.845
Bilgi Kazancı	591	92.02	0.927	0.912	0.920	211	84.41	0.842	0.848	0.845
OneR	1249	90.66	0.908	0.905	0.907	679	84.16	0.819	0.878	0.847
Simetrik Belirsizlik	572	91.95	0.932	0.905	0.918	209	84.41	0.842	0.848	0.845

	laptop					lawyer				
Yöntem	# öz.	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F-ölç.	# öz.	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F-ölç.
Korelasyon	671	98.30	0.989	0.977	0.983	632	98.18	0.982	0.982	0.982
Ki-Kare	316	96.02	0.955	0.966	0.960	139	92.27	0.919	0.927	0.923
Kazanç Oranı	226	96.59	0.966	0.966	0.966	292	92.72	0.898	0.964	0.930
Bilgi Kazancı	316	96.02	0.955	0.966	0.960	139	92.27	0.919	0.927	0.923
OneR	975	97.72	0.967	0.989	0.978	449	97.27	0.973	0.973	0.973
Simetrik Belirsizlik	291	96.02	0.955	0.966	0.960	138	92.27	0.919	0.927	0.923

	music					radio				
Yöntem	# öz.	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F-ölç.	# öz.	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F-ölç.
Korelasyon	384	88.83	0.853	0.938	0.894	797	90.14	0.897	0.906	0.902
Ki-Kare	278	85.40	0.824	0.900	0.860	289	83.96	0.835	0.847	0.841
Kazanç Oranı	281	85.57	0.818	0.914	0.864	314	84.56	0.838	0.857	0.847
Bilgi Kazancı	323	85.40	0.832	0.887	0.859	287	84.36	0.835	0.857	0.846
OneR	732	88.14	0.868	0.900	0.884	987	86.35	0.863	0.865	0.864
Simetrik Belirsizlik	263	85.57	0.817	0.918	0.864	304	84.26	0.831	0.861	0.845

	tv				
Yöntem	# öz.	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F-ölç.
Korelasyon	435	94.47	0.945	0.945	0.945
Ki-Kare	142	89.57	0.939	0.847	0.890
Kazanç Oranı	142	89.36	0.938	0.843	0.888
Bilgi Kazancı	134	89.15	0.938	0.838	0.885
OneR	429	92.98	0.931	0.928	0.930
Simetrik Belirsizlik	144	89.36	0.943	0.838	0.887

Tablo 4 incelendiğinde camera veri kümesi için OneR yaklaşımı dışında %90'ın üzerinde sınıflandırma başarısı yakalanmıştır. En başarılı sınıflandırma Kazanç oranı tarafından seçilen öznitelik alt kümesi ile sağlanmıştır. Bu sınıflandırma için 226 adet öznitelik kullanılmıştır. camp veri kümesinde bütün yaklaşımlar ile %94'ün üzerinde doğruluk oranı elde edilmiştir. Elde edilen en iyi sonuç %94.65 (974 öznitelik) ile Korelasyon tabanlı öznitelik seçimi ile sağlanmıştır. Kazanç oranı ile ise 372 adet öznitelik ile %94.28 doğruluk oranı yakalanmıştır. drug ve music veri kümelerinde ise en iyi sınıflandırma doğruluğu %87.78 (327 öznitelik) ve %88.83'te (384 öznitelik) sınırlı kalmıştır. laptop ve lawyer veri kümelerinde %98'in üzerinde bir başarı yakalanmıştır. Bu sınıflandırmalar için özniteliklerin 3'te 1'inden daha az sayıda öznitelik ihtiyacı duyulmuştur. radio veri kümesinde %90, tv veri kümesinde %94 ve son olarak doctor veri kümesinde %92'lik bir sınıflandırma başarısı yakalanmıştır. Bu sınıflandırmalar için radio ve doctor veri kümelerinde özniteliklerin yaklaşık olarak yarısı, tv veri kümesinde ise yaklaşık %18'i kullanılmıştır. Veri kümelerine göre (sırasıyla camera, camp, doctor, drug, laptop, lawyer, music, radio ve tv) hangi öznitelik yönteminin kaçınıcı sırada yer aldığı daha anlaşılır bir şekilde sunmak amacı ile Tablo 5 oluşturulmuştur. Tabloda ÖS öznitelik seçimi yöntemini, Doğ. sınıflandırma doğruluk oranını, #öz. öznitelik sayısını ifade etmektedir. Bunların dışında kullanılan kısaltmalarda KO Kazanç oranı, KK Ki-kare, BK Bilgi kazancı, SB Simetrik belirsizlik katsayısı, KR Korelasyon tabanlı öznitelik seçimi, 1R ise OneR yöntemlerini ifade etmektedir.

Tablo 5. Öznitelik seçimi yöntemlerinin başarı sırası

Veri kümesi	1. sıra			2. sıra			3. sıra			4. sıra			5. sıra			6. sıra		
	ÖS	Doğ.	#öz.	ÖS	Doğ.	#öz.	ÖS	Doğ.	#öz.	ÖS	Doğ.	#öz.	ÖS	Doğ.	#öz.	ÖS	Doğ.	#öz.
camera	KO	93.57	226	KK	93.37	236	BK	93.37	236	SB	93.37	236	KR	92.37	427	1R	87.55	376
camp	KR	94.65	974	1R	94.40	994	KO	94.28	372	KK	94.15	378	BK	94.15	378	SB	94.15	378
doctor	KR	92.76	1014	KK	92.02	563	BK	92.02	591	SB	91.95	572	KO	91.88	555	1R	90.66	1249
drug	KR	87.78	327	KO	84.41	209	SB	84.41	209	KK	84.41	211	BK	84.41	211	1R	84.16	679
laptop	KR	98.30	671	1R	97.73	975	KO	96.59	226	SB	96.02	291	KK	96.02	316	BK	96.02	316
lawyer	KR	98.18	632	1R	97.27	449	SB	92.27	138	KK	92.27	139	BK	92.27	139	KO	92.27	292
music	KR	88.83	384	1R	88.14	732	SB	85.57	263	KO	85.57	281	KK	85.40	278	BK	85.40	323
radio	KR	90.14	797	1R	86.35	987	KO	84.56	314	BK	84.36	287	SB	84.26	304	KK	83.96	289
tv	KR	94.47	435	1R	92.98	429	KK	89.57	142	KO	89.36	142	SB	89.36	144	BK	89.15	134

Korelasyon tabanlı öznitelik seçimi 8 veri kümesi için en iyi öznitelik alt kümesini sağlayan, OneR ise 6 veri kümesinde en iyi ikinci sonucu sağlayan öznitelik seçimi yöntemi olmuştur. camera ve camp veri kümelerinde Ki-kare, Simetrik Belirsizlik ve Bilgi kazancı yöntemlerinden sağlanan en iyi sonuçlar eşit çıkmıştır. doctor veri kümesinde ise Ki-kare ve Bilgi kazancı tarafından eşit doğrulukta sonuçlar elde edilmiştir. Fakat bu sonuç için Ki-kare 563, Bilgi kazancı yöntemi ise 591 adet öznitelik seçmiştir. Öznitelik sayıları göz önünde bulundurulduğunda bu veri kümesi için Ki-kare yöntemi daha başarılı olarak listelenmiştir. drug veri kümesinde ise 4 öznitelik seçimi yaklaşımından aynı sonuçlar elde edilmiştir. Kazanç oranı ve Simetrik belirsizlik 209, Ki-kare ve Bilgi kazancı ise 211 öznitelik ile bu sınıflandırmayı gerçekleştirmiştir. Bu nedenle Kazanç oranı ve Simetrik belirsizlik listede Ki-kare ve Bilgi kazancıdan önce yer almıştır. laptop %98.30 ile en yüksek başarının yakalandığı veri kümesidir. Bu veri kümesinde Bilgi kazancı, Ki-kare ve Simetrik belirsizlik tarafından sağlanan öznitelik alt kümelerinden eşit doğruluk oranında sınıflandırma gerçekleşmiştir. Sıralamada daha az öznitelik ile aynı sonucu yakalayan Simetrik belirsizlik önde yer almıştır. lawyer veri kümesinde OneR ve Korelasyon tabanlı öznitelik seçimi dışındaki yöntemlerin sağladığı sonuçlar eşit çıkmıştır. music veri kümesinde ise Simetrik belirsizlik ve Kazanç oranı, Ki-kare ve Bilgi kazancı yöntemlerinin sağladığı alt kümelerden elde edilen en iyi sonuçlar eşit çıkmıştır. Veri kümelerine göre elde edilen en başarılı sınıflandırmalara ait sayısal veriler Tablo 6’da sunulmaktadır.

Tablo 6. 9 duygu sınıflandırma veri kümesinden elde edilen en iyi sonuçlar

Veri kümesi	Yöntem	# öznitelik	Doğruluk oranı	Kesinlik	Duyarlılık	F-ölçütü
camera	Kazanç Oranı	226	93.57	0.935	0.935	0.935
camp	Korelasyon	974	94.65	0.959	0.933	0.946
doctor	Korelasyon	1014	92.76	0.939	0.915	0.927
drug	Korelasyon	327	87.78	0.867	0.893	0.880
laptop	Korelasyon	671	98.30	0.989	0.977	0.983
lawyer	Korelasyon	632	98.18	0.982	0.982	0.982
music	Korelasyon	384	88.83	0.853	0.938	0.894
radio	Korelasyon	797	90.14	0.897	0.906	0.902
tv	Korelasyon	435	94.47	0.945	0.945	0.945
Ortalama	-	640.56	94.34	0.942	0.946	0.944

Tablo 6 incelendiğine camera veri kümesi dışında bütün veri kümelerinde en yüksek sınıflandırma doğruluk oranının Korelasyon tabanlı öznitelik seçimi tarafından sağlanan öznitelik alt kümeleri ile elde edildiği görülmektedir. Ortalamada %94.34 doğruluk oranı yakalanmıştır. Bu sınıflandırmalar için kullanılan ortalama öznitelik sayısı ise 640 olarak hesaplanmıştır. Yani, ortalama özniteliklerin yaklaşık olarak %65’i lenmiştir. Ayrıca ortalama kesinlik drug, music ve radio; ortalama duyarlılık drug ve ortama F-ölçütü değerleri drug ve music veri kümeleri dışında %90’ın üzerinde hesaplanmıştır. Sonuçlar duygu sınıflandırmada filtre tabanlı öznitelik seçiminin etkinliğini göstermektedir.

3.6. Duygu sınıflandırması için son teknoloji algoritmalarla karşılaştırma

DeneySEL analiz bu bölümünde, filtre tabanlı öznitelik seçimi yöntemlerinin performansı, 9 genel veri kümesini kullanan diğer son teknoloji duygu sınıflandırma algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. Seçilen son teknoloji algoritmalar şunlardır: Gökalp et al. [3] yinelemeli açgözlü (YA) algoritması, Onan et al. [10] hibrit bir budama (HB) yaklaşımı tabanlı algoritması; Onan et al. [9] çok amaçlı diferansiyel değerlendirme tabanlı ağırlıklı oylama topluluğu (AOT) algoritması; Jalilvand and Salim [11] öznitelik birleştirme (ÖB) algoritması; Wang et al. [8] rastgele alt uzay (RAU) yaklaşımı; ve Yang et al. [12] çoklu sınıflandırıcı sistemleri (ÇSS) tabanlı algoritması. Bu çalışma filtre tabanlı yaklaşım (FTY) olarak isimlendirilmiştir. Tablo 7, algoritma/veri kümesi çifti başına doğruluk oranlarını yüzde olarak bildirmektedir.

Tablo 7. 9 duygu sınıflandırması veri kümesi için filtre tabanlı öznelik seçimi yaklaşımının literatürdeki son teknoloji algoritmalarla doğruluk oranları (%) karşılaştırılması. BY, bilgi yok anlamına gelmektedir.

Veri kümesi	YA	HB	FTY	AOT	ÖB	RAU	CSS
camera	97.15	95.92	93.57	92.87	79.80	76.49	BY
camp	97.99	96.58	94.65	93.74	86.00	85.26	82.89
doctor	95.64	95.65	92.76	91.05	86.10	85.03	83.87
drug	92.39	94.27	87.78	89.62	69.50	68.82	BY
laptop	99.89	98.92	98.30	98.86	78.86	79.79	BY
lawyer	99.59	97.90	98.18	97.87	80.91	83.86	BY
music	94.97	94.16	88.83	89.82	70.69	69.59	73.18
radio	93.05	93.37	90.14	88.60	75.30	70.66	67.75
tv	97.38	96.73	94.47	95.74	79.79	76.06	BY
Ortalama	96.45	95.94	94.34	93.13	78.55	77.28	-

Ortalama doğruluk değerlerine göre, ele alınan filtre tabanlı öznelik seçimi yaklaşımı 6 rakibinden 4'ünü %94,34 ile geride bırakmıştır. Ayrıca, 9 veri kümesinden 5 tanesi için en iyi üçüncü, 1 tanesi en iyi ikinci sonucu sağlamıştır. Bu sonuçlar değerlendirilirken karşılaştırılan çalışmaların sarmalayıcı tabanlı yaklaşımlar olduğu, bu çalışmada ise en iyi N elemanlı alt küme yaklaşımı ile bu sonuçların elde edildiği göz önünde bulundurulmalıdır. Daha küçük ve sınırlı bir arama uzayında elde edilen bu sonuçlar ele alınan yaklaşımın umut verici olduğunu göstermektedir.

4. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada duygu sınıflandırma için filtre tabanlı öznelik seçimi yöntemlerinin performansları karşılaştırmalı bir şekilde değerlendirilmiştir. Yöntemlerden elde edilen öznelik puanlarına göre en iyi N elemanlı alt kümeler oluşturulmuş ve Çok terimli Naive Bayes yöntemi ile sınıflandırılmıştır. Önerilen yaklaşım literatürde yaygın olarak bulunan 9 adet duygu analizi veri kümesi üzerinde test edilmiştir. Elde edilen ortalama sonuçlar son teknoloji algoritmaların 4'ünden daha yüksek sınıflandırma başarısı sunmuştur. Ayrıca, özneliklerin büyük bir çoğunluğunun elendiği görülmektedir. Bu sayede hem bellekten hem de zamandan tasarruf sağlanmaktadır. Daha küçük bir arama uzayında başarılı sonuçlar sergileyen bu yaklaşımın gelecek çalışmalarda alt bir basamak olarak kullanılıp daha başarılı sonuçlara ulaşabileceği düşünülmektedir. Gelecek çalışmalarda filtre tabanlı öznelik seçimi yöntemlerinden elde edilen öznelik puanlarının sezgi olarak kullanıldığı sarmalayıcı tabanlı öznelik seçimi algoritmalarının geliştirilerek daha başarılı sonuçların elde edilmesi planlanmaktadır.

Kaynaklar

- [1] A. Abbasi, H. Chen and A. Salem, "Sentiment analysis in multiple languages: Feature selection for opinion classification in web forums", ACM Trans. Inf. Syst. 2018; 26(3): 1-34.
- [2] J.R. Chang, H.Y. Liang, L.S. Chen and C.W. Chang, "Novel feature selection approaches for improving the performance of sentiment classification", J. Ambient Intell. Hum. Comput. 2020; 1-14.
- [3] O. Gokalp, E. Tasci and A. Ugur, "A novel wrapper feature selection algorithm based on iterated greedy metaheuristic for sentiment classification", Expert Syst. Appl. 2020; 146: 113176.
- [4] W. Medhat, A. Hassan and H. Korashy, "Sentiment analysis algorithms and applications: A survey", Ain Shams Eng. J. 2014; 5(4): 1093-1113.
- [5] G. Wang, J. Sun, J. Ma, K. Xu and J. Gu, "Sentiment classification: The contribution of ensemble learning", Decis. Support Syst. 2014; 57: 77-93.
- [6] P. Kumbhar and M. Mali, "A survey on feature selection techniques and classification algorithms for efficient text classification", International Journal of Science and Research, 2013; 14(5): 2319-7064.
- [7] J.T. Pintas, L.A. Fernandes and A.C.B. Garcia, "Feature selection methods for text classification: a systematic literature review", Artif. Intell. Rev. 2021; 54(8): 6149-6200.
- [8] G. Wang, Z. Zhang, J. Sun, S. Yang and C.A. Larson, "POS-RS: A Random Subspace method for sentiment classification based on part-of-speech analysis", Inf. Process. Manage. 2015; 51(4): 458-479.
- [9] A. Onan, S. Korukoğlu and H. Bulut, "A multiobjective weighted ensemble classifier based on differential evolution algorithm for text sentiment classification", Expert Syst. Appl. 2016; 62: 1-16.
- [10] A. Onan, S. Korukoğlu and H. Bulut, "A hybrid ensemble pruning approach based on consensus clustering and multi-objective evolutionary algorithm for sentiment classification", Inf. Process. Manage. 2017; 53(4): 814-833.
- [11] A. Jalilvand and N. Salim, "Feature unionization: a novel approach for dimension reduction", Appl. Soft Comput. 2017; 52: 1253-1261.
- [12] K. Yang, C. Liao and W. Zhang, "A sentiment classification model based on multiple multi-classifier systems", In International Conference on Artificial Intelligence and Security, 2019; 287-298.

- [13] A. Onan, "Bidirectional convolutional recurrent neural network architecture with group-wise enhancement mechanism for text sentiment classification", *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 2022; 34(5): 2098-2117.
- [14] C. Shao and X. Chen, "Deep-learning-based financial message sentiment classification in business management", *Comput. Intell. Neurosci.* 2022; 3888675.
- [15] J. Khan, N. Ahmad, A. Alam and Y. Lee, "Leveraging Semantic and Sentiment Knowledge for User-Generated Text Sentiment Classification", In *Proceedings of the Eighth Workshop on Noisy User-generated Text (W-NUT 2022)*, 2022; 101-105.
- [16] X. Yang, Y. Li, Q. Li, D. Liu and T. Li, "Temporal-spatial three-way granular computing for dynamic text sentiment classification", *Inf. Sci.* 2022; 596: 551-566.
- [17] E. F. Ayetiran, "Attention-based aspect sentiment classification using enhanced learning through CNN-BiLSTM networks", *Knowledge-Based Syst.* 2022; 252: 109409.
- [18] K. Karga, M. A. Toçoğlu ve A. Onan, "COVID-19 pandemi döneminde eğitimde derin öğrenmeye dayalı duygu analizi", *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2022; 24(72): 855-868.
- [19] H. Polat ve Y. Ağca, "Tripadvisor kullanıcılarının Türkçe ve İngilizce yorumları kapsamında duygu analizi yöntemlerinin karşılaştırmalı analizi", *Abant Sosyal Bilimler Dergisi*, 2022; 22(2): 901-916.
- [20] Ö. Şahinaslan, H. Dalyan ve E. Şahinaslan, "Naive Bayes sınıflandırıcısı kullanılarak Youtube verileri üzerinden çok dilli duygu analizi", *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 2022; 15(2): 221-229.
- [21] E. Ş. Dinçer, D. Kayaoğlu ve S. Safarlı, "Metin madenciliği ve duygu analizi ile siber zorbalık tespiti", *Eskişehir Türk Dünyası Uygulama Ve Araştırma Merkezi Bilişim Dergisi*, 2022; 3(2): 38-45.
- [22] M. U. Salur ve İ. Aydın, "Türkçe tweetler için derin özellik çıkarımı tabanlı yeni bir duygu sınıflandırma modeli", *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2022; 34(1): 1-13.
- [23] M. Whitehead and L. Yaeger, "Building a general purpose cross-domain sentiment mining model", In *2009 WRI world congress on computer science and information engineering 2009*; 4: 472-476.
- [24] A. S. Yuksel, F. A. Senel and I. A. Cankaya, "Classification of soft keyboard typing behaviors using Mobile device sensors with machine learning", *Arabian J. Sci. Eng.* 2019; 44(4): 3929-3942.
- [25] X.W. Chen and M. Wasikowski, "Fast: a roc-based feature selection metric for small samples and imbalanced data classification problems", In *Proceedings of the 14th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining*, 2008; 124-132.
- [26] S. Dey Sarkar, S. Goswami, A. Agarwal and J. Aktar, "A novel feature selection technique for text classification using Naive Bayes", *International scholarly research notices*, 2014; 2014: 717092.
- [27] J. Ding and L. Fu, "A Hybrid Feature Selection Algorithm Based on Information Gain and Sequential Forward Floating Search", *Journal of Intelligent Computing*, 2018; 9(3): 93.
- [28] W. Duch, "Filter methods. In *Feature Extraction*", Springer, Berlin, Heidelberg 2006; 89-117.
- [29] D. Morariu, R. Cretulescu and M. Breazu, "Feature selection in document classification", In *The fourth international conference in romania of information science and information literacy*, 2013; ISSN-L. 2247-0255.
- [30] A. McCallum and K. Nigam, "A comparison of event models for naive bayes text classification", In *AAAI-98 workshop on learning for text categorization 1998*; 752(1): 41-48.
- [31] V. Vapnik, "The nature of statistical learning theory", New York: Springer, 1995.
- [32] T. Joachims, "Text categorization with support vector machines: Learning with many relevant features", In *European conference on machine learning*, Springer, Berlin, Heidelberg 1998; 137-142.
- [33] J. Han and M. Kamber, "Data mining: concepts and techniques", 2nd. University of Illinois at Urbana Champaign: Morgan Kaufmann, 2006.
- [34] M. Kantardzic, "Data mining: concepts, models, methods, and algorithms", John Wiley & Sons, 2011.
- [35] M. Hall, E. Frank, G. Holmes, B. Pfahringer, P. Reutemann and I.H. Witten, "The WEKA data mining software: an update", *ACM SIGKDD explorations newsletter*, 2009; 11(1): 10-18.

Sığır Gübresi ve Üzüm Cibresinden Birlikte Fermantasyon Yoluyla Biyogaz Üretimi

Abdulkadir GÜL^{1*}, Hamdi Soner ALTUNDOĞAN²

^{1,2} Biyomühendislik Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

*¹ a.gul@firat.edu.tr, ² saltundogan@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 07/11/2022;

Kabul/Accepted: 26/12/2022)

Öz: Fosil enerji kaynaklarının tükenmesi, sürekli artan petrol fiyatları ve atmosfere sera gazlarının hızla yayılmasıyla çevre sorunları için artan endişeler, araştırmacıları yenilenebilir kaynaklardan temiz ve sürdürülebilir enerji elde etmek için yeni teknikler geliştirmeye yönlendirmiştir. Birçok yenilenebilir seçenek arasından rüzgâr, güneş ve biyokütle enerjileri ana kaynaklar olarak kabul edilmektedir. Sürdürülebilir enerji gereksinimlerini karşılamak için biyokütle kaynaklarını kullanan en önemli yöntemlerden birisi de biyogaz teknolojisidir. Bu çalışmada, laboratuvar ölçekli bir sistemde biyokütle kaynağı olarak sığır gübresi, üzüm cibresi ve bunların birlikte fermantasyonuyla hazırlanan karışımdan biyogaz üretiminin araştırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, oluşturulan bir biyogaz üretim sisteminde sığır gübresi, üzüm cibresi ve eşit oranlarda gübre ve cibre içeren karışımlardan %10 biyokütle oranı, 37°C fermantasyon sıcaklığı ve 60 devir/dakika karıştırma hızı şartlarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Anaerobik şartlar altında yürütülen deneylerle zamana bağlı olarak oluşan biyogaz miktarları, gazın karbondioksit içeriği ve pH değerleri belirlenmiştir. Çalışmada, 10 günlük anaerobik fermantasyon süresi sonunda sırasıyla sığır gübresi, üzüm cibresi ve bunların karışımları için elde edilen toplam biyogaz miktarları 26,3, 7,2 ve 9,8 L/kg kuru madde olarak tespit edilmiştir. Elde edilen toplam metan miktarları ise bu üç farklı materyal için sırasıyla 22,1, 5,8 ve 8,0 L/kg kuru madde olarak hesaplanmıştır.

Anahtar kelimeler: Biyokütle, biyogaz üretimi, birlikte fermantasyon, sığır gübresi, üzüm cibresi.

Biogas Production by Co-Fermentation from Cattle Manure and Grape Pulp

Abstract: The growing concerns for environmental problems with the depletion of fossil energy sources, rising oil costs, and the rapid spread of greenhouse gases into the atmosphere have led researchers to develop new techniques to obtain clean and sustainable energy from renewable sources. Wind, solar, and biomass energies are regarded as the key sources among the various renewable possibilities. One of the most important methods of using biomass resources to meet sustainable energy requirements is biogas technology. In this study, it was aimed to investigate the biogas production from cattle manure, grape pulp, and the mixture prepared for co-fermentation them as a biomass source in a laboratory-scale system. In this context, experiments were carried out in a biogas production system under the conditions of a 10% biomass ratio, a 37°C fermentation temperature, and a 60 rpm mixing speed using cattle manure, grape pulp, and mixtures containing equal proportions of manure and grape pulp. In the experiments executed under anaerobic conditions, the amounts of biogas formed depending on time, the carbon dioxide content of the gas and the pH values were all determined. In the study, at the end of the 10-day anaerobic fermentation period, the total amount of biogas obtained for cattle manure, grape pulp, and their mixtures, respectively, was determined to be 26.3, 7.2 and 9.8 L/kg dry matter. The total methane amounts obtained were calculated as to be 22.1, 5.8 and 8.0 L/kg dry matter for these three different materials, respectively.

Key words: Biomass, biogas production, co-fermentation, cattle manure, grape pulp.

1. Giriş

Çevre kirliliği ve geleneksel enerji kaynaklarının hızla tükenmesi, 21. yüzyılda insanoğlunun karşılaştığı en büyük zorluklardan birisidir [1]. Enerji maliyetlerindeki artış ve atmosferde sera gazlarının artmasıyla çevre sorunlarına yönelik artan endişeler, araştırmacıları temiz ve yenilenebilir enerji elde etmek için yeni teknikler geliştirmeye teşvik etmiştir [2, 3]. Bu nedenle, temiz ve yenilenebilir enerji arayışları dünya gündeminin ilk sıralarında yer almaktadır [4, 5]. Yenilenebilir ve ucuz oldukları için önemli fırsatlar sunan geleneksel olmayan enerji kaynakları (güneş, rüzgâr, hidro, jeotermal ve biyokütle) arasında, biyokütleden anaerobik çürütme ile gerçekleşen biyogaz üretimi son zamanlarda büyük dikkat çekmiştir [6, 7]. Biyogazın diğer yenilenebilir enerji teknolojilerine göre bazı önemli avantajları vardır. İstendiğinde metan içeriği yüksek gaz, elektrik ve ısı üretmek için depolanabilir ve kullanılabilir [8]. Hidro, güneş ve rüzgar gibi diğer yenilenebilir enerji teknolojilerine kıyasla daha az sermaye yatırımı gerektirir [9]. Ayrıca, biyogaz biyometana yükseltilebilir ve mevcut gaz şebekelerinde (doğal gaz) kullanılabilir [10].

* Sorumlu yazar: a.gul@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0003-4879-6194, ² 0000-0003-3328-9667

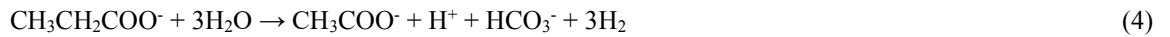
Anaerobik çürütme yoluyla biyogaz üretimi, dünya çapında artan miktarlarda üretilen organik atıkların kullanıldığı çevre dostu bir süreçtir. Proses, çeşitli oksidasyon ve/veya indirgeme durumlarında karbon atomlarına sahip karbonhidratlar, proteinler ve lipidler gibi çok çeşitli polimerik maddeleri, tek karbonlu moleküllere dönüştüren bir dizi reaksiyondan oluşur [11]. Biyogaz %80-90 metan (CH₄) gazı içeren doğal gaza kıyasla [12, 13], substrat kaynağına bağlı olarak, %50-75 CH₄, %25-45 karbondioksit (CO₂), %2-8 su buharı ve eser miktarda oksijen (O₂), azot (N₂), amonyak (NH₃), hidrojen (H₂) ve hidrojen sülfür (H₂S) içermektedir. Gazın enerji içeriği esas olarak metan gazı içeriğine bağlıdır; bu nedenle, üretimde yüksek metan içeriği amaçlanır. Biyogazın ortalama kalorifik değeri yaklaşık 21-24,5 MJ/m³tür, yani 1 m³ biyogaz 0,5-0,6 L dizel yakıtı veya yaklaşık 6 kWh enerji içeriğine karşılık gelir [14]. Anaerobik çürütme sadece fosil enerjiyi ikame ederek sera gazı emisyonlarını azaltmakla kalmaz, aynı zamanda gübre ve atık bulamaçlarının açık ortamda depolanmasından kaynaklanan sera gazı emisyonlarını da önler [15]. Endüstriyel ve belediye atık suları, tarım, belediye ve gıda sanayi atıklarının yanı sıra bitki atıkları da dahil olmak üzere çeşitli atık maddeler bu teknoloji ile arıtılabilir. Diğer birçok atık arıtma işlemine göre önemli avantajlara sahiptir. Bu arıtmanın ana ürünü, yani biyogaz, yenilenebilir bir enerji kaynağıdır ve yan ürünü, yani çürütücü kalıntısı, ise bitkiler için mevcut olan yüksek besin içeriği nedeniyle gübre olarak da kullanılabilir [16]. Anaerobik çürütme prosesinin performansı, besleme stoğunun özelliklerine ve farklı bozunma adımlarında yer alan mikroorganizmaların aktivitesine büyük ölçüde bağlıdır [17]. Organik maddelerin biyogaza dönüştürülmesinin hidroliz, asidojeniz, asetojeniz ve metanojeniz fazı olmak üzere dört ana aşaması vardır [18]. Hidroliz aşamasında, organik bileşikler aşağıdaki reaksiyonda gösterildiği gibi amino asitlere, şekerlere ve yağ asitlerine ayrılır:



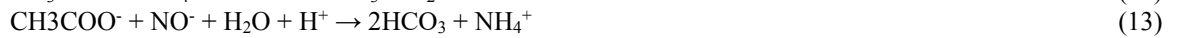
Bu reaksiyon, su kullanılarak polimerlerdeki kovalent bağları parçalayan hücre dışı hidrolitik enzimler tarafından gerçekleştirilir. Hidroliz aşamasının önemli bir özelliği yağların hidrolizi yavaş gerçekleştiğinden biyolojik parçalanmanın hızının belirlendiği aşama olmasıdır. İkinci aşama asit oluşumudur. Hidrolizden sonra üretilen ürünler daha sonra fermentatif bakteriler tarafından tipik olarak iki ile altı karbon atomundan oluşan kısa zincirli organik asitler üretmek için metabolize edilir. Bu aşamada alkoller, amonyak, H₂ ve CO₂ de üretilir. Asidogenez sırasında meydana gelen ana reaksiyonlar Denklem 2 ve 3'te gösterilmektedir:



Asit oluşumu sırasında oluşan belirli ürünler doğrudan metanojenik mikroorganizmalar tarafından kullanılabilir. Bununla birlikte, bazı bileşikler asetojeniz aşamasında asetik asit, CO₂ ve H₂'ye kadar da parçalanır. Denklem 4-7, asetojeniz fazında meydana gelen ana reaksiyonları göstermektedir:



Anaerobik çürütme işleminin son aşaması metanojenizdir. Bu aşamadaki başlıca organizmalar, ağır metaller veya elverişsiz pH değerleri gibi çevresel stres faktörlerine karşı hassas olduğu kadar oksijene de oldukça duyarlı olan metanojenik arkelerdir. Bu aşamada, metan oluşturan mikroorganizmalar tarafından asetat, H₂ ve organik asitlerin kullanılmasıyla biyogaz üretilmektedir. Denklem 8-13, metanojeniz aşamasında meydana gelen ana reaksiyonları göstermektedir:



Anaerobik çürütme için substrat olarak sığır gübresi, sahip olduğu birçok avantaj nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, gübre kullanımı, çevrede atıl kalan gübreden kaynaklanan kontrolsüz sera gazı

emisyollarının azaltılmasına yardımcı olurken, biyogaz üretimini artırır ve atık arıtma ile ilgili maliyetleri de düşürür [19, 20]. Ayrıca, sığır gübresi, bolluğu, yüksek su içeriği ve tamponlama kapasitesi gibi özellikleri nedeniyle anaerobik çürütmede genellikle birincil substrat kaynağı olarak kullanılır. Sığır gübresi, mikrobiyal büyüme için önemli olan eser elementlerin yanı sıra hemen hemen tüm temel besin maddelerini de içerir [21]. Sığır gübresinin özellikleri, yem kaynağının lif ve protein içeriği, hayvan yaşı, sindirilebilirliği ve çevresel şartlar gibi faktörlere bağlıdır [22]. Biyogaz üretiminde farklı biyokütle kaynaklarının karıştırılmasıyla (ko-substrat), daha iyi karbon ve besin dengesi sağlanması nedeniyle metan veriminin arttığı ve dolayısıyla ekonomik değerin iyileştirildiği ifade edilmektedir [23, 24]. Angelidaki vd. [25], ko-substrat olarak sığır gübresi kullanmanın iki temel avantajı olduğunu belirtmişlerdir. Bunlardan birincisi, sığır gübresinin, mikrobiyal büyüme için gerekli olan çeşitli besin kaynaklarını, eser metalleri, vitaminleri ve diğer bileşikler yapılarında bulundurmasıdır. İkincisi ise nötralizasyonla pH'ı dengelemek üzere tamponlama kapasitesini iyileştirebilir oluşudur. Braun vd. [26] ve Weiland [27], hayvan gübresinin biyolojik olarak parçalanabilen atıklarla birlikte arıtılmasının, biyogaz tesislerinde biyogaz üretimini %80-400 oranında artırabilen verimli bir teknoloji olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca, birçok çalışma, anaerobik çürütme sürecinin çevresel değişikliklere duyarlılığının, farklı organik atık kaynaklarının birleştirilmesiyle geliştirilebileceğini göstermiştir [28, 29]. Biyogaz üretiminde kullanılacak atık maddelerden birisi de üzüm cibesidir (üzüm posası). Üzüm (*Vitis vinifera* L.), hem ılıman hem de tropikal iklimlerde yetiştirilebilen bir meyve türüdür. Üzüm meyveleri esas olarak meyve suyu üretim tesisleri ve şarap işleme endüstrileri için büyük ölçekli üretimlerde kullanılır ve üretim tesislerinden çıkan üzüm cibesi önemli bir atık olarak nitelendirilmektedir. Cibre, şarapların başlıca duyuşal özelliklerini oluşturan şekerler, vitaminler, enzimler, mineral tuzlar ve fitokimyasallar açısından zengindir [30, 31]. Bununla birlikte, yapısında büyük miktarlarda glikoz bulunduran cibrenin yem fabrikalarına düşük fiyatla satılması bu tesisler için avantaj, şarap fabrikaları, meyve suyu üretim tesisleri, sirke üretim tesisleri için de dezavantaj oluşturmaktadır. Ancak cibrenin mikrobiyolojik faaliyetler sonucu yapısında bulunan organik asitler nedeniyle, tek başına bir fermentasyon substratı olarak değerlendirilmesi güçtür. Sığır gübresinin yüksek tamponlama kapasitesine sahip olması nedeniyle, cibre ile birlikte fermentasyonu bu zorluğun aşılacağı düşüncesiyle, bu iki substratın biyogaz üretiminde birlikte kullanımının araştırılmasının önemli olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle metan gazı üretmek amacıyla gübre ve üzüm cibesinin birlikte fermentasyonu araştırılmıştır. Sonuç olarak, biyogaz üretimi üzerine çeşitli faktörlerin etkilerinin araştırılması için tasarlanan bir biyoreaktör yardımıyla sığır gübresi, üzüm cibesi ve eşit oranlarda gübre ve cibre içeren karışımlardan biyogaz üretimi incelenmiştir.

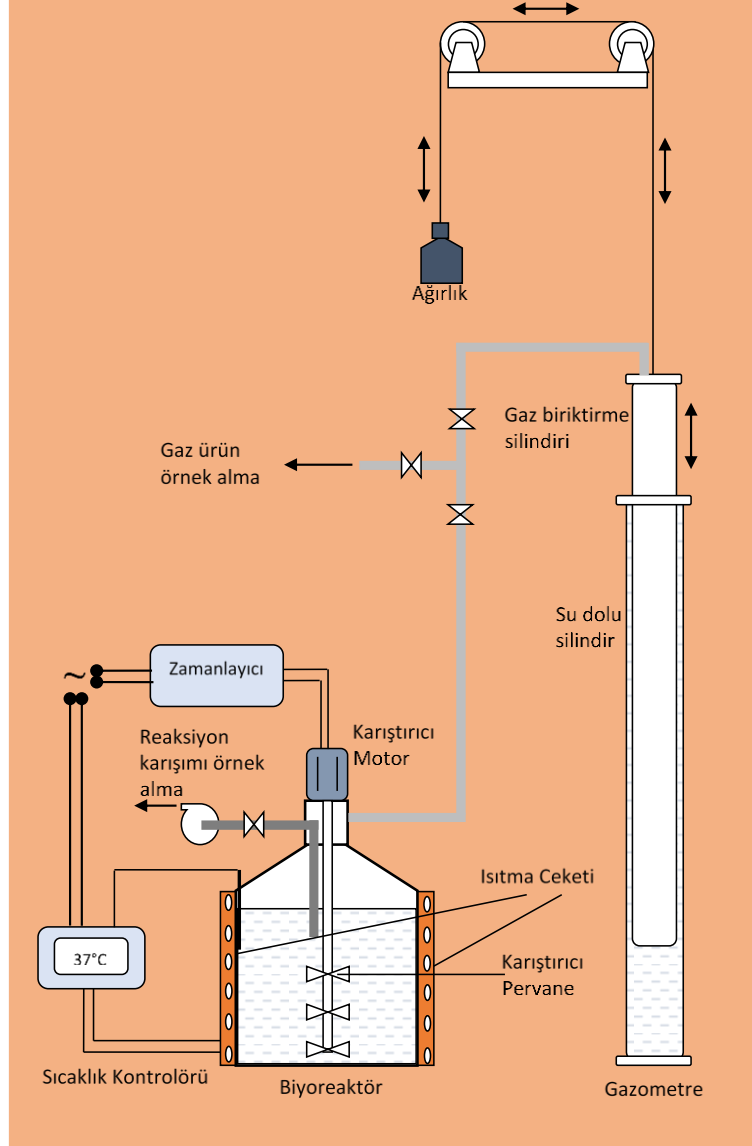
2. Materyal ve Metotlar

2.1. Materyalin Temini ve Biyogaz Üretim Sisteminin Kurulması

Biyogaz üretiminde kullanılacak biyokütle kaynaklarından sığır gübresi, Elazığ ilinde büyükbaş hayvancılığın yapıldığı çiftliklerden temin edildi. Yaklaşık 30 kg saman altıklıkla karışık olarak temin edilen yaş gübre deneylerde kullanılmak üzere laboratuvarında plastik torbalarda saklandı. Çalışmada biyogaz üretiminin inceleneceği diğer biyokütle kaynağı olan üzüm cibesi, Elazığ ilinde bulunan Mey İçki Şarap Fabrikası'ndan yaş halde yaklaşık 20 kg temin edilerek biyogaz üretim deneylerine kadar laboratuvarında bulunan derin dondurucuya plastik torbalar içerisinde konularak depolandı. Temin edilen gübre ve cibre örneklerinin nem içerikleri, örneklerin 48 saat süreyle 80°C'deki etüvde ısıtılmasını takiben 24 saat 105°C'de ısıtılarak meydana gelen ağırlık değişiminden belirlendi. Bu şekilde yapılan analizlerle gübre ve üzüm cibesinin nem içeriklerinin sırasıyla %88,7 ve %81,9 olduğu belirlendi. Dolayısıyla sığır gübresi ve üzüm cibesinin toplam kuru maddesi sırasıyla %11,3 ve %18,1'dir. Nem içeriği analizi sonucu elde edilen kurutulmuş örnekler, kapaklı porselen krozede 600°C sıcaklıkta uçucu maddeleri uzaklaştırılmak üzere fırında ısıtıldı. Meydana gelen ağırlık azalmalarından uçucu madde içerikleri belirlendi. Gübre ve cibrenin temin edildiği haliyle uçucu salt katı madde içerikleri sırasıyla %3,85 ve %11,39 olarak hesaplandı.

Biyogaz üretimi üzerine çeşitli faktörlerin etkilerinin araştırılması için oluşturulan sistem, basitçe paslanmaz çelikten bir reaktör ve çıkan biyogazın depolanabilmesi için bir gazometre düzeneğinden oluşmaktadır. Kullanılan paslanmaz çelik reaktörler yaklaşık 15 L hacminde olup damacana şeklindedir. Ağız kısmına yerleştirilen düşük devirli bir motor ve motora bağlı bir şaft yardımıyla reaksiyon karışımı 60 devir/dakika hız ile karıştırılabilmektedir. Ağız kısmında yer alan gaz çıkış portu yardımıyla oluşan biyogazın reaktör dışına taşınması mümkündür. Çıkan biyogaz iç içe geçmiş iki silindirden oluşan ve içerisinde su bulunan bir gazometreye girmekte ve iç silindirde gazın birikmesi sonucu oluşan basınç nedeniyle iç silindir yukarıya doğru hareket etmektedir. Kullanılan dış silindir çapı 12 cm, iç silindir çapı ise 10 cm'dir. Yükselen silindirin hareketini kolaylaştırmak için silindir ağırlığına eşdeğer bir karşı ağırlık makara yardımıyla sisteme ilave edilmiştir. Böylece silindirde meydana

gelen yükselme miktarından oluşan gaz hacminin ölçülebilmesi mümkündür. Ayrıca biyogaz reaktöründeki karışım içerisine daldırılmış bir hortum ve bir sirkülasyon pompası vasıtasıyla reaksiyon karışımından örnek alınabilmesi de sağlanmıştır. Reaktör sıcaklığının istenen seviyede tutulabilmesi için, reaktörün dış yüzeyi 90 W gücünde 10 m uzunluğunda ısıtıcı silikon bant ile sarıldıktan sonra izolasyon malzemesi olarak cam yünü ile kaplanmıştır. Reaktör, sıcaklığın bir termocift ile ölçülmesi ve istenilen sıcaklığının altına düşüldüğünde enerji beslemesi yapan bir termostatik sıcaklık kontrolörü ile istenilen sıcaklık değerlerinde tutulabilmektedir. Oluşturulan sistemin şematik izahı Şekil 1’de görülmektedir.



Şekil 1. Oluşturulan biyogaz üretimi deney düzeneğinin şematik gösterimi

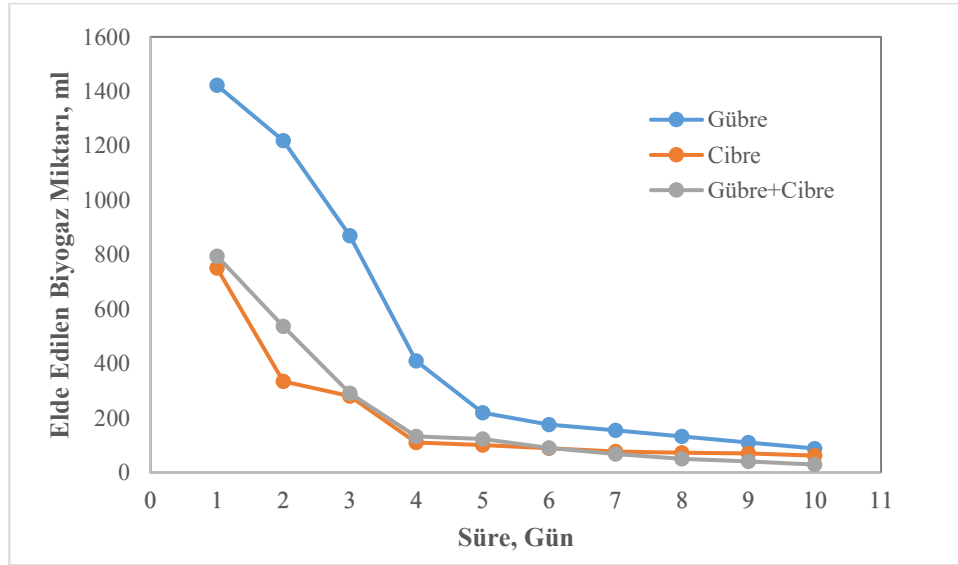
2.2 Biyogaz Üretimi

Çalışmada biyogaz üretimin incelenmesi amacıyla temin edilen sığır gübresi, üzüm cibresi ve gübre-cibre karışımı için Şekil 1’de açıklaması yapılan birbirine eşdeğer üç sistem hazırlandı. Hazırlanan sistemlerden birincisinde sadece sığır gübresi, ikincisinde sadece üzüm cibresi ve sonuncusunda ise sığır gübresi-üzüm cibresi karışımı substrat (biyokütle) kaynağı olarak kullanıldı. Tüm biyoreaktörlerde biyokütle kuru madde ağırlık oranı yaklaşık %2 olmak üzere reaksiyon karışımları hazırlandı. Bunun için birinci biyoreaktöre 1500 g sığır gübresi (%1,8 kuru madde), ikinci biyoreaktöre 1500 g üzüm cibresi (%2,7 kuru madde) ve üçüncü biyoreaktöre ise 750

g sığır gübresi ve 750 g üzüm cibresi (%2,2 kuru madde) konuldu. Daha sonra her bir biyoreaktöre toplam 10 kg'lık yaklaşık %2 kuru maddeye tekabül eden biyokütle oranına sahip olacak şekilde musluk suyu ilave edilerek biyogaz üretim ortamları hazırlandı. Biyoreaktörlere aşı olarak herhangi bir mikroorganizma ilavesi yapılmadı. Oluşturulan üretim ortamları homojen hale getirilmek amacıyla iyice karıştırıldı. Elde edilen karışımlar biyoreaktörün içine konularak, karıştırıcı motorları taşıyan kapakları gaz sızıntısı olmayacak şekilde sıkıca kapatıldı. Bu işlemi takiben gazometrenin bağlantıları yapılarak sistem aktive edildi. Biyoreaktörün ısıtıcı ceketin sıcaklığı 37°C olarak ayarlandı. Karıştırıcı motora monte edilmiş zamanlayıcı, 30 dakikalık karıştırma süresinin sonunda 15 dakika karıştırma işleminin durması şeklinde programlandı. Böylece motorların sürekli çalışması sonucu aşırı ısınarak yanmalarının önüne geçilmiş oldu. Biyoreaktörler hazır hale getirildikten sonra, günlük olarak gazometrelerde biriken biyogaz miktarları, silindirlerde meydana gelen yükselme miktarının ölçülerek, gazla dolu silindir hacminin hesaplanmasıyla belirlendi. Silindirde biriken gazdan örnek alınarak hazırlanan hemple aparatları yardımıyla CO₂ içeriği belirlendi. Biyogazın geri kalan kısmının büyük ölçüde metandan oluştuğu kabulüyle, yaklaşık olarak metan içeriği de belirlenmiş oldu.

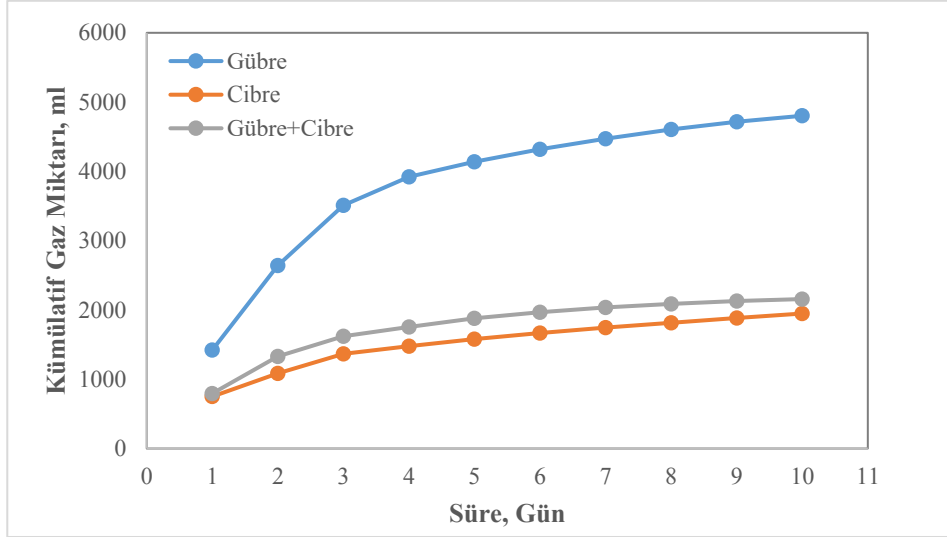
3. Bulgular ve Tartışma

Üç farklı şekilde hazırlanan sistemlerde zamana bağlı olarak elde edilen biyogaz miktarları Şekil 2'de görülmektedir. Görüldüğü gibi başlangıçta yüksek miktarda biyogaz oluşumu söz konusuysen ilerleyen zamanla üretilen biyogaz miktarları azalmaktadır. Başlangıç periyodunda en fazla biyogaz üretim miktarı (1422 ml) sığır gübresinden elde edilmiştir. Gübre-cibre karışımı (795 ml) ve üzüm cibresinden (750,5 ml) elde edilen biyogaz miktarlarının ise daha az olduğu görülmüştür. İlerleyen zamanla her üç biyokütle için de birim zamanda üretilen biyogaz miktarları azalmakta olup, yaklaşık beşinci günün sonunda birbirine yakın hale gelmektedir.



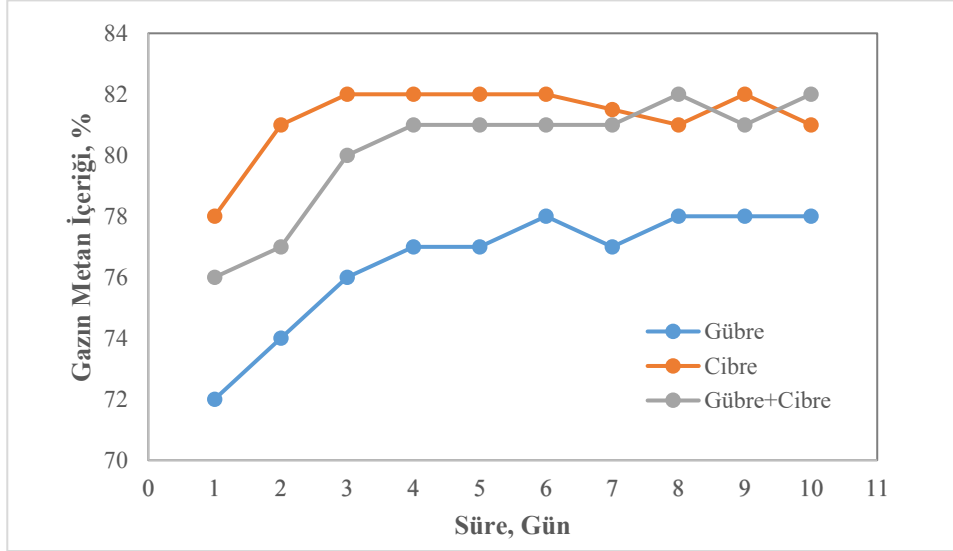
Şekil 2. Üç farklı biyokütle için zamanla elde edilen biyogaz miktarları

Üretilen toplam gaz miktarları açısından farklı biyokütlelerin karşılaştırılması için elde edilen kümülatif gaz miktarları Şekil 3'de görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, gaz üretim hızının iyice düştüğü 10 günlük bir sürenin sonunda üretilen biyogaz miktarlarının yaklaşık değerleri sığır gübresi için 4803 ml, gübre-cibre karışımı için 2157 ml ve üzüm cibresi için 1949 ml olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre biyogaz üretiminde sığır gübresinin yalnız başına kullanımın gaz miktarı açısından en doğru ve verimli yöntem olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, sadece cibrenin biyogaz üretiminde kullanılması durumunda düşük gaz verimlerinin elde edildiği, gübre ile ko-substrat olarak karışım halinde kullanılması durumunda ise cibreye göre nispeten yüksek, tek başına gübreye göre de düşük üretim miktarları elde edildiği görülmektedir.



Şekil 3. Farklı biyokütleler için kümülatif gaz miktarlarının zamanla değişimi

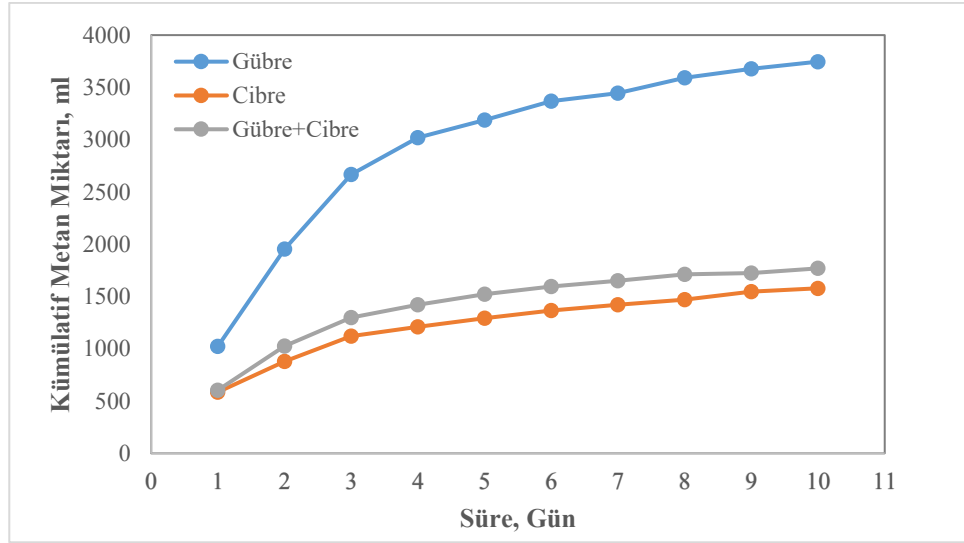
Üç farklı sistemde elde edilen biyogaz örneklerinin yapılan analizleri sonucu belirlenen metan içerikleri ve kümülatif metan miktarlarının zamanla değişimi sırasıyla Şekil 4 ve 5'de görülmektedir. Şekil 4'te görüldüğü gibi her üç biyokütle kaynağından üretilen biyogaz örneklerindeki metan gazı içeriklerinin başlangıçta nispeten düşük, ilerleyen fermantasyon süresiyle birlikte ise arttığı belirlenmiştir. Bu artışın sığır gübresi için %72'den %78'lere, gübre-cibre karışımı için %76'dan %82'lere ve üzüm cibresi için ise %78'den %81'e kadar olduğu hesaplanmıştır. Bu durumun doğrudan biyokütlelerin farklı bileşiminden ve farklı türlerde mikroorganizma içeriğine sahip olmalarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Sonuç olarak gübre için daha fazla gaz üretimi söz konusu olmakla birlikte, gübre ile birlikte cibrenin kullanılmasıyla metan içeriğinde kayda değer bir artışın gözlemlendiği söylenebilir.



Şekil 4. Üç farklı sistemden elde edilen biyogazın metan içeriğinin zamanla değişimi

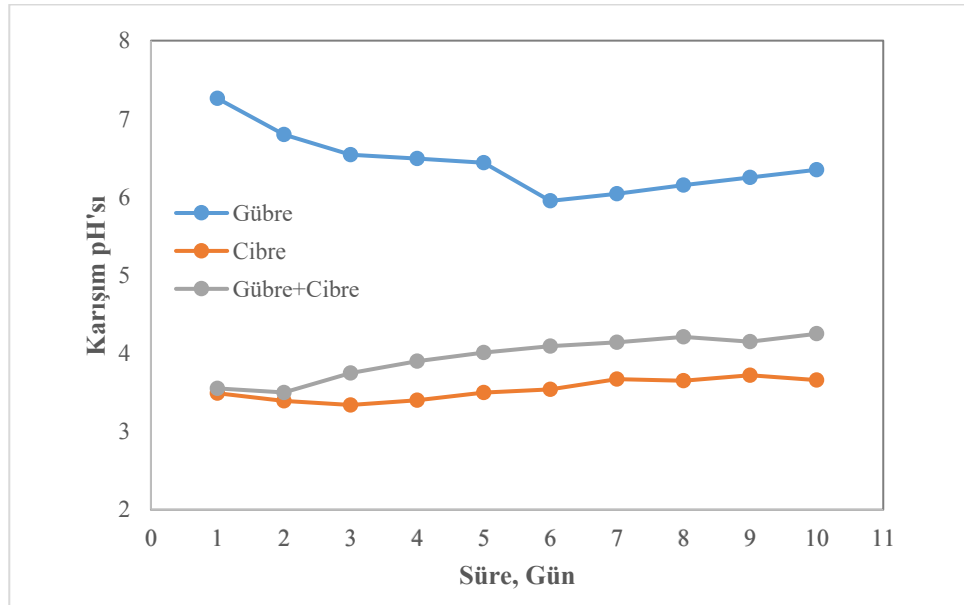
Deneyler sırasında elde edilen biyogaz örneklerinin metan içeriklerinden hareketle, hesaplanan kümülatif metan miktarlarına bakıldığında (Şekil 5), 10 günlük fermantasyon süresi sonunda elde edilen toplam metan miktarı gübre için 3746 ml, cibre için 1578 ml ve gübre-cibre karışımı için ise 1769 ml olarak gerçekleşmiştir. Bu noktadan hareketle gübre-cibre karışımından beklenen ölçüde bir metan üretiminin gerçekleşmediği şeklinde bir yorum yapılabilir. Karışımın yarı yarıya gübre ve cibreden oluştuğu düşünülerek, beklenen metan üretiminin sadece bu materyalleri içeren fermantasyon ortamlarında elde edilen miktarların toplamının yarısına yakın bir değer (2600-2700 ml) olması söz konusudur. Birim biyokütle başına üretilen biyogaz ve metan miktarları

açısından literatür çalışmalarıyla kıyaslama yapmak güçtür. Zira her çalışmada kullanılan biyokütle karakteristiklerinin yanı sıra kullanılan sistemler de önemli farklılıklar göstermektedir. Bu nedenlerden ötürü kıyaslama yapmak üzere en yaygın olarak kullanılan ölçüt, birim uçucu salt katı madde başına üretilen metan hacmi ölçütüdür. Yapılan bir çalışmada 22 günlük bir fermantasyon sonunda sığır gübresi için üretim miktarının 180 ml CH₄/g salt uçucu madde olarak tespit edildiği belirtilmektedir [32]. Mevcut çalışmada ise 10 günlük bir fermantasyon sonucunda elde edilen üretim miktarının, 64,9 ml CH₄/g salt uçucu madde olduğu görülmektedir. Şekil 5’de yer alan sığır gübresi için kümülatif metan üretimi grafiğinden bir ekstrapolasyon yapıldığında 22 günlük bir süre sonunda toplam üretimin 110 ml CH₄/g salt uçucu madde civarında olacağı hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçların büyük ölçüde literatürle uyum içerisinde olduğu ve aradaki farkların biyokütle karakteristikleri, kullanılan inceleme sistemi ve biyokütlenin antibiyotik içermesi gibi durumlardan kaynaklanabileceği düşünülmektedir.



Şekil 5. Üç farklı sistemden elde edilen kümülatif metan miktarları

Çalışmalar sırasında üç farklı sistemden alınan örnekler için yapılan pH ölçümlerinin sonuçları Şekil 6’da görülmektedir. Ölçülen pH değerlerine bakıldığında sığır gübresi için ilerleyen zamanla pH’nın kayda değer oran-



Şekil 6. Fermantasyon süresince üç farklı sistem için ölçülen pH değerleri

da düştüğü, ancak altıncı günden sonra tekrar yükseldiği görülmektedir. Bu durumun anaerobik fermantasyonun dört önemli adımından biri olan asetogenez aşamasıyla ilişkili olduğu ve meydana gelen başta asetik asit gibi ürünlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Öte yandan cibre ve gübre-cibre karışımı için başlangıç pH'larının 3,5 civarında olduğu ve artan süreyle pH'larda önemsiz bir yükselmenin meydana geldiği gözlenmektedir. Bu durumun da cibrenin yapısında bulunan ve bakteriyolojik faaliyetlerle oluşmuş olan organik asitlerden kaynaklanan bir durum olduğu düşünülmektedir. Bu asidik bileşenlerin anaerobik fermantasyon sırasında inhibe edici bir etkisinin olabileceği ve bu nedenle cibrenin bulunduğu ortamlarda oluşan metan miktarlarının sınırlı seviyelerde olduğu fikrini doğrular mahiyettedir. Bu sonuçlar cibre ile birlikte sığır gübresinin kullanılmasıyla, oluşması beklenen tamponlama etkisinin oldukça zayıf olarak gerçekleştiğini göstermektedir.

4. Sonuçlar

Günümüzde ve gelecekte toplumların karşı karşıya olduğu en büyük zorluklardan biri sera gazı emisyonlarının azaltılması ve böylece iklim değişikliğinin önlenmesidir. Bu nedenle fosil yakıtları biyogaz gibi yenilenebilir kaynaklarla değiştirmek önemlidir. Biyogaz, çeşitli organik atıkların kullanılmasından veya endüstriyel proseslerin bir yan ürünü olarak üretilebilir. Anaerobik çürütme yoluyla, elde edilen atık tarımsal gıda biyokütlelerinden biyogaz üretimi, yenilenebilir kaynaklardan alternatif enerji üretimi için umut vericidir. Bununla birlikte, biyogaz üretimi için şu anda mevcut olan organik kaynakların miktarı sınırlıdır ve bu nedenle biyogaz endüstrisinin tüm dünyada büyümesini kolaylaştırmak için yeni substratlara ve yeni etkili teknolojilere ihtiyaç duyulmaktadır. Hayvancılık gübresinin biyogaz üretiminde kullanımı, gübrenin değerlendirilmesinin yanı sıra sera gazı emisyonlarını azaltarak önemli çevresel faydalar sağlayabilir. Gübrenin anaerobik çürütmeye tabi tutulmasıyla birlikte yenilenebilir enerji üretildiğinden ve atık çürütme ürünü yüksek gübreleme özelliklerine sahip olduğundan çiftçiler için ek bir gelir kaynağı sağlayabilir. Benzer avantajlar, gerçek bir döngüsel ekonomi perspektifinde meyve suyu üretim tesisleri ve şarap işleme endüstrilerinde çıkan önemli bir atık ürün olan üzüm cibresi için de geçerlidir.

Bu çalışmada ortaya konulan sonuçlardan biri de üzüm cibresinin uçucu salt katı madde içeriği yüksek bir biyokütle olması nedeniyle, biyogaz üretimi amacıyla bir substrat olarak değerlendirilmesinin önemli oluşudur. Öte yandan, yapısındaki organik asidik bileşenler nedeniyle tek başına veya başka biyokütlelerle birlikte değerlendirilebilmesinin güç olduğu da görülmektedir. Özellikle biyogaz oluşumunda yer alan mikroorganizmalar üzerinde inhibe edici etkilere sahip olan asidik bileşenlerin uzaklaştırılması veya nötralize edici ajanların kullanılmasıyla bu problemin aşılabileceği düşünülmektedir. Zira yapılan bu çalışmada sığır gübresinin ko-substrat olarak kullanılması durumunda beklenen tamponlama etkisinin oldukça zayıf olduğu anlaşılmaktadır. Konunun önemine binaen, üzüm cibresinin biyogaz üretimi amacıyla değerlendirilmesine yönelik yapılan çalışmalarda bu durumun dikkate alınması gerektiği açıktır.

Teşekkür

Yazarlar, numune temini ve deneylerin yapılması sırasında katkı sağlayan Fırat Üniversitesi Biyomühendislik Bölümü öğrencisi Taner UVUZTEKİN'e teşekkürlerini sunarlar.

Kaynaklar

- [1] Hagos K, Zong J, Li D, Liu C, anfang Lu, X. Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives. *Renewable and sustainable energy reviews* 2017; 76, 1485-1496.
- [2] Chynoweth DP, Owens JM, and Legrand R. Renewable methane from anaerobic digestion of biomass. *Renewable energy* 2001; 22(1-3), 1-8.
- [3] Gurung A, Van Ginkel SW, Kang WC, Qambrani NA, and Oh SE. Evaluation of marine biomass as a source of methane in batch tests: a lab-scale study. *Energy* 2012; 43(1), 396-401.
- [4] Barrera EL, Spanjers H, Dewulf J, Romero O, and Rosa, E. The sulfur chain in biogas production from sulfate-rich liquid substrates: a review on dynamic modeling with vinasse as model substrate. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 2013; 88(8), 1405-1420.
- [5] Naycharan M. The production of biofuels biogas, *Promot. Renew. New Energies* 2015; 2, 40.
- [6] Khanal SK, Lü F, Wong JW, Wu D, and Oechsner H. Anaerobic digestion beyond biogas. *Bioresource Technology* 2021; 337, 125378.
- [7] Meyer-Aurich A, Schattauer A, Hellebrand HJ, Klauss H, Plöchl M, and Berg W. Impact of uncertainties on greenhouse gas mitigation potential of biogas production from agricultural resources. *Renewable Energy* 2012; 37(1), 277-284.

- [8] Scarlat N, Dallemand JF, Fahl F. Biogas: developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy* 2018; 129:457–72.
- [9] Rao PV, Baral SS, Dey R, and Mutnuri S. Biogas generation potential by anaerobic digestion for sustainable energy development in India. *Renewable and sustainable energy reviews* 2010; 14(7), 2086-2094.
- [10] Nguyen LN, Kumar J, Vu MT, Mohammed JA, Pathak N, Commault AS, ... and Nghiem LD. Biomethane production from anaerobic co-digestion at wastewater treatment plants: A critical review on development and innovations in biogas upgrading techniques. *Science of the Total Environment* 2021; 765, 142753.
- [11] Deepanraj B, Sivasubramanian V, and Jayaraj S. Biogas generation through anaerobic digestion process-an overview. *Research Journal of Chemistry and Environment* 2014; 18, 5.
- [12] Georgiadis AG, Charisiou ND, Gaber S, Polychronopoulou K, Yentekakis IV, and Goula MA. Adsorption of hydrogen sulfide at low temperatures using an industrial molecular sieve: an experimental and theoretical study. *Acs Omega* 2021; 6(23), 14774-14787.
- [13] Georgiadis AG, Charisiou N, Yentekakis IV, and Goula MA. Hydrogen sulfide (H₂S) removal via MOFs. *Materials* 2020; 13(16), 3640.
- [14] Georgiadis AG, Charisiou ND, and Goula MA. Removal of hydrogen sulfide from various industrial gases: A review of the most promising adsorbing materials. *Catalysts* 2020; 10(5), 521.
- [15] Neshat SA, Mohammadi M, Najafpour GD, and Lahijani P. Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2017; 79, 308-322.
- [16] Ward AJ, Hobbs PJ, Holliman PJ, and Jones DL. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource technology* 2008; 99(17), 7928-7940.
- [17] Batstone D, Keller J, Angelidaki I, Kalyuzhnyi SV, Pavlostathis SG, Rozzi A, ... and Vavilin VA. The IWA anaerobic digestion model no 1 (ADM1). *Water Science and technology* 2002; 45(10), 65-73.
- [18] Kell, CJK. Anaerobic co-digestion of fruit juice industry wastes with lignocellulosic biomass. Doctoral dissertation, Stellenbosch University, Stellenbosch, 2019.
- [19] Braun R, and Wellinger A. Potential of Co-digestion IEA Bioenergy 2002.
- [20] Holm-Nielsen JB, Al Seadi T, and Oleskowicz-Popiel P. The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource technology* 2009; 100(22), 5478-5484.
- [21] Li X, Li L, Zheng M, Fu G, and Lar JS. Anaerobic co-digestion of cattle manure with corn stover pretreated by sodium hydroxide for efficient biogas production. *Energy and Fuels* 2009; 23(9), 4635-4639.
- [22] Kell CJK. Anaerobic co-digestion of fruit juice industry wastes with lignocellulosic biomass. Doctoral dissertation, Stellenbosch: Stellenbosch University, 2019.
- [23] Mshandete A, Kivaisi A, Rubindamayugi M, and Mattiasson BO. Anaerobic batch co-digestion of sisal pulp and fish wastes. *Bioresource technology* 2004; 95(1), 19-24.
- [24] Parawira W, Murto M, Zvauya R, and Mattiasson B. Anaerobic batch digestion of solid potato waste alone and in combination with sugar beet leaves. *Renewable Energy* 2004; 29(11), 1811-1823.
- [25] Angelidaki I, Chen X, Cui J, Kaparaju P, and Ellegaard L. Thermophilic anaerobic digestion of source-sorted organic fraction of household municipal solid waste: start-up procedure for continuously stirred tank reactor. *Water research* 2006; 40(14), 2621-2628.
- [26] Braun R, Brachtl E, and Grasmug M. Codigestion of proteinaceous industrial waste. *Applied biochemistry and biotechnology* 2003; 109(1), 139-153.
- [27] Weiland P. Anaerobic waste digestion in Germany—Status and recent developments. *Biodegradation* 2000; 11(6), 415-421.
- [28] Creamer KS, Chen, Y, Williams CM, and Cheng JJ. Stable thermophilic anaerobic digestion of dissolved air flotation (DAF) sludge by co-digestion with swine manure. *Bioresource Technology* 2010; 101(9), 3020-3024.
- [29] Zhang L, Lee, YW, and Jahng D. Anaerobic co-digestion of food waste and piggery wastewater: focusing on the role of trace elements. *Bioresource technology* 2011; 102(8), 5048-5059.
- [30] Bunea CI, Pop N, Babeş AC, Matea C, Dulf FV, and Bunea A. Carotenoids, total polyphenols and antioxidant activity of grapes (*Vitis vinifera*) cultivated in organic and conventional systems. *Chemistry Central Journal* 2012; 6(1), 1-9.
- [31] Walzem RL. Wine and health: state of proofs and research needs. *Inflammopharmacology* 2008; 16(6), 265-271.
- [32] Jabłoński SJ, Biernacki P, Steinigeweg S, and Łukaszewicz M. Continuous mesophilic anaerobic digestion of manure and rape oilcake—Experimental and modelling study. *Waste Management* 2015; 35, 105-110.

Parçacık Sürüsü Optimizasyon Algoritması ile Optimize Edilmiş Evrimsel Sinir Ağı Kullanılarak Dermoskopik Görüntülerden Cilt Kanserinin Sınıflandırılması

Erdal ÖZBAY^{1*}, Feyza ALTUNBEY ÖZBAY²

¹ Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

² Yazılım Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

*¹erdalozbay@firat.edu.tr, ²faltunbey@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 10/11/2022;

Kabul/Accepted: 30/11/2022)

Öz: Dermoskopik görüntülerden cilt lezyonlarını sınıflandırmak için güçlü bir tıbbi karar destek sistemi oluşturmak cilt kanserinin teşhisi için önemli bir adımdır. Laboratuvarlarda cilt kanseri teşhisi için gerçekleştirilen manuel araştırma, insan yorgunluğu, birlikte çalışabilirlik hataları vb. gibi belirli faktörler nedeniyle hatalara açıktır. Bununla birlikte, cilt lezyonlarının karmaşık morfolojik yapısından dolayı eğitilmiş verilerin kullanılmasında ciddi sorunlar yaşanmaktadır. Son yıllarda, Evrimsel Sinir Ağı (CNN) kullanılarak dermoskopik görüntülerden cilt kanseri türlerini tespit etmede önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu çalışmanın temel amacı, farklı sınıf sayılarına sahip cilt kanseri türlerini içeren dermoskopik görüntüleri yüksek doğrulukla otomatik olarak sınıflandırmak için CNN tabanlı bir model geliştirmektir. Çalışmada, evrimsel bir algoritmanın yanlış sınıflandırma oranını azaltmak üzere bir derin öğrenme modeline entegre edildiği bir metodoloji önerilmiştir. CNN hiper-parametreleri, cilt lezyonlarını dört farklı türde sınıflandırmada ağ performansını iyileştirmek için Parçacık Sürüsü Optimizasyon (PSO) algoritması kullanılarak optimize edilmiştir. Önerilen yöntem ile %99,33 doğruluk, %94,65 duyarlılık, %98,87 özgüllük ve 0,983 AUC sonuçlarına ulaşılarak birleştirilmiş ISIC-2019 ve Asian-dermoscopy veri kümeleri üzerinde test edilmiştir. Sonuçlar, Genetik Algoritmalar (GA), Diferansiyel Evrim (DE) ve Gri Kurt Optimizasyonu (GWO) algoritmaları gibi benzer kanıtlanmış algoritmalarla karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, cilt kanseri sınıflandırması için CNN hiper-parametrelerini optimize etmede PSO'nun verimliliğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Cilt kanseri, CNN, Dermoskopik görüntü, Sınıflandırma, PSO.

Classification of Skin Cancer from Dermoscopic Images using Convolutional Neural Network Optimized with Particle Swarm Optimization Algorithm

Abstract: Creating a powerful medical decision support system to classify skin lesions from dermoscopic images is an important step for the diagnosis of skin cancer. Manual research for skin cancer diagnosis in laboratories, human fatigue, interoperability errors, etc. It is prone to errors due to certain factors such as However, there are serious problems in using educated data due to the complex morphological structure of skin lesions. In recent years, significant advances have been made in detecting types of skin cancer from dermoscopic images using the Convolutional Neural Network (CNN). The main aim of this study is to develop a CNN-based model to automatically classify dermoscopic images containing skin cancer types with different class numbers with high accuracy. In the study, a methodology is proposed in which an evolutionary algorithm is integrated into a deep learning model to reduce the misclassification rate. CNN hyper-parameters were optimized using the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm to improve network performance in classifying skin lesions into four different types. The proposed method was tested on the combined ISIC-2019 and Asian-dermoscopy datasets, achieving 99.33% accuracy, 94.65% sensitivity, 98.87% specificity, and 0.983 AUC results. The results are compared with similar proven algorithms such as Genetic Algorithms (GA), Differential Evolution (DE), and Gray Wolf Optimization (GWO) algorithms. Experimental results demonstrated the efficiency of PSO in optimizing CNN hyper-parameters for skin cancer classification.

Key words: Skin cancer, CNN, Dermoscopic image, Classification, PSO.

1. Giriş

İnsan vücudundaki en büyük organ olan deri, tüm vücudu kaplar ve patojenlerin istilasını ve su kaybını önlemede önemli bir engeldir. Deri hastalıkları dünyada en sık görülen insan hastalıklarından biridir [1]. Birçok cilt hastalığı insanlarda çeşitli rahatsızlıklara neden olabilmekte ve yaşam kalitesini olumsuz etkileyebilmektedir, bunun yanında malign melanom gibi bazı hastalıklar insan yaşamını tehdit edici bile olabilmektedir. Dermoskopi, cilt hastalıklarını teşhis etmek için mikroskopik görüntü analiz tekniklerini kullanan invaziv olmayan ve invivo bir incelemedir [2]. Deri yüzeyini onlarca kez büyütürken dermatologların canlı bir deri yüzeyinin altındaki

* Sorumlu yazar: erdalozbay@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-9004-4802, ² 0000-0003-0629-6888

mikroskobik yapıyı ve pigmentleri gözlemlemesine olanak tanımaktadır [3]. Doktorların teşhisine dayanan bir yöntem subjektiftir ve o sırada bir dermatoloğun görsel değerlendirmesi ve tanısal deneyiminden kolayca etkilenmektedir, bu nedenle bildirilen duyarlılık ve özgüllük çalışmalar arasında önemli ölçüde farklılık gösterebilmektedir [4].

İnsanlarda en tehlikeli ve yaygın kanser türlerinden bir tanesi cilt kanseridir. Cilt kanseri, genel olarak melanom ve melanom olmayan şeklinde sınıflandırılabilir gibi melanom dışı, bazal hücreli karsinom ve skuamöz hücreli karsinomu olarak ta sınıflandırılabilir. Malign melanom, cilt kanserinin en ölümcül formlarından biri olarak kabul edilmekte ve dünya genelindeki vaka sayıları katlanarak artmaktadır. Diğer tüm kanser türlerinde olduğu gibi cilt kanserinin ölüm oranını azaltmak için de erken teşhis çok önemlidir, çünkü kanser erken bir aşamada tespit edildiğinde ve tedavi edildiğinde yüksek bir iyileşme oranı sağlamaktadır. Cilt kanseri tanısı klinisyenler tarafından zaman alıcı, hataya açık ve daha öznel olan görsel bir muayene ile taranmaktadır. Dermoskopi, lekelerin netliğini artırmak için cilt lezyonlarının aydınlatılmış ve büyütülmüş görüntülerini yakalayabilen, cildin yüzey yansımalarını ortadan kaldıran invaziv olmayan bir görüntüleme tekniğidir. Bununla birlikte, dermatolog tarafından dermoskopik görüntülerden melanom tespiti, rutin klinik ortamlarında %80'den daha az doğruluk oranı ile elde edilmiştir [5]. Cilt kanseri tespitinin etkinliğini ve verimliliğini artırmak için, karar verme sürecini geliştirmek amacıyla klinisyenlere yardımcı olacak bir otomatik teşhis sistemi mutlak gereklidir. Otomatik tanılama araçları geliştirmek ve farklı kategorideki cilt kanserlerini sınıflandırmak için geleneksel Makine Öğrenmesi (ML) algoritmaları kullanılmaktadır. Ancak, ML algoritmaları el yapımı özellikler gerektirdiğinden ve ayrıca dermoskopik görüntülerin yüksek sınıf içi ve sınıflar arası varyasyonları düşük olduğundan, yüksek tanı performansı elde etmek çok zordur [6]. Cilt kanseri hastalıklarının her türlü erken teşhisi ve tedavisi için yansız teşhis çok önemlidir. Son yıllarda birçok araştırmacı, tahmin doğruluğunda önemli bir gelişme sağladığı için Evrişimli Sinir Ağı (CNN) tabanlı yöntemlere odaklanmaktadır [7, 8]. Birçok araştırmacı, otomatik özellik mühendisliği ve kendi kendine öğrenme yetenekleri nedeniyle Derin Öğrenme (DL) tabanlı yöntemler kullanarak cilt kanseri sınıflandırmasına odaklanmaktadır. Derin sinir ağları ile CNN'yi daha geniş, daha derin ve artan çözünürlük ile genişletme pahasına yüksek performans elde edilebilmektedir, bu da mimarinin eğitim ve test için yüksek hesaplama gücü ile sonuçlanan ek parametrelere sahip olmasına neden olmaktadır [9].

Son yıllarda CNN içeren DL yöntemleri cilt kanseri sınıflandırmasında kullanılmaktadır. Son çalışmalar, CNN'lerin konuşlandırılmasının, ML yöntemlerinde el yapımı özellik çıkarmanın dezavantajını önleyerek özellikleri otomatik olarak çıkaran sınıflandırma doğruluk oranını arttırdığını göstermiştir [10]. CNN modellerinde örnekleri eğitmek ve test etmek için çok sayıda veri seti kullanılabilir. DL yöntemleri, daha iyi parametre eğitimi ile umut verici sonuçlar vermiş olsa da, bu yöntemler, görüntü kalitesi ve ölçekte çeşitli veri kümelerinde farklı performanslar ortaya koymuştur [11]. DL, çeşitli mimarilere ve hiper-parametrelere izin vermektedir ancak bu tür optimal özelliklerin belirlenmesi zorlu ve kritik bir görevdir [12]. Bu nedenle, bu çalışmada, evrişimsel bir algoritma ile entegre edilmiş CNN'yi içeren bir derin öğrenme metodolojisi önerilmektedir. CNN hiper-parametreleri, cilt kanser türlerini dört kategoride sınıflandırmada ağın performansını iyileştirmek için PSO algoritmasını kullanarak optimize edilmiştir. Bu, optimum hiper-parametreler için manuel arama işlemleri ortadan kaldırılmıştır.

Bu çalışmamızın temel katkıları şöyle özetlenebilir:

- Uçtan uca eğitilebilir bir CNN ile cilt kanserinin otomatik olarak dört kategoride sınıflandırılması; melanoma (MEL), melanocytic nevus (MN), basal cell carcinoma (BCC), benign keratosis (BK).
- CNN hiper-parametreleri, optimum özellikler için manuel arama yerine PSO kullanılarak optimize edilmiştir.
- Duyarlılık oranı artırılarak Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) sürecindeki yanlış pozitifler azaltılmaktadır.
- Önerilen yöntem ile sınıflandırma doğruluğunda önemli düzeyde iyileştirme sağlanmıştır.

Makalenin geri kalanı şöyle özetlenebilir; ikinci bölümde mevcut ilgili çalışmalar ana hatlarıyla incelenmiştir, üçüncü bölümde çalışma için kullanılan veri kümeleriyle birlikte önerilen metodoloji detaylandırılmaktadır, deneysel sonuçlar ve tartışma dördüncü bölümde ele alınmaktadır ve bölüm 5'te sonuçların özetlenmesiyle çalışma sonlandırılmaktadır.

2. İlgili Çalışmalar

Son yıllarda ML algoritmalarının genişletilmesi, araştırmacıların tıbbi görüntü analizi alanında birçok uygulama geliştirmesine imkân sağlamıştır. Moldovanu vd., giriş görüntülerine eşik yöntemini uygulayarak

bölgelere ayırmış ve bir dizi Gabor özneteliğini çıkararak çok seviyeli bir sinir ağı ile eğitmiştir [13]. Bir başka çalışmada, Destek Vektör Makinesi (SVM) modeli kullanılarak melanom cilt kanseri tespiti için bir çerçeve önerilmiş ve dermoskopik görüntülerden elde edilen optimize edilmiş HOG özneteliklerinin yardımıyla eğitilmiştir [14]. Monisha vd., iyi huylu lezyonları melanomdan ayırmak için kullanılan görüntülerin ABCD kuralı olarak bilinen asimetri, sınır, renk ve çap özellikleri yardımıyla dermoskopik skor hesaplamasını gerçekleştirmiştir [15].

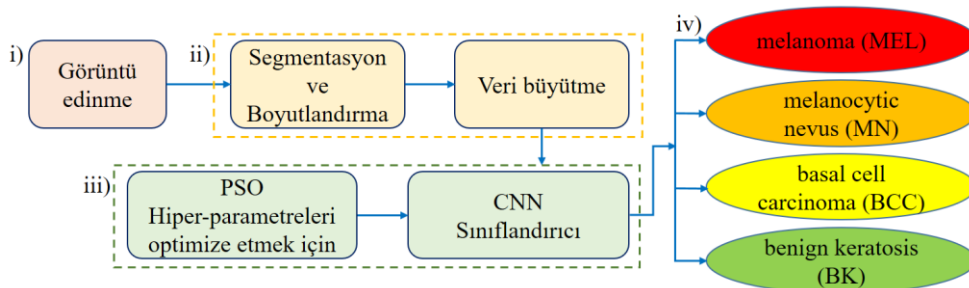
Bir diğer çalışmada, SVM sınıflandırıcısında kullanılmak üzere global öznetelikler ve yerel desenler modeli eğitmek için birleştirilmiştir [16]. Renk ve lezyon şekli gibi global özellikler geleneksel görüntü işleme teknikleri vasıtasıyla çıkarılırken, yerel desenler Derin Sinir Ağı (DNN) kullanılarak çıkarılmıştır. Moura vd., ABCD kuralı ve çeşitli ön-eğitilmiş CNN ile gelen özellikleri birleştiren bir hibrit tanımlayıcı kullanarak modelin eğitildiği çok katmanlı algılayıcıyı kullanan bir ikili cilt sınıflandırma yöntemi önermişlerdir [17]. Başka bir çalışmada DenseNet201 kullanılarak öznetelikler çıkarıldıktan ve yineleme kontrollü Newton-Raphson (ICNR) yöntemiyle ayırt edici öznetelikler seçildikten sonra, çok katmanlı ileri beslemeli sinir ağı kullanılarak cilt kanseri lokalizasyonu ve tanınması için bir yöntem önerilmiştir [18]. Bir diğer çalışmada, ABCD kuralıyla edinilen el yapımı öznetelikler ile birlikte transfer öğrenmeden derin öğrenmeyle edinilen öznetelikler birleştirilmiştir, böylece karşılıklı bilgi metriğini kullanan bir öznetelik birleştirme yaklaşımı önerilmiştir [10].

Naeem vd., CNN kullanarak melanom teşhisi için derin bir öğrenme tekniği önermiştir. Benzerlikler ve farklılıklar temelinde yaşanan zorlukların sistematik bir incelemesini sağlamışlardır [19]. Çok boyutlu, çok ölçekli, çok çözünürlüklü ve düşük kontrastlı görüntülerin eğitilmesiyle ilgili sorunlarla ilgilenilen bir çalışmada DCNN kullanılarak uçtan uca ve piksel bazında bir öğrenme önerilmiştir [20]. Bir diğer çalışma U-net mimarisinde yerel ikili evrişimi kullanarak cilt lezyonlarının teşhisi problemini ele almıştır [21]. Burada ilişkili bölge tabanlı bir CNN tekniğini kullanan ve ResNet152 mimarisi kullanılarak ikili sınıflandırma yapılan iki aşamalı bir bölütleme yöntemi önerilmiştir. Bir başka çalışmada AlexNet ile desteklenen bir transfer öğrenme tekniğini kullanan ön-eğitilmiş bir model sunulmuştur [22]. Bir çalışmada InceptionV3, Xception, NASNetLarge, InceptionV2, ve ResNet101 derin öğrenme modellerinin en iyi hiper-parametre kurulumuna sahip eğitimi, ImageNet'in önceden eğitilmiş farklı modelleri arasından daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur [23]. Lee vd., değiştirilmiş U-Net ile segmentasyon için piksel bazında öznetelikleri öğrenen ve DenseNet kodlayıcıdan çıkarılan öznetelikler kullanılarak sınıflandırılan bir boru hattı önermiştir [24]. Harangi, sınıflandırma doğruluğunu geliştirmek için CNN'lerin ağırlıklı çıktısına dayalı mimarileri birleştiren bir metodoloji önermiştir [9]. Mahbod vd., eğitilmiş SVM sınıflandırma çıktısını, SVM'yi önceden eğitilmiş çeşitli CNN'lerden alınan derin özelliklerle eğittikten sonra birleştirilmesini önermişlerdir [25].

Genel olarak, herhangi bir DL modelinin doğruluğu, deneme yanılma yöntemleriyle manuel olarak yapılan hiper-parametre ayarına doğrudan bağlıdır. Bu nedenle, herhangi bir modelin yüksek doğruluk elde etmesi için uygun parametrelerin belirlenmesi çok önemlidir. Bu nedenle bu çalışmada, Tan ve Le tarafından EfficientNet modeliyle birlikte tanımlanan bileşik ölçekleme yöntemiyle elde edilen hiper-parametrelere dayalı modellerde otomatik ince ayar yöntemini cilt lezyonlarının teşhisi için önermekteyiz [26].

3. Materyal ve Yöntem

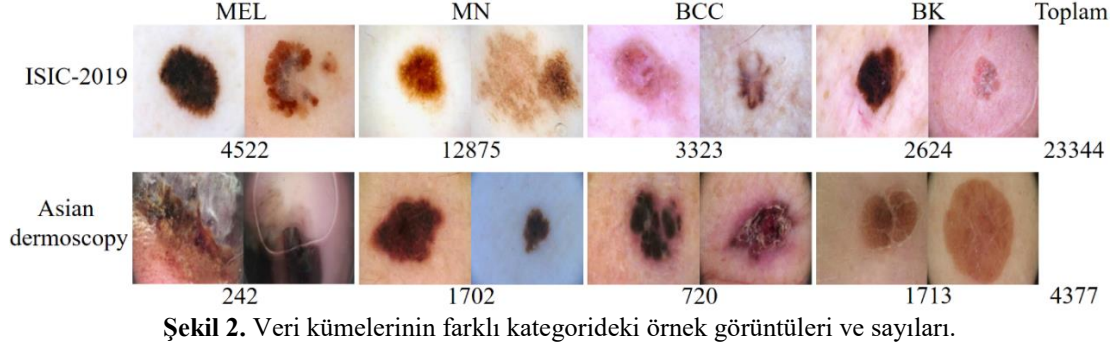
Cilt lezyonlarının sınıflandırması için Şekil 1'de gösterildiği gibi önerilen metodoloji şu adımlara sınıflandırılmaktadır; (i) kullanılan veri setlerini veri toplama ile detaylandırma, (ii) segmentasyon, yeniden boyutlandırma ve girdi görüntülerinin büyütme ön-işlemi, (iii) PSO tarafından optimize edilmiş CNN kullanılarak dört kategoride cilt lezyonlarına göre sınıflandırma ve (iv) sonuçların değerlendirilmesi.



Şekil 1. Önerilen yöntemin akış diyagramı.

3.1. Veri Kümeleri

Bu çalışmada kullanılan dermoskopik görüntü veri kümelerinden ilki, Tschandl vd., Codella vd., ve Combalia vd., tarafından sağlanan International Skin Imaging Colaboration (ISIC-2019) sınıflandırma veri kümesidir [27-29]. İkincisi ise Pekin Birliği Tıp Koleji Hastanesi Dermatoloji Departmanı tarafından sağlanan Asian-dermoscopy veri kümesidir.



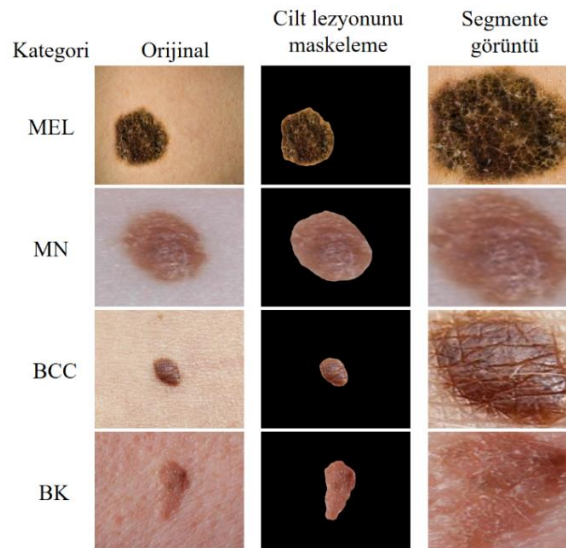
3.1.1. ISIC-2019 Veri Kümesi

ISIC-2019 veri seti, 8 farklı kategoride toplamda 25331 görüntü içermektedir. Deneysel sonuçların sağlıklı yürütülmesi için gerekli veri kümesinin oluşturulmasında 8 kategorideki örnek görüntü sayısı eşit olmayan bir şekilde dağıldığından örnek sayısı 1000 adetten fazla olan 4 kategori; melanoma (MEL), melanocytic nevus (MN), basal cell carcinoma (BCC), benign keratosis (BK) olacak şekilde seçilmiştir. Böylelikle toplamda 23344 adet cilt lezyonu görüntüsü bu veri kümesinden kullanılmak üzere tercih edilmiştir. Çalışmada kullanılan bu veri setine ait temel bilgilere Şekil 2’de yer verilmiştir.

3.1.2. Asian-dermoscopy Veri Kümesi

Asian-dermoscopy veri seti, 8 farklı kategoride toplamda 7974 görüntü içermektedir. Deneysel sonuçların sağlıklı yürütülmesi için ISIC-2019 veri kümesinde seçilen 4 kategoriye ait görüntüler kullanılmıştır. Böylelikle melanoma (MEL), melanocytic nevus (MN), basal cell carcinoma (BCC), benign keratosis (BK) olmak üzere toplamda 4377 adet cilt lezyonu görüntüsü bu veri kümesinden kullanılmak üzere tercih edilmiştir. Çalışmada kullanılan bu veri setine ait temel bilgilere Şekil 2’de yer verilmiştir.

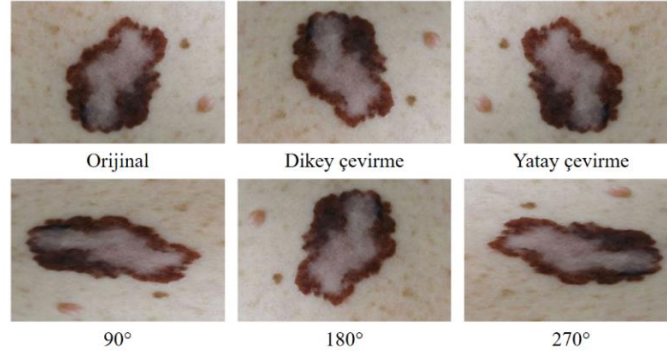
3.2. Segmentasyon ve Boyutlandırma



Şekil 3. Veri kümelerinin farklı kategorideki görüntü örnekleriyle segmentasyon sonuçları.

Veri kümelerinden elde edilen cilt lezyon görüntüleri gereksiz ve alakasız arka plan öğeleri içermektedir. Bu gereksiz içeriklere ait bilgiler sınıflandırmaya katkıda bulunmadıkları gibi geniş bir yer kapladıklarından sınıflandırma doğruluk oranında düşüşe neden olmaktadır. Bu durum, CNN'in eğitim aşamasını olumsuz yönde etkilemekte ve performansını düşürmektedir. Bu bakımdan, veri tabanına sağlanan bir maskeleyme işlemi uygulanarak cilt lezyonlarını tek başına bölümlere ayırma ihtiyacı doğmuştur. Bölünmüş lezyon görüntüleri daha sonra oluşturulan modelin sorunsuz yürütüleceği şekilde yeniden boyutlandırılmaktadır. Farklı kategorilere karşılık gelen maskelere sahip lezyon örnekleri Şekil 3'te gösterilmektedir. Bölünmüş cilt lezyon görüntüleri 28×28 piksele yeniden boyutlandırılır ve CNN'e girdi olarak verilmektedir. Görüntü yeniden boyutlandırma, sabit giriş nöronları gerektiren ağın en başında tamamen bağlı bir katman mevcut olduğundan gerçekleştirilmek zorundadır [30].

3.3. Veri Büyütme



Şekil 4. Veri kümelerinin farklı kategorideki görüntü örnekleriyle segmentasyon sonuçları.

Derin öğrenme modelleri CNN'i etkili bir şekilde eğitmek için genellikle çok büyük eğitim verilerine ihtiyaç duymaktadır. Eğitim için yetersiz verilerle, cilt lezyonlarının tespiti ve doğru bir sınıflandırma sisteminin oluşturulması imkansızdır. Genellikle, cilt lezyonlarına ait veri setlerinde çok fazla morfolojik varyasyon gözlemlenmektedir. Bu durum, önyargılı öğrenmeye neden olan veri sınıfı dengesizliği yaratmakta ve test sırasında modelin performansının düşmesine yol açmaktadır [31]. Veri kümesine ait örnek sayısının azlığı, verilerin yapay olarak artırılmasıyla veri büyütme işlemi gerçekleştirilmektedir. Ek veri örnekleri oluşturmak adına orijinal veri kümesindeki görüntülere dönüştürme teknikleri uygulanmaktadır. Orijinal veri kümesine uygulanan görüntü dönüştürme teknikleri, 0-360° (90°, 180°, 270° vb.) arasında rastgele döndürmelerle ya da istenen sayıda örnek oluşturulana kadar rastgele dikey ve yatay çevirmelerle gerçekleştirilir. Döndürülmüş veya çevrilmiş görüntüler sırasıyla 0,5 ve 1,5'e ölçeklendirilmiştir. Veri büyütme işlemi sayesinde, öğrenme için veri sayıları artırılır ve aşırı uyum sorununun önüne geçilir. Bununla birlikte alakasız özelliklerin öğrenilmesi de engellenmiş olur. Zemin gerçeği etiketli görüntüleri de benzer şekilde artırılmaktadır. Bu dönüşüm kullanılarak istenilen veri örneklerini elde etmek mümkündür. Bu dönüştürülmüş görüntüler, farklı CNN modellerini eğitmek için kullanılabilir. Çalışmada veri kümesinin artırılan görüntülerine de segmentasyon ve boyutlandırma işlemi uygulanarak CNN modelinde eğitim için hazır hale getirilir. Görüntü sınıflandırma ile ilgili çeşitli literatür çalışmaları, bu tür dönüşümlerin eğitilmiş CNN modellerinin performansını artırabileceğini göstermiştir. Rastgele büyütülmüş örnek görüntüler Şekil 4'te gösterilmektedir.

3.4. Sınıflandırma

Veri büyütme operasyonunun sonrasında, ön-ışlemden geçirilmiş ve yeniden boyutlandırılmış her bir cilt lezyon görüntüsü, cilt kanserini dört ayrı kategoride sınıflandırmak üzere ayıran bir CNN'i beslemek üzere girdi olarak verilmektedir. CNN, girdileri temsil eden kalıpların örtük özelliklerini otomatik olarak çıkarmaktadır ve çıkarılan özelliklerden kalıpları daha fazla sınıflandırmaktadır [32]. CNN normalde katlamalı katmanlara, havuzlama, aktivasyon katmanlarına ve katmanların uygulanmasına göre değişen hiper-parametrelere sahip tamamen evrişimli katmanlara sahiptir. CNN'in etkinliği, CNN'i çeşitli uygulamalar için eğitmeye bağlıdır. CNN, el yapımı özelliklerin kullanımından kaçınarak bu aşamada otomatik olarak öğrenmektedir. CNN'deki temel mantık, özellikleri çıkarmak için kullanılan ağırlık ve eğitim aşamasında hesaplanan görüntüleri sınıflandırmak için tam bağlantılı katmanı kullanmaktır [33]. Her katman için optimum hiper-parametrelerin manuel olarak belirlenmesi oldukça pahalı ve zahmetli olduğundan, CNN için optimum hiper-parametreleri elde etme görevini

kolaylaştırmak için görüntülerin sınıflandırılmasında PSO kullanılmıştır [11]. PSO, biyolojik olarak sürü popülasyonlarının davranışından ilham alan, yaygın olarak kullanılan bir evrimsel algoritmadır [34]. PSO, kısa bir hesaplama süresi içinde kaliteli çözümler üretme yeteneğine sahiptir. PSO, diğer biyo-ilhamlı algoritmalara kıyasla optimum bir çözüme yakınsamada etkili kararlılık sergilemektedir. Parçacıklar, G_{best} (başarılı parçacık) ile ilgili bilgileri kullandığından sürünün çeşitliliği de daha etkin bir şekilde korunmaktadır [35].

3.4.1. CNN ve PSO

Bu çalışmada kullanılan CNN, evrişimli katmanlarına (Conv1 ve Conv2), ReLU aktivasyonuna ve bir dropout katmanına sahip havuzlama katmanlarına (Pool1 ve Pool2) sahiptir. Tam bağlı katman (FC), giriş katmanını, ReLU aktivasyonu ve dropout katmanı ile başarılı olan gizli katmanı ve son olarak SoftMax aktivasyonuna sahip çıktı katmanını sunmak için kullanılmaktadır. Havuzlama katmanları için 2×2 çekirdek boyutu seçilmiştir. Bu çalışmada bir ön-eğitilmiş CNN mimarisi yerine yeni bir CNN modeli geliştirilmiştir. PSO'nun amacı, Conv1 ve Conv2'de kullanılan filtrelerin sayısını, gizli katman nöronlarını, havuzlama türünü, parti boyutunu, eğitilebilir filtre boyutunu ve Conv1, Conv2 ve FC'de kullanılacak dropout düzenleme olasılıklarını optimize etmektir. Parçacık koordinatları, Tablo 1'de listelendiği gibi hiper-parametrelere karşı tanımlanmıştır.

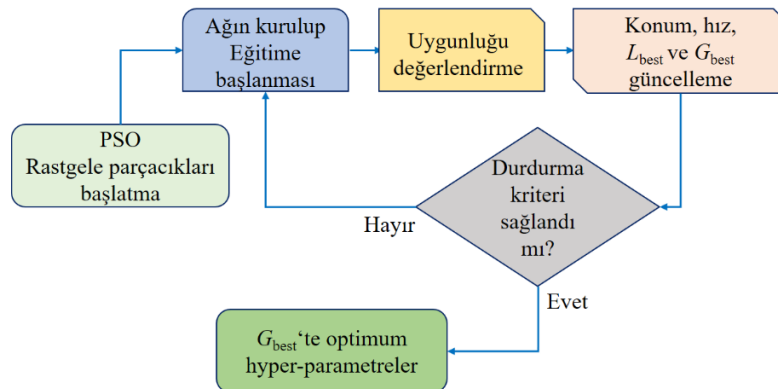
Tablo 1. Hiper-parametrelere karşılık gelen parçacıkların tanımlanması.

Parçacık	Hiper-parametre
$\times 1$	Conv1'deki filtre sayısı
$\times 2$	Conv2'deki filtre sayısı
$\times 3$	Gizli katmanın nöron sayısı
$\times 4$	Conv1 ve Conv2'de eğitilebilir filtre boyutu
$\times 5$	Pool1 ve Pool2'de havuzlama türü
$\times 6$	Eğitim parti (batch) boyutu
$\times 7$	Evrişim katmanında dropout olasılığı
$\times 8$	FC katmanında dropout olasılığı

İlk sürünün parçacıklarının rastgele başlatılması, katmanlarda daha fazla nörondan kaçınılacak şekilde aşırı uyumu önlemek için yapılmıştır. $\times 1$, $\times 2$ ve $\times 3$ 'e 4-100 arasında değerler atanmıştır. $\times 4$ 'e giriş görüntülerinin boyutuna bağlı olarak 3 veya 5 değerleri atanmıştır. Ortalama havuzlama için $\times 5$ seçilmiştir. $\times 6$, dönem başına büyük hesaplama süresini engellemek adına 10 ile 100 olarak atanmıştır. $\times 7$ ve $\times 8$, sırasıyla 0,1 ve 0,9 değerleriyle başlatılmıştır. Her parçacığın maliyet fonksiyonu Denklem 1'de verilen uygunluk fonksiyonu ile hesaplanmıştır.

$$Uygunluk\ fonksiyonu = 2 * duyarlılık + doğruluk + özgülük \quad (1)$$

Her parçacığın konum ve hıza göre güncellenmesi, arama uzayındaki her yinelemede L_{best} (lokal-en iyi) ve G_{best} (global-en iyi) temelinde gerçekleşmektedir. Durdurma koşulu, gerekli sayıda yinelemenin elde edilmesinden sonra gerçekleştirilir. Sonlandırma üzerine, G_{best} ile temsil edilen parçacıklar, cilt kanseri kategorilerinin sınıflandırılması için optimal hiper-parametreler olarak kabul edilmiştir. Şekil 5, önerilen CNN-PSO optimizasyonunun akış şemasını göstermektedir.



Şekil 5. CNN-PSO akış diyagramı.

Görüntü işleme sistemlerinin analizi için CAD’da izlenen ve yaygın olarak kabul edilen performans ölçütleri kullanılarak önerilen çalışma doğrulanmıştır [36]. Önerilen modeli doğrulamak için doğruluk, duyarlılık ve özgüllük performans ölçütleri kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan performans ölçütleri Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Performans değerlendirme ölçütleri.

Parametre	Denklem
	$\frac{TP + TN}{TP + FN + TN + FP}$
Doğruluk (Ac)	$\frac{TP}{TP + FN + TN + FP}$
Duyarlılık (Se)	$\frac{TP + FN}{TN}$
Özgüllük (Sp)	$\frac{TN + FP}{TN + FP}$

4. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada önerilen yöntem için elde edilen deneysel sonuçlarda Intel Core i7, 3.60 GHz işlemci, Nvidia GTX1080Ti GPU, Windows 10 ve 16 GB RAM içeren bir cihaz kullanılmıştır. Gerçekleştirilen tüm süreçlerde, Tensor Flow ile Keras derin öğrenme çerçevesini kullanan, Python’da pydicom kütüphanesi kullanılarak uygulanmıştır. PSO optimum değerlerin belirlenmesi için tanımlanan parametreleri göstermektedir [37]. Kullanılan parametreler Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. PSO’nun başlangıç parametreleri.

Parametre	Değer
Popülasyon boyutu	10
Yineleme sayısı	50
Bilişsel parametre	2
Sosyal parametre	2
Atalet ağırlığı	0,6

Bu çalışmada, genel erişime açık ve ulaşılabilir iki ayrı veri seti olan ISIC-2019 ve Asian-dermoscopy kullanılmıştır. Her bir veri setindeki orijinal görüntü dağılımı Şekil 2’de gösterilmiştir. Tablo 4’te, artırılmış görüntülerin eklenmesiyle değiştirilen veri kümelerinin görüntü sayılarının kategorilere göre dağılımı gösterilmektedir.

Tablo 4. ISIC-2019 ve Asian dermoscopy veri kümelerinin orijinal ve artırılmış örnek sayıları.

Cilt kanseri kategorileri	ISIC-2019		Asian dermoscopy		Toplam
	Orijinal	Veri büyütme	Orijinal	Veri büyütme	
Melanoma (MEL)	4522	27132	242	1452	28584
Melanocytic nevus (MN)	12875	77250	1702	10212	87462
Basal cell carcinoma (BCC)	3323	19938	720	4320	24258
Benign keratosis (BK)	2624	15744	1713	10278	26022
Toplam	23344	140064	4377	26262	166326

Veri kümeleri, cilt kanserinin farklı türlerine ait daha fazla görüntü örneğini oluşturmak üzere birleştirilmiştir. Her kategori için veri setlerinden rastgele eşit sayıda görüntü alınmaktadır ve büyütme tekniği ile görüntü sayısı artırılmaktadır. Eğitim sürecini iyileştirmek ve optimum hiper-parametreleri belirlemek amacıyla, artırılmış veri kümesi, her biri sınıf başına sırasıyla 750 örnek ve 1000 örnek içerecek şekilde Test1 ve Test2 olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Böylelikle veri dengesi, ayrı bir veri kümesi oluşturularak sağlanmış olur. Tablo 5, iki ayrı veri seti (Test1 ve Test2) oluşturmak için her bir veri setinden alınan görüntülerin sayısını göstermektedir.

Parçacıkları karşılaştırmak için, PSO tarafından üretilen CNN konfigürasyonlarının her birinin eğitimi ve testi benzer setlerle yapılmıştır. Gözetimli eğitim, çapraz entropi kaybı fonksiyonu ile amaçlanan çıktı ve gerçek çıktı arasındaki farklılıkları azaltmak için SGDM optimize kullanılarak gerçekleştirilmiştir [38, 39]. Ağırlık başlatma, normalleştirme işlemi ile yapılmaktadır ve ağırlık güncellemesi, 50 tur (epoch) için standart geri yayılım (Back

Propagation-BP) algoritması ile gerçekleştirilmiştir [40]. Küresel minimum hesaplama için öğrenme oranı 0,01 olarak sabitlenmiştir. Toplam veri seti %60 eğitim ve %40 test için kullanılacak şekilde ayarlanmıştır.

Tablo 5. Test1 ve Test2 test setlerinin görüntü bölümleri.

Cilt kanseri kategorileri	Test1 (Rastgele seçim)		Test2 (Rastgele seçim)	
	ISIC-2019	Asian-der	ISIC-2019	Asian-der
Melanoma (MEL)	250	500	700	300
Melanocytic nevus (MN)	250	500	700	300
Basal cell carcinoma (BCC)	250	500	700	300
Benign keratosis (BK)	250	500	700	300
Toplam	3000		4000	

4.1. Test Sonuçları

Tablo 6, G_{best} tarafından son sürüde temsil edilen parçacıklar için Test1 ve Test2 olmak üzere iki ayrı test setinde elde edilen sonuçları rapor etmektedir. Bu iki test alt kümesinden sayısız örnek kullanılarak, G_{best} parçacığında bulunan hiper-parametreler aşağıda verilmiştir:

- Conv1'deki filtre sayısı: 61 boyut 3
- Conv2'deki filtre sayısı: 60 boyut 3
- Gizli katman nöronlarının sayısı: 73
- Parti boyutu (batch size): 14
- Ort. Havuzlama (Avg pooling)
- FC katmanında dropout olasılığı: 0,04

Tablo 6. İki test örnekleriyle G_{best} parçacıklarından elde edilen sonuçlar (%).

Test setleri	Sınıf başına örnek sayısı (toplam)	Doğruluk (Ac)	Duyarlılık (Se)	Özgüllük (Sp)	AUC
Test1	750 (3000)	97,93	92,89	98,75	0,963
Test2	1000 (4000)	99,33	94,65	98,87	0,983
	Ortalama (mean)	98,63	93,77	98,81	0,973
	Varyasyon katsayısı: Standart sapma/mean	0,709	0,938	0,061	1,027

Tablo 6'da verilen sonuçlar, birleştirilmiş veri kümesinden cilt kanseri sınıflandırması için CNN-PSO modelinin performansını göstermektedir. Ortalama %98.63 doğrulukla birlikte Test2 veri seti ile %99.33 gibi kayda değer bir yüksek doğruluk elde edilmiştir. Buna karşılık gelen duyarlılık, özgüllük ve AUC sırasıyla %94,65, %98,87 ve 0,983'dir. Ayrıca, sınıflandırma çeşitliliğini temsil eden etkinliği kanıtlayan G_{best} tarafından düşük bir varyasyon katsayısı değerine de ulaşıldığı tablodan fark edilebilmektedir. Ayrıca, cilt kanseri lezyonlarının şeklinin dokusundan çok, durumlarda yanlış pozitiflerden sorumlu olabileceği deneylerden gözlemlenmiştir. Ayrıca, bir parçacığın eğitilmesi için ortalama sürenin yaklaşık 50 dakika olduğu ve PSO için toplam işlem süresinin 15 saat olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 7. İki veri kümesinde CNN modelinin 10-kat (fold) Cross-Validation (CV) doğruluğu.

CV	Doğrulama (Ac%)	
	ISIC-2019	Asian dermoscopy
1	92,59	91,07
2	93,69	91,42
3	94,59	93,49
4	95,59	94,97
5	95,89	96,21
6	96,89	96,74
7	97,69	97,94
8	98,39	98,65
9	99,49	99,13
10	99,69	99,49
Ortalama	96,45	95,91

PSO ile optimize edilmiş CNN'nin performansı, yöntemin bireysel veri kümeleri üzerindeki güvenilirliğini kanıtlamak için 10 kat çapraz doğrulama CV stratejisi aracılığıyla yürütülmüştür [41]. Bu stratejide, verilen verilerden 9'unun CNN'i eğitmek üzere ve geri kalanının modeli doğrulamak üzere kullanıldığı 10 parçaya bölünmektedir. İşlem 10 kez tekrarlanmaktadır. Tek bir cilt kanseri lezyon görüntüsü için test süresi ortalama 1,5 s'dir. Tablo 7, on farklı veri kıvrımının ortalaması kullanılarak hesaplanan CV'nin nihai tahminini göstermektedir.

Cilt kanseri lezyon görüntülerini sınıflandırmada CNN-PSO'nun performansını karşılaştırmak için iki test veri seti üzerinde istatistiksel bir deney yapılmıştır. Önerilen yöntem, Genetik Algoritmalar (GA), Diferansiyel Evrim (DE) ve Gri Kurt Optimizasyonu (GWO) gibi benzer optimizasyon algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. Çok sayıda yapılmış uygulamalarda tahmin ve optimizasyon modeli olarak kullanılan bu algoritmaların performansına dayalı olarak, karşılaştırmalar yapılmıştır. Mevcut literatür çalışmalarından edinilen bilgiler neticesinde bu algoritmalar için kullanılan parametrelerin ayarlanması Tablo 8'de verildiği gibidir. Değerlendirme için kullanılan istatistiksel kriterlerin hesaplanması Denklem 2-5'te verilmiştir [42].

Tablo 8. Optimizasyon algoritmalarında kullanılan parametre ayarları.

Optimizasyon algoritmaları	Parametre ayarları
Genetik Algoritma + CNN	Çaprazlama: 0,8, mutasyon: 0,01
Diferansiyel Evrim + CNN	F: 0,8, C: 0,4
Gri Kurt Optimizasyonu + CNN	ρ : 0,3, γ : 0,5, β : 0,08, n : 4, s : 0,04, l_0 : 5

$$\text{Ortalama kare hatası (OKH)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2)$$

$$\text{Ortalama mutlak hata (OMH)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (3)$$

$$\text{KökOKH (KOKH)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4)$$

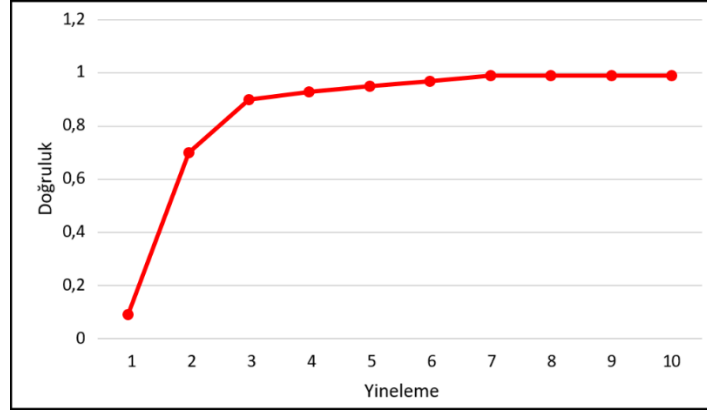
$$\text{Coefficient belirleme (R}^2\text{)} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (5)$$

Bu denklemlerde \hat{y}_i , i . tahmin edilen elemanı, y_i , i . ölçülen elemanı, n , örnek sayısını, \bar{y} , tahmin edilen karşılık gelen değerlerin ortalamasını temsil etmektedir.

Tablo 9. PSO+CNN'nin diğer optimizasyon algoritmalarıyla istatistiksel değerlendirme sonuçları.

Yöntem	OKH	OMH	KOKH	R ²
Genetik Algoritma (GA) + CNN	0,0646	0,1498	0,1993	0,5942
Diferansiyel Evrim (DE) + CNN	0,0472	0,1474	0,1892	0,7738
Gri Kurt Optimizasyonu (GWO) + CNN	0,0287	0,1153	0,1582	0,8647
Önerilen yöntem - PSO + CNN	0,0176	0,0837	0,1108	0,9312

Tablo 9'da, önerilen PSO-CNN modelinin test veri setleri üzerinden diğer optimizasyon algoritmaları ile istatistiksel kriterler bakımından karşılaştırılması verilmiştir. OKH, OMH ve KOKH ile en düşük değerli sonuçlar en verimli yöntemi gösterirken, yüksek R² değeri daha iyi bağıntıyı göstermektedir. Tablo 9'da gösterildiği üzere, PSO-CNN'in diğer algoritmalara kıyasla daha iyi performans kriterlerini karşıladığı açıktır. Yüksek doğrulukta sınıflandırma üretmek için PSO'nun yakınsaması Şekil 6'da gösterilmektedir.



Şekil 6. PSO yakınsama grafiği (Doğruluk / Yineleme).

Tablo 10. Önerilen yöntemin mevcut ilgili çalışmalarla karşılaştırılması.

Çalışma	Yöntem	Doğruluk (%)
Xie vd., [43]	Segmentasyon	85,8
Shahin vd., [44]	CNN	89,9
Khan vd., [45]	CNN	89,8
Liu ve vd., [46]	ROI+CNN	90,67
Pour ve Seker [47]	Segmentasyon+CNN	95,62
Al-Masni vd., [48]	Segmentasyon+FrCN	90,78
Serte vd., [49]	Derin öğrenme	91
Dash vd., [50]	Segmentasyon+U-Net	94,8
Li vd., [51]	CNN	99,08
Cengil vd., [52]	CNN	77
Yıldırım ve Cinar [53]	Hybrid CNN	83,49
Önerilen yöntem	PSO ile optimize CNN	99,33

DeneySEL sonuçlar, CNN'nin optimum hiper-parametrelerinin keşfedilmesinde PSO'nun kullanılabilceğini gösterirken, bu uygulama 10 kez çalıştırılarak gerçekleştirilmiştir. Özetle, önerilen çalışmanın sınıf sayısı, CNN ve varyantları, aynı veya benzer veri kümeleri ve sınıflandırma oranı (%) bazında mevcut benzer yöntemlerle karşılaştırılması Tablo 10'da gösterilmiştir.

Önerilen yöntem, literatür bölümünde anlatılan benzer cilt kanseri lezyon görüntülerini sınıflandırma yaklaşımlarıyla karşılaştırılmıştır. Önerilen yöntemde, giriş görüntüsünün özelliğini uyarlamalı olarak öğrenilebilmektedir. Sınıf dengesizliğini önlemek için önerilen yöntem, rastgele seçilmiş görüntü örneklerine sahip birleştirilmiş veri kümesini kullanarak bu sorunu etkin bir şekilde ele almaktadır. Ayrıca, model sağlamlığını artıran ve yakınsamayı hızlandıran CNN parametrelerini optimize etmek için PSO algoritması kullanılmıştır. Karşılaştırılan yöntemler, birkaçı dışında aynı veya benzer veri kümelerini kullanmışlardır. Önerilen yaklaşımda 10. yinelemede maksimum puanla yakınsama sağlanmıştır. Yöntemlerden bazıları çok sınırlı veri kümeleriyle test edilmektedir ve kullanılan algoritmalar yavaştır. Ayrıca, performansın düşmesine yol açan uzamsal bilgiyi (özellikler arasındaki göreceli ilişki) ölçmekten yoksundurlar. Geleneksel yöntemlere göre önerilen yöntem, basitliği, orta düzeyde donanım gereksinimi ile uygulama kolaylığı ve çok sınıflı varyansı işleme yeteneği nedeniyle daha büyük bir potansiyele sahiptir.

Önerilen yöntemle elde edilen kayda değer performansa rağmen, önerilen tekniğin klinik kullanımını sınırlayabilecek bazı eksiklikler bulunmaktadır. Hesaplama süresini iyileştirmek için, bilgi işlem donanımının performansı artırılabilir ya da ağ yapısını ve veri boyutunu küçültmek için iyileştirmeler sağlanabilir. Bununla birlikte önerilen yöntem birden çok örtüşen cilt kanseri lezyon veri kümeleri üzerinde test edilmesi gerekmektedir.

5. Sonuçlar

Cilt kanseri lezyon bileşenlerinin analizi, bireylerin sağlık durumunu yansıtmaktadır ve bu nedenle patoloji ve mikro biyolojide önemli kabul edilmektedir. Cilt lezyonlarının görüntülerinin manuel olarak incelenmesi son derece hassastır ve sonuçları taraflı yapan çeşitli faktörler nedeniyle hataya açıktır. CAD sistemleri üzerinden makine öğrenmesi ve derin öğrenme yöntemlerini kullanarak farklı cilt lezyonlarındaki morfolojik değişiklikleri

hızlandırmak ve doğru karar vermek mümkündür. Hiper-parametreleri PSO algoritmaları tarafından optimize edilen CNN kullanan bir derin öğrenme modeli olan bu çalışma sayesinde, bu morfolojik değişiklikleri kapsayan zorlu görev en aza indirilmiştir. Önerilen ağ ile hiper-parametreler optimize edilerek, CAD sistemlerinin yanlış pozitifleri azaltım sürecinde hassasiyet oranı artırılmaktadır. Önerilen model, cilt kanseri sınıflarını dört temel tipte melanoma, melanocytic nevus, basal cell carcinoma, benign keratosis olarak, özelliklerin manuel olarak çıkarılması ve ağın işlevsel hiper-parametrelerinin aranması adımı ortadan kaldırarak yüksek doğrulukla birbirinden ayırmaktadır. Ayrıca, önerilen ağ, diğer algoritmalar tarafından optimize edildiğinde PSO için optimize edilmiş CNN'in aynı CNN tarafından karşılaştırılmalı olarak daha iyi performans gösterdiği ortaya konmuştur. Benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında, önerilen yöntem, cilt lezyonlarını kategorize etme konusundaki üstünlüğünü kanıtlamıştır. Umut verici sonuçlar elde edilmesine rağmen, sistemin daha genel ve sağlam olduğunu kanıtlamak için yerel yeni veri kümeleriyle ek deneyler yapılabilir.

Teşekkür

Yazarlar makaleye eşit katkıdır. E.Ö. ve F.A.Ö. fikir sahibi, E.Ö. deneyleri gerçekleştirdi, E.Ö. ve F.A.Ö. modellemeyi gerçekleştirdi, E.Ö. ve F.A.Ö. sonuçları yorumladı, E.Ö. ve F.A.Ö. makaleyi yazdı.

Kaynaklar

- [1] Karimkhani, C., Dellavalle, R. P., Coffeng, L. E., Flohr, C., Hay, R. J., Langan, S. M., ... & Naghavi, M. (2017). Global skin disease morbidity and mortality: an update from the global burden of disease study 2013. *JAMA dermatology*, 153(5), 406-412.
- [2] Braun, R. P., Rabinovitz, H. S., Oliviero, M., Kopf, A. W., & Saurat, J. H. (2005). Dermoscopy of pigmented skin lesions. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 52(1), 109-121.
- [3] Argenziano, G., Soyer, H. P., Chimenti, S., Talamini, R., Corona, R., Sera, F., ... & Kopf, A. W. (2003). Dermoscopy of pigmented skin lesions: results of a consensus meeting via the Internet. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 48(5), 679-693.
- [4] Kittler, H., Pehamberger, H., Wolff, K., & Binder, M. J. T. I. O. (2002). Diagnostic accuracy of dermoscopy. *The lancet oncology*, 3(3), 159-165.
- [5] Vestergaard, M. E., Macaskill, P. H. P. M., Holt, P. E., & Menzies, S. W. (2008). Dermoscopy compared with naked eye examination for the diagnosis of primary melanoma: a meta-analysis of studies performed in a clinical setting. *British Journal of Dermatology*, 159(3), 669-676.
- [6] Prathiba, M., Jose, D., & Saranya, R. (2019, October). Automated melanoma recognition in dermoscopy images via very deep residual networks. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 561, No. 1, p. 012107). IOP Publishing.
- [7] 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).
- [8] Özbay, E. (2022). An active deep learning method for diabetic retinopathy detection in segmented fundus images using artificial bee colony algorithm. *Artificial Intelligence Review*, 1-28. <https://doi.org/10.1007/s10462-022-10231-3>
- [9] Harangi, B. (2018). Skin lesion classification with ensembles of deep convolutional neural networks. *Journal of biomedical informatics*, 86, 25-32.
- [10] Almaraz-Damian, J. A., Ponomaryov, V., Sadovnychiy, S., & Castillejos-Fernandez, H. (2020). Melanoma and nevus skin lesion classification using handcraft and deep learning feature fusion via mutual information measures. *Entropy*, 22(4), 484.
- [11] Ameri, A. (2020). A deep learning approach to skin cancer detection in dermoscopy images. *Journal of Biomedical Physics and Engineering*, 10(6), 801-806.
- [12] Srivastava, N., Hinton, G., Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Salakhutdinov, R. (2014). Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting. *The journal of machine learning research*, 15(1), 1929-1958.
- [13] Moldovanu, S., Obreja, C. D., Biswas, K. C., & Moraru, L. (2021). Towards accurate diagnosis of skin lesions using feedforward back propagation neural networks. *Diagnostics*, 11(6), 936.
- [14] Bakheet, S. (2017). An SVM framework for malignant melanoma detection based on optimized HOG features. *Computation*, 5(1), 4.
- [15] Monisha, M., Suresh, A., Babu, B. R., & Rashmi, M. R. (2019). Classification of malignant melanoma and benign skin lesion by using back propagation neural network and ABCD rule. *Cluster Computing*, 22(5), 12897-12907.
- [16] Ge, Z., Demyanov, S., Bozorgtabar, B., Abedini, M., Chakravorty, R., Bowling, A., & Garnavi, R. (2017, April). Exploiting local and generic features for accurate skin lesions classification using clinical and dermoscopy imaging. In *2017 IEEE 14th international symposium on biomedical imaging (ISBI 2017)* (pp. 986-990). IEEE.

- [17] Moura, N., Veras, R., Aires, K., Machado, V., Silva, R., Araújo, F., & Claro, M. (2019). ABCD rule and pre-trained CNNs for melanoma diagnosis. *Multimedia Tools and Applications*, 78(6), 6869-6888.
- [18] Khan, M. A., Sharif, M., Akram, T., Bukhari, S. A. C., & Nayak, R. S. (2020). Developed Newton-Raphson based deep features selection framework for skin lesion recognition. *Pattern Recognition Letters*, 129, 293-303.
- [19] Naeem, A., Farooq, M. S., Khelifi, A., & Abid, A. (2020). Malignant melanoma classification using deep learning: datasets, performance measurements, challenges and opportunities. *IEEE Access*, 8, 110575-110597.
- [20] Adegun, A., & Viriri, S. (2020, February). Deep convolutional network-based framework for melanoma lesion detection and segmentation. In *International Conference on Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems* (pp. 51-62). Springer, Cham.
- [21] Salih, O., & Viriri, S. (2020). Skin lesion segmentation using local binary convolution-deconvolution architecture. *Image Analysis & Stereology*, 39(3), 169-185.
- [22] Ameri, A. (2020). A deep learning approach to skin cancer detection in dermoscopy images. *Journal of Biomedical Physics and Engineering*, 10(6), 801-806.
- [23] Chaturvedi, S. S., Temburne, J. V., & Diwan, T. (2020). A multi-class skin Cancer classification using deep convolutional neural networks. *Multimedia Tools and Applications*, 79(39), 28477-28498.
- [24] Lee, Y. C., Jung, S. H., & Won, H. H. (2018). WonDerM: Skin lesion classification with fine-tuned neural networks. *arXiv preprint arXiv:1808.03426*.
- [25] Mahbod, A., Schaefer, G., Wang, C., Ecker, R., & Elling, I. (2019, May). Skin lesion classification using hybrid deep neural networks. In *ICASSP 2019-2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)* (pp. 1229-1233). IEEE.
- [26] Tan, M., & Le, Q. (2019, May). Efficientnet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks. In *International conference on machine learning* (pp. 6105-6114). PMLR.
- [27] Tschandl, P., Rosendahl, C., & Kittler, H. (2018). The HAM10000 dataset, a large collection of multi-source dermatoscopic images of common pigmented skin lesions. *Scientific data*, 5(1), 1-9.
- [28] Codella, N. C., Gutman, D., Celebi, M. E., Helba, B., Marchetti, M. A., Dusza, S. W., ... & Halpern, A. (2018, April). Skin lesion analysis toward melanoma detection: A challenge at the 2017 international symposium on biomedical imaging (isbi), hosted by the international skin imaging collaboration (isic). In *2018 IEEE 15th international symposium on biomedical imaging (ISBI 2018)* (pp. 168-172). IEEE.
- [29] Combalia, M., Codella, N. C., Rotemberg, V., Helba, B., Vilaplana, V., Reiter, O., ... & Malvey, J. (2019). Bcn20000: Dermoscopic lesions in the wild. *arXiv preprint arXiv:1908.02288*.
- [30] Zhang, Y., Qiu, Z., Yao, T., Liu, D., & Mei, T. (2018). Fully convolutional adaptation networks for semantic segmentation. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 6810-6818).
- [31] Johnson, J. M., & Khoshgoftaar, T. M. (2019). Survey on deep learning with class imbalance. *Journal of Big Data*, 6(1), 1-54.
- [32] LeCun, Y., Kavukcuoglu, K., & Farabet, C. (2010, May). Convolutional networks and applications in vision. In *Proceedings of 2010 IEEE international symposium on circuits and systems* (pp. 253-256). IEEE.
- [33] Hijazi, S., Kumar, R., & Rowen, C. (2015). Using convolutional neural networks for image recognition. *Cadence Design Systems Inc.: San Jose, CA, USA*, 9.
- [34] Shi, Y. (2001, May). Particle swarm optimization: developments, applications and resources. In *Proceedings of the 2001 congress on evolutionary computation (IEEE Cat. No. 01TH8546)* (Vol. 1, pp. 81-86). IEEE.
- [35] Eberhart, R. C., & Shi, Y. (2000, July). Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization. In *Proceedings of the 2000 congress on evolutionary computation. CEC00 (Cat. No. 00TH8512)* (Vol. 1, pp. 84-88). IEEE.
- [36] García, S., Fernández, A., Luengo, J., & Herrera, F. (2009). A study of statistical techniques and performance measures for genetics-based machine learning: accuracy and interpretability. *Soft Computing*, 13(10), 959-977.
- [37] Cai, X., Cui, Z., Zeng, J., & Tan, Y. (2009). Individual parameter selection strategy for particle swarm optimization. *Particle swarm optimization*, 978-953.
- [38] Rubinstein, R. Y., & Kroese, D. P. (2004). *The cross-entropy method: a unified approach to combinatorial optimization, Monte-Carlo simulation, and machine learning* (Vol. 133). New York: Springer.
- [39] Özbay, E., & Özbay, F. A. (2021). A CNN Framework for Classification of Melanoma and Benign Lesions on Dermoscopic Skin Images. *International Journal of Advanced Networking and Applications*, 13(2), 4874-4883.
- [40] Li, J., Cheng, J. H., Shi, J. Y., & Huang, F. (2012). Brief introduction of back propagation (BP) neural network algorithm and its improvement. In *Advances in computer science and information engineering* (pp. 553-558). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [41] Refaeilzadeh, P., Tang, L., & Liu, H. (2009). Cross-validation. *Encyclopedia of database systems*, 5, 532-538.
- [42] Balasubramanian, K., & Ananthamoorthy, N. P. (2021). Improved adaptive neuro-fuzzy inference system based on modified glowworm swarm and differential evolution optimization algorithm for medical diagnosis. *Neural Computing and Applications*, 33(13), 7649-7660.

- [43] Xie, F., Yang, J., Liu, J., Jiang, Z., Zheng, Y., & Wang, Y. (2020). Skin lesion segmentation using high-resolution convolutional neural network. *Computer methods and programs in biomedicine*, 186, 105241.
- [44] Shahin, A. H., Kamal, A., & Elattar, M. A. (2018, December). Deep ensemble learning for skin lesion classification from dermoscopic images. In *2018 9th Cairo International Biomedical Engineering Conference (CIBEC)* (pp. 150-153). IEEE.
- [45] Khan, M. A., Javed, M. Y., Sharif, M., Saba, T., & Rehman, A. (2019, April). Multi-model deep neural network based features extraction and optimal selection approach for skin lesion classification. In *2019 international conference on computer and information sciences (ICCIS)* (pp. 1-7). IEEE.
- [46] Liu, L., Mou, L., Zhu, X. X., & Mandal, M. (2020). Automatic skin lesion classification based on mid-level feature learning. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 84, 101765.
- [47] Pour, M. P., & Seker, H. (2020). Transform domain representation-driven convolutional neural networks for skin lesion segmentation. *Expert Systems with Applications*, 144, 113129.
- [48] Al-Masni, M. A., Al-Antari, M. A., Choi, M. T., Han, S. M., & Kim, T. S. (2018). Skin lesion segmentation in dermoscopy images via deep full resolution convolutional networks. *Computer methods and programs in biomedicine*, 162, 221-231.
- [49] Serte, S., & Demirel, H. (2019). Gabor wavelet-based deep learning for skin lesion classification. *Computers in biology and medicine*, 113, 103423.
- [50] Dash, M., Londhe, N. D., Ghosh, S., Semwal, A., & Sonawane, R. S. (2019). PsLSNet: Automated psoriasis skin lesion segmentation using modified U-Net-based fully convolutional network. *Biomedical Signal Processing and Control*, 52, 226-237.
- [51] Li, W., Raj, A. N. J., Tjahjadi, T., & Zhuang, Z. (2021). Digital hair removal by deep learning for skin lesion segmentation. *Pattern Recognition*, 117, 107994.
- [52] Cengil, E., Çınar, A., & Yildirim, M. (2021). Hybrid Convolutional Neural Network Architectures For Skin Cancer Classification. *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, (28), 694-701.
- [53] Yildirim, M., & Çınar, A. (2021). Classification Of Skin Cancer Images With Convolutional Neural Network Architectures. *Turkish Journal Of Science And Technology*, 16(2), 187-195.

Kontrollü Silisyum Nano-İğnelerin Mikrofabrikasyonu

Ümit ÇELİK^{1*}

¹ Uçak Bakım Onarım Bölümü, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

*¹ u.celik@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 08/12/2022;

Kabul/Accepted: 28/02/2023)

Öz: Nano iğnelerin üretimi, yüksek performanslı çok işlevli nano cihazların geliştirilmesinde artan endüstriyel taleplerden dolayı ilgi çekmektedir. Nano ölçekli uçlar kontrollü transdermal ilaç salımı, soğuk katot alan emisyonu, taramalı uç mikroskobu, yansıma önleyici kaplama ve nanoindentasyon uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Taramalı uç mikroskobu ailesinin bir üyesi olan Atomik kuvvet mikroskobu (AKM), 1980'lerden beri yüksek çözünürlüklü yüzey karakterizasyonu için yaygın olarak kullanılan güçlü bir araç haline gelmiştir. AKM sensörü, esnek bir kuvvet algılayıcı konsoldan ve serbest ucunda nano ölçekli nanotipten oluşmaktadır. Yüksek çözünürlüklü AKM için nano-iğnenin eğrilik yarıçapı önem taşımaktadır. Islak aşındırma teknikleri ile AKM tip mikrofabrikasyonu düşük maliyet, kolay erişim ve (100) kristal düzleminde homojen aşındırma oranı gibi avantajları bulunmaktadır. Bu çalışmada, litografi ve ıslak aşındırma gibi mikrofabrikasyon teknikleri kullanılarak silisyum nano uçlar üretilmiştir. Yüksek sivrilik ve en boy oranlı uçlara sahip olacak şekilde süreç optimize edilmiştir. Anizotropik ıslak aşındırma için Potasyum Hidroksit (KOH) ve Tetrametil Amonyum Hidroksit (TMAH) çözeltileri kullanılmıştır. Islak aşındırma işlemi için SiO₂ maske kullanılmıştır. Değişik geometrilere daha keskin nano iğneler elde edebilmek için litografi maske geometrisi ve açılarını optimize edilmiştir. Çalışma neticesinde yüksek en boy oranına sahip nano iğneler, kare piramit geometrilili ve asimetrik beşgen piramit geometrilili nano iğneler üretilmiştir.

Anahtar kelimeler: Mikrofabrikasyon, nano iğne, ıslak aşındırma

Microfabrication of Controlled Silicon Nanotips

Abstract: The manufacturing of nanotips attract attention due to the increasing industrial demands in the development of high-performance multifunctional nanodevices. Nanoscale tips are widely used in controlled transdermal drug release, cold cathode field emission, scanning tip microscopy, anti-reflective coating and nanoindentation applications. Atomic force microscopy (AFM), a member of the scanning tip microscope family, has since the 1980s become a widely used powerful tool for high-resolution surface characterization. The AFM sensor consists of a flexible force-sensing cantilever and a nanoscale nanotip at its free end. The radius of curvature of the nanotips is important for high resolution AFM. Nanotip microfabrication with wet etching techniques has advantages such as low cost, easy access and homogeneous etching rate in the (100) crystal plane. In this study, silicon nano tips were machined using microfabrication techniques such as lithography and wet etching. The process is optimized to have tips with high sharpness and aspect ratio. Potassium hydroxide (KOH) and tetramethyl ammonium hydroxide (TMAH) solutions were used for anisotropic wet etching. SiO₂ mask was used for wet etching process. In order to obtain sharper nano tips in different geometries, lithography mask geometry and angles are optimized. As a result of the study, nanotips with high aspect ratio, square pyramid geometry and asymmetric pentagonal pyramid geometry nanotip could be manufactured.

Key words: Microfabrication, nanotips, wet etching

1. Giriş

Nano ölçekli uçlar, yüksek verimli alan emisyonu [1], yakın alan optik mikroskopisi [2], yüksek çözünürlüklü atomik kuvvet mikroskobu ve atomik çözünürlüklü tarama tünelleme mikroskobu [3] gibi farklı uygulamalarda kullanılmaktadır. Ayrıca nanotipler güneş pillerinde [4], optoelektronik [5] ve biyo/kimyasal algılama [6] cihazlarında farklı amaçlar için ilgi çekmektedir. 1986'da Atomik Kuvvet Mikroskoplarının (AKM) icadından bu yana AKM, nanoyapıların özelliklerini görüntülemek ve analiz etmek için yaygın olarak kullanılan bir araç haline gelmiştir. AKM, yüzeylerin nano ölçekte 3 boyutlu(3B) olarak karakterize edilmesine olanak sağlayan taramalı uç mikroskopisi ailesinin bir üyesidir. AKM nano ölçekli uca sahip bir konsol kullanılarak yüzeyin taranması prensibine dayanır. Yüzeyleri görüntülemek ve karakterize etmek için mikro fabrikasyon teknikleri ile üretilmiş bir konsola tutturulmuş keskin bir silisyum uç kullanılmaktadır. Nano yapıları çözmek için çok keskin nano iğneler

* Sorumlu yazar: u.celik@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-7759-6821

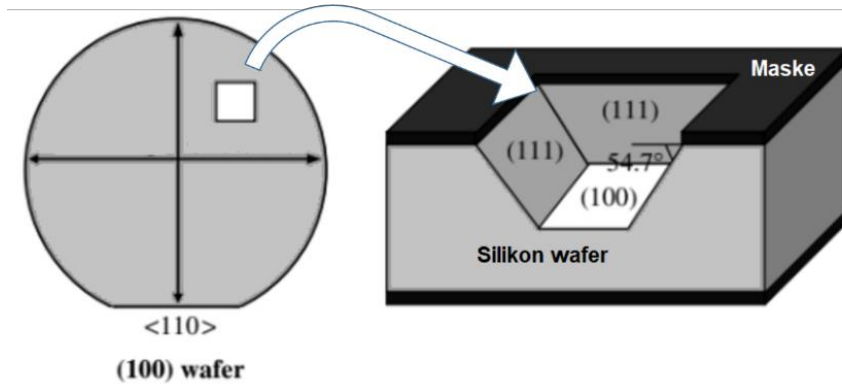
gerekmektedir. Elde edilen 3B görüntü çözünürlüğü nano iğnenin sivriliği ile orantılıdır. Dik yan duvarlara sahip nanoyapıların analiz edilebilmesi için ise yüksek en-boy oranına sahip nano ölçekli uçlara ihtiyaç duyulur.

Atomik Kuvvet Mikroskopları (AKM), malzeme bilimi, biyofizik, nanoteknoloji ve endüstriyel proses kontrolü gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. AKM, yüzey topografyası, mekanik özellikler, elektriksel veya manyetik özelliklerin elde edilmesi gibi ortak kullanım alanlarının yanı sıra birçok deneyin doğal ortamlarında yüksek çözünürlükte gerçekleştirilmesine olanak sağlayan bir tekniktir. Dinamik, temaslı, temassız ve bu modlardan türetilen diğer birçok AFM görüntüleme kipi bulunmaktadır. Dinamik (genlik modülasyonu) tarama modu ağırlıklı olarak kullanılmaktadır. Genlik modülasyonu AKM'de konsol rezonans frekansında salınım yapacak şekilde uyarılır ve konsol salınım genliği geri besleme sinyali olarak kullanılır. Salınım genliği, tarama sırasında bir PID kontrol döngüsü kullanılarak kullanıcı tarafından belirlenen bir titreşim genliğinde sabit tutulur.

AKM'lerde sarf malzeme olarak konsol ve nano-iğneden oluşan problemler kullanılmaktadır. Problemler, ters piramit şekilli kalıplar ve kimyasal aşındırma teknikleri olmak üzere 2 ana teknik ile üretilmektedir. Sonrasında iğne sivriliğini artırmak için oksidasyon bileme tekniği kullanılmaktadır [7, 8]. Kalıplama yöntemi ile üretim nispeten basittir ancak nihai uç sivriliği silisyum aşındırma tekniği ile elde edilen uçlar kadar iyi değildir.

Anizotropik malzemeler farklı yönlerde farklı özellikler gösterir [9]. Anizotropik aşındırma, karmaşık ve genellikle düz şekiller elde etmek için bir malzemeyi belirli yönlerde tercihli olarak aşındırmayı amaçlayan bir mikrofabrikasyon tekniğidir [10]. Bean ve arkadaşları tarafından silikonun hem yönelime bağlı hem de konsantrasyona bağlı olarak aşındırılması tartışılmıştır [10]. Tabata ve arkadaşları tarafından TMAH solüsyonlarında silikonun anizotropik aşınma davranışı incelenmiştir [11]. Birçok AKM probu ıslak anizotropik aşındırma veya kuru reaktif iyon aşındırma (RIE) [12, 13] teknikleri ile üretilmektedir. Islak aşındırma tekniği ile mikrofabrikasyon daha düşük maliyetlidir ve pahalı ekipmanlar gerektirmez. KOH çözeltisi ile anizotropik aşındırmada iğne sivriliği yeteri kadar keskin olmadığından ek olarak oksidasyon bileme aşaması uygulanmaktadır [14, 15].

Bu çalışmada, ıslak aşındırma işlemi ile silisyum iğnelerin mikro imalatı üzerinde çalışılmıştır. Anizotropik ıslak aşındırma için potasyum hidroksit (KOH) ve tetrametil amonyum hidroksit (TMAH) solüsyonları kullanılmıştır. Kontrollü geometriye sahip mikro iğneler üretebilmek için süreç optimize edilmiştir. Silisyum mikro iğneler maskelenmiş silisyum (100) plakanın (wafer) hızlı aşınan düzlemlerinde aşınması prensibine dayanmaktadır [16]. Bir (100)-Si plakasında anizotropik aşındırma ile oluşturulan kare/dikdörtgen şekilli boşluk şematik olarak Şekil 1'de gösterilmiştir [17].



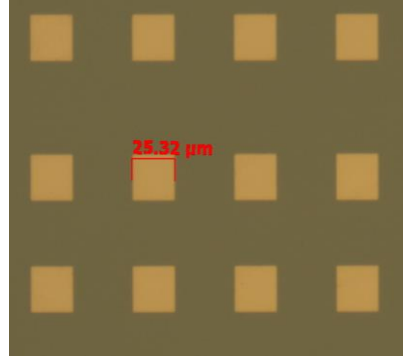
Şekil 1. Anizotropik aşındırmadan sonra (100)-Si wafer yüzeyindeki kare şeklindeki bir açıklığın üç boyutlu görünümü. Karenin kenarları 110 yön boyunca hizalanır.

Biswas ve ekibi tarafından farklı banyo sıcaklıklarında dört farklı KOH ve TMAH konsantrasyonları için n-tipi ve p-tipi silisyumun aşınma karakteristikleri belirlenmiştir [18]. Çalışmada KOH ile aşındırma hızının TMAH'a göre benzer koşullar için yaklaşık iki kat fazla olduğu gözlemlenmiştir. Kang ve arkadaşları tarafından Deep reactive-ion etching (DRIE) kullanılarak yüksek en boy oranlı silikon nano-iğneler üretilmiştir ancak DRIE yöntemi ıslak aşındırma yöntemine göre daha maliyetlidir [19]. Wang ve arkadaşları tarafından fonksiyonelleştirilmiş altın küreteler maske olarak kullanılarak silikon nano-iğneler üretilmiştir [20]. Ancak, çalışmada kontrollü dizi nano-iğneler üretilmemiştir. İçbükey ve dışbükey mikroyapıların üretiminde maske geometrisinin etkisi Pal ve arkadaşları tarafından araştırılmıştır ancak nano-iğnelerin oluşumunda maske geometrisi etkisi ile ilgili çalışma yapılmamıştır [21]. Islak aşındırma, DRIE ve yüzey aktif maddeyle modifiye edilmiş TMAH aşındırma ile farklı en boy oranlarına sahip keskin silikon uçlar elde edilmiştir [22].

2. Deneysel Çalışmalar ve Bulgular

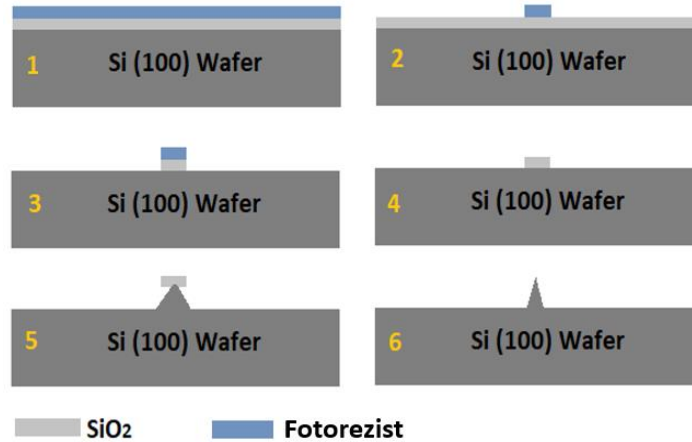
Deneysel çalışmalarda p-tipi (100) silisyum altlıklar kullanılmıştır. İlk olarak, nano-iğne üretimi için silisyum (100) plakanın her iki tarafına silisyum oksit (SiO_2) tabakası kaplanmıştır. Oksit kaplama için plazma ile güçlendirilmiş kimyasal buhar biriktirme (PECVD) sistemi kullanılarak 3000 Å kalınlığında SiO_2 tabakası büyütülmüştür. SiO_2 tabakası aşındırma maskesi olarak kullanılmıştır. Oksit kaplanan silisyum plaka, Şekil 2'de verilen fotolitografi maskesi kullanılarak desenlenmiştir. Bu amaçla döndürmeli kaplama (Spin Coater) cihazı kullanılarak fotorezist silisyum plaka üzerine kaplanmış ve kurutulmuştur. Kaplama işlemi sonrasında maske hizalayıcı (mask aligner) cihaz ile rezist UV ışığa maruz bırakılarak maskede bulunan desen silisyum plakaya aktarılmıştır. Buffer oxide etcher (BOE) kullanılarak UV ışığa maruz kalmayan alanlardaki oksit tabaka aşındırılarak mikro-desenlenmiş yüzey elde edilmiştir. Aşındırma işlemi Polytetrafluoroethylene (PTFE) silindirik kap içerisinde gerçekleştirilmiştir.

Silisyum nano iğnelerin mikrofabrikasyonu için 2 inç Si (100) altlıklar kullanılmıştır. Litografi için desen olarak $25\mu\text{m} \times 25\mu\text{m}$ ve $75\mu\text{m} \times 75\mu\text{m}$ maskeler kullanılmıştır. Optik maskeler silisyum plaka kesim yönüne göre 45 ve 90 derece hizalanmıştır. Çalışmada kullanılan optik maske Şekil 2'de verilmiştir. Rezist olmayan bölgelerdeki SiO_2 oksit tabakası 7:1 BOE sulu çözeltisi ile aşındırılmıştır. Silisyum aşındırma için %40 ve %25 sulu KOH ve TMAH çözeltileri kullanılmıştır. Tüm aşındırma işlemi 80° çözelti sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. $25\mu\text{m} \times 25\mu\text{m}$ kare optik litografi maskesi

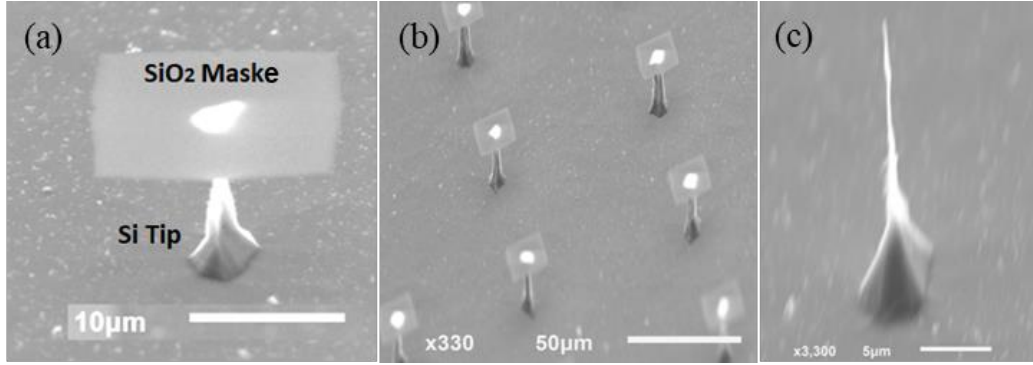
Nanotip üretim adımları Şekil 3'te verilmiştir. İlk olarak, PECVD kullanılarak 300 nm SiO_2 tabakası silisyum wafer yüzeyine büyütülmüş ve sonrasında optik litografi tekniği ile oksit tabakası desenlenmiştir. BOE (7:1) solüsyonu kullanılarak nano uç alanı dışındaki SiO_2 tabakası aşındırılmıştır. Silisyum plaka yüzeyi izopropil alkol ve aseton ile temizlendikten sonra anizotropik aşındırma işlemi başlatılmıştır. Oksit ile desenlenen alanlar korunmuştur ve aşındırıcı kimyasala maruz kalan alanların aşınması sağlanmıştır. Zamanla maskelenmiş oksit kaplı alanlar alttan aşınmaya başlamaktadır. Bu alanlardaki aşınma hızı, silisyum anizotropik aşınma düzlemlerine göre çok daha düşüktür. Maskelerin altında hızlı aşındırma düzlemlerinin alttan kesilmesiyle nano iğneler oluşmaktadır. Aşınmanın devam etmesiyle birlikte son olarak SiO_2 başlıklar iğne ucundan ayrılmaktadır.



Şekil 3. Nano iğne üretim adımları

2.1. Yüksek En/Boy Oranlı Nanotipler

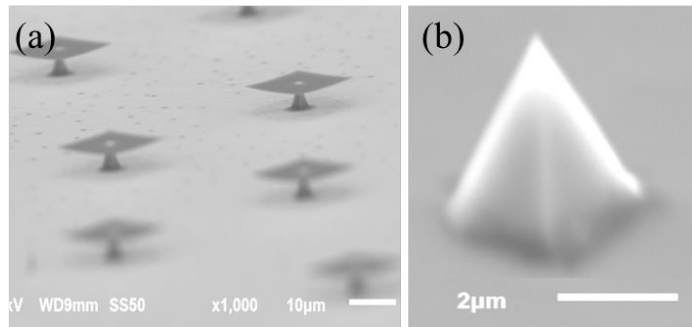
Çalışmada maske olarak desenlenmiş $25\mu\text{m} \times 25\mu\text{m}$ SiO_2 film kullanılmıştır. Silisyum aşındırma için %40 KOH çözeltisi kullanılmıştır. Aşındırma işlemi sırasında sıcaklık 80°C 'de sabit tutulmuş ve çözelti 200 rpm'de aşındırma işlemi süresince karıştırılmıştır. Şekil 4(a)'da 18 dakika aşındırılan nanotip, (b)'de 18 dakika aşındırılan nanotip dizisi ve (c)'de 20. dakika aşındırılan nanotip SEM mikroskop görüntüleri verilmiştir. SEM görüntülerinden de anlaşılacağı gibi ıslak aşındırma tekniği kullanılarak nano iğne oluşum sürecinin oldukça zaman kritik olduğu görülmektedir. Oksit şapkanın ayrılması ile birlikte nano iğne oluşumu tamamlanmaktadır ve sonrasında aşınma işlemi sonlandırılmadığı takdirde hızlı bir şekilde nano iğnenin gövdesi de aşınmaktadır. Şekil 4(a)'da oksit şapka görülmektedir, aşındırma süresinin 2 dakika daha devam ettirilmesi ile birlikte şapkanın ayrıldığı görülmektedir. Belirtilen şartlarda aşındırma sonrasında çok yüksek en boy oranına sahip silisyum nano iğneler üretilmiştir. Yüksek en boy oranına sahip iğneler AKM'lerde derin dik çukurları görüntülemeye kullanılabilir.



Şekil 4. Nano iğne SEM görüntüleri (a) 18 dakika aşındırılmış nano iğne, (b) 18 dakika aşındırılmış nano iğne dizisi, (c) 20 dakika aşındırılmış nano iğne (40% KOH, 80°C , $25\mu\text{m}^2$)

2.2. Piramidik Nanotipler

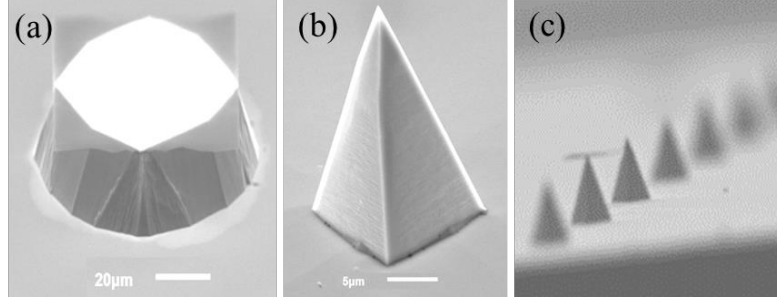
Ayrıca nano iğne aşındırma işlemi için TMAH çözeltisi kullanılmıştır. TMAH daha yavaş aşındırma hızı ve aşındırma sırasında ortaya çıkan daha az hidrojen gaz kabarcıklarından dolayı KOH çözeltisine göre daha kontrollü silisyum aşındırma işlemine izin vermektedir. Silisyum nano iğne üretimi için $25\mu\text{m} \times 25\mu\text{m}$ oksit maske kullanılmıştır. Kare oksit maske $\langle 100 \rangle$ düzleminde $\langle 110 \rangle$ yönüne göre 45° hizalanmıştır. TMAH çözeltisi kullanılarak aşındırma neticesinde piramidal nano iğneler üretilmiştir. Üretilen nano iğneler Şekil 5'te verilmiştir. Uç yüksekliği $4\mu\text{m}$ olarak ölçülmüş ve uç yarıçapının 50nm 'den daha küçük olduğu SEM görüntüsünden anlaşılmaktadır.



Şekil 5. Nano iğne SEM görüntüleri (a) 14 dakika aşındırılmış nano tip, (b) 16 dakika aşındırılmış nano tip (2% TMAH, 80°C , $25\mu\text{m}^2$)

Daha uzun nano iğneler için $75\mu\text{m} \times 75\mu\text{m}$ oksit maske kullanılmıştır. 16 ve 70 dakika aşındırma sonrasındaki nanotip oluşum durumu Şekil 6(a) ve (b)'de verilmiştir. Aşınma geometrisi 16 dakika sonunda sekizgendir, ancak

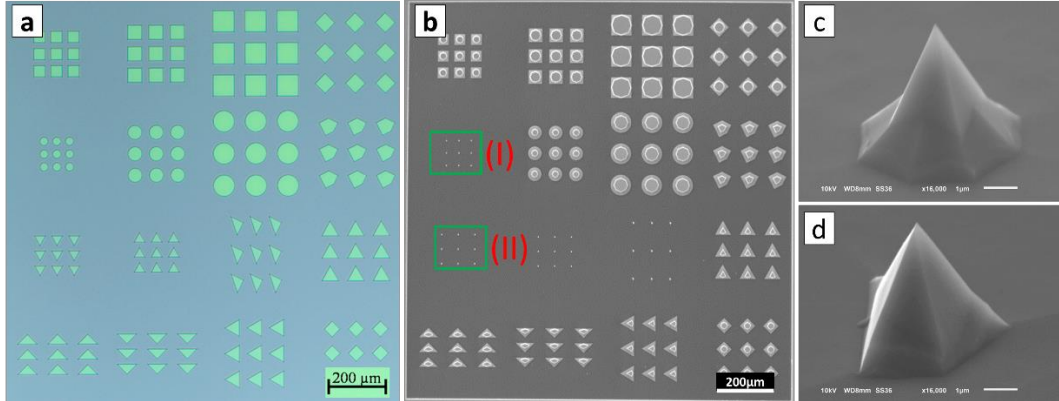
aşınma geometrisi 70 dakika sonunda piramidal yapıya dönüştüğü görülmektedir. Hızlı aşınma düzlemlerinin alttan kesilmesi Şekil 6(a)'da açıkça görülmektedir. Şekil 6(c)'de 70 dakika aşındırılmış nano tip dizisi verilmiştir.



Şekil 6. TMAH ile aşındırılan nano iğne SEM görüntüleri (a) 16 dakika aşındırılmış nano tip, (b) 70 dakika aşındırılmış nano tip (c) 70 dakika aşındırılmış nano tip dizisi (25% TMAH, 80 °C, 75µm²)

2.3. Maske Geometrisinin Nano İğne Geometrisine Etkisi

Çalışmada ayrıca maske geometrisinin nano tip geometrisi üzerindeki etkilerinin araştırılabilmesi amacıyla farklı geometrilere sahip bir optik maske tasarlanmıştır. Şekil 7(a)'da oksit aşındırma sonrası maske görüntüsü verilmiştir. Maskede farklı büyüklük ve yönelimlerde kare, yuvarlak, üçgen beşgen gibi farklı geometriler yer almaktadır. Bilindiği üzere ıslak aşındırmada kristal yönelimine göre aşınma hızları farklılık göstermektedir. Desenlenmiş silisyum plaka 80°C'de, sulu %25 TMAH çözeltisinde 20 dakika aşındırılmıştır. Aşınma sonrası elektron mikroskop görüntüsü Şekil 7(b)'de verilmiştir. Şekil 7(b)'de (I) olarak işaretlenen 25µm çapa sahip daire yapıların aşınma işleminin tamamlanarak nano iğnelerin oluştuğu görülmektedir. Oluşan nano iğne geometrisi elektron mikroskop görüntüsü Şekil 7(c)'de verilmiştir. Aşınma geometrisinin başta sekizgen bir geometri ile başladığı, sonrasında kare piramit geometrisine döndüğü görülmektedir. Şekil 7(b)'de (II) olarak işaretlenen alanda kenar uzunluğu 25µm olan üçgen geometrisi aşınma maskesi görülmektedir. Üçgen geometrili maskenin aşınması sonrasında oluşan nano-tip geometrisi Şekil 7(d)'de verilmiştir. Aşınma sonrasında oluşan nano iğnenin asimmetrik beşgen piramit yapıda olduğu görülmektedir. Farklı maske geometrileri ile farklı 3 boyutlu yapılarda nano iğneler elde edilebilmiştir.

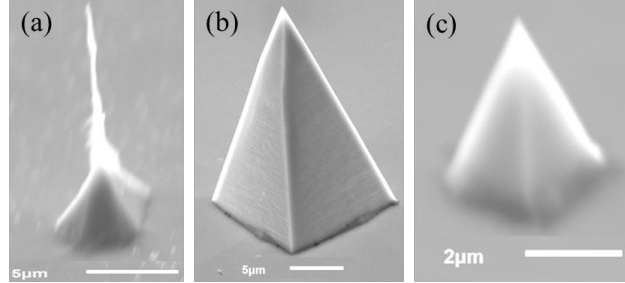


Şekil 7. Maske geometrisinin nano iğne geometrisine etkisi; (a) oksit aşındırma sonrası maske görüntüsü, (b) 80°C'de, %25 TMAH çözeltisinde 20 dakika aşınmış silisyum plaka, (c) (I) olarak etiketlenmiş alanda yer alan daire maskeden elde edilen nano iğne, (d) (II) olarak etiketlenmiş alanda yer alan üçgen maskeden elde edilen nano iğne.

3. Tartışma

Bu çalışmada 4 µm ve 22 µm yüksekliklerine sahip piramidal nano iğneler tasarlanmış ve üretilmiştir. Ayrıca, çok yüksek en-boy oranlı 20 µm yüksekliğe sahip nano iğneler üretilmiştir. Mikrofabrikasyon için aşındırma süreleri, maske boyutları ve oryantasyonu optimize edilmiştir. Farklı geometrilere sahip üretilen nano iğnelerin SEM görüntüleri Şekil 8'de gösterilmiştir. KOH çözeltisi ile daha agresif ve hızlı aşındırma gerçekleştirilebildiği

ancak aşınma sırasında ortaya çıkan hidrojen gaz kabarcıklarından dolayı üretim geometrisinin daha kontrolsüz olduğu görülmüştür. TMAH çözeltisi ile kontrollü piramidik yapıya sahip nano-iğneler üretilmiştir. %40 sulu KOH çözelti içerisinde 80° sıcaklıkta 70µm/s hızında, %25 sulu TMAH çözelti içerisinde 80° sıcaklıkta ise 30µm/s hızında silisyum (100) altlığın aşındırılabilceği görülmüştür.



Şekil 8. Üretilen nano iğneleri elektron mikroskobu görüntüleri (a) KOH ile aşındırılmış iğne, (b)

4. Sonuçlar

Nano iğneler kontrollü transdermal ilaç salımı, taramalı uç mikroskobu ve yansıma önleyici kaplama gibi uygulamalarda yoğun ilgi çekmektedir. Bu çalışmada ıslak aşındırma yöntemi ile basit, düşük maliyetli ve kontrol edilebilir nano iğne üretim yöntemi önerilmektedir. Farklı aşındırma şartlarında farklı nano iğne geometrileri elde edilmiştir. Aşındırma çözeltisi olarak sulu KOH ve TMAH çözeltileri kullanılmıştır. TMAH çözeltisi ile daha kontrollü ancak yavaş silisyum aşındırılması yapılabildiği görülmüştür. KOH ile daha agresif ve hızlı, yüksek en boy oranına sahip nano iğneler üretilebileceği görülmüştür. Çalışmada yüksek en boy oranına sahip 20µm yükseklik ve 200 nm çaptan küçük çubuğumsu nano iğneler üretilmiştir. Ayrıca 4 ve 20 µm yüksekliğinde piramidal iğneler üretilmiştir. Üretilen piramidal şekilli uç yarıçapı elektron mikroskobu ile 50 nm'den küçük olarak ölçülmüştür. Farklı boyut ve geometrilere sahip maskelerin nano iğne geometrisi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Daire geometrili aşındırma maskesi ile simetrik yapıya sahip tabanı sekizgen olan ve uç kısmı kare prizma olan nano iğne elde edilmiştir. Üçgen geometrili maske ile asimetrik yapıya sahip beşgen piramit geometrili nano iğne elde edilmiştir.

Teşekkür

Sabancı Üniversitesi SUNUM'dan Süleyman Çelik'e faydalı tartışmalar için teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] F. Houdellier, A. Masseboeuf, M. Monthieux et al., "New carbon cone nanotip for use in a highly coherent cold field emission electron microscope," *Carbon*, vol. 50, no. 5, pp. 2037-2044, 2012.
- [2] M. Jung, D. Kim, and S. Choi, "Fabrication of sub-10nm Si-tip array coated with Si₃N₄ thin film for potential NSOM and liquid metal ion source applications," *Microelectronic engineering*, vol. 53, no. 1-4, pp. 399-402, 2000.
- [3] M. d. Rezek, and C. Joachim, "Nanotip Technology for Scanning Probe Microscopy Chapter," *Scanning Probe Microscopy*, pp. 1, 2010.
- [4] C. Striemer, and P. Fauchet, "Dynamic etching of silicon for broadband antireflection applications," *Applied physics letters*, vol. 81, no. 16, pp. 2980-2982, 2002.
- [5] F. Ponce, and D. Bour, "Nitride-based semiconductors for blue and green light-emitting devices," *nature*, vol. 386, no. 6623, pp. 351-359, 1997.
- [6] S. Nakamura, "The roles of structural imperfections in InGa_N-based blue light-emitting diodes and laser diodes," *Science*, vol. 281, no. 5379, pp. 956-961, 1998.
- [7] A. Folch, M. S. Wrighton, and M. A. Schmidt, "Microfabrication of oxidation-sharpened silicon tips on silicon nitride cantilevers for atomic force microscopy," *Journal of microelectromechanical systems*, vol. 6, no. 4, pp. 303-306, 1997.
- [8] I. Rangelow, "Sharp silicon tips for AFM and field emission," *Microelectronic Engineering*, vol. 23, no. 1-4, pp. 369-372, 1994.
- [9] I. H. Kara, "Wear Behavior of Hot Rolled AZ31B and AZ31B-Nd-La Mg Alloys Tested at Different Angles to Rolling Direction," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 31, no. 6, pp. 4925-4933, 2022.
- [10] K. E. Bean, "Anisotropic etching of silicon," *IEEE Transactions on electron devices*, vol. 25, no. 10, pp. 1185-1193, 1978.

- [11] O. Tabata, R. Asahi, H. Funabashi et al., "Anisotropic etching of silicon in TMAH solutions," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 34, no. 1, pp. 51-57, 1992.
- [12] A. Boisen, O. Hansen, and S. Bouwstra, "AFM probes with directly fabricated tips," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 6, no. 1, pp. 58, 1996.
- [13] L. Li, X. Han, W. Wu et al., "Fabrication of novel cantilever with nanotip for AFM applications." pp. 2383-2386.
- [14] J. Han, X. Li, H. Bao et al., "AFM probes fabricated with masked–maskless combined anisotropic etching and p+ surface doping," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 16, no. 2, pp. 198, 2005.
- [15] D. Resnik, D. Vrtacnik, U. Aljancic et al., "Different aspect ratio pyramidal tips obtained by wet etching of (100) and (111) silicon," *Microelectronics journal*, vol. 34, no. 5-8, pp. 591-593, 2003.
- [16] M. Shikida, K.-i. Nanbara, T. Koizumi et al., "A model explaining mask-corner undercut phenomena in anisotropic silicon etching: a saddle point in the etching-rate diagram," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 97, pp. 758-763, 2002.
- [17] P. Pal, "Some novel processes and techniques for MEMS design, fabrication and characterization," 2004.
- [18] K. Biswas, and S. Kal, "Etch characteristics of KOH, TMAH and dual doped TMAH for bulk micromachining of silicon," *Microelectronics journal*, vol. 37, no. 6, pp. 519-525, 2006.
- [19] C. K. Kang, S. M. Lee, I. D. Jung et al., "The fabrication of patternable silicon nanotips using deep reactive ion etching," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 18, no. 7, pp. 075007, 2008.
- [20] Y. Wang, L. Zhu, Y. Zhang et al., "Silicon nanotips formed by self-assembled Au nanoparticle mask," *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 12, pp. 1821-1828, 2010.
- [21] P. Pal, and K. Sato, "Fabrication methods based on wet etching process for the realization of silicon MEMS structures with new shapes," *Microsystem technologies*, vol. 16, pp. 1165-1174, 2010.
- [22] B. Tang, K. Sato, and M. A. Gosálvez, "Sharp silicon tips with different aspect ratios in wet etching/DRIE and surfactant-modified TMAH etching," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 188, pp. 220-229, 2012.

Açık Kaynaklardan Test Otomasyon Araçlarıyla Siber Tehdit İstihbaratı Çıkarılması

Anıl SEZGİN^{1,2*}, Aytuğ BOYACI³

¹ ATASAREN, Milli Savunma Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

² Siemens, İstanbul, Türkiye

³ Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Milli Savunma Üniversitesi, Hava Harp Okulu, İstanbul, Türkiye

*^{1,2} anilzgn@gmail.com, ³ aboyaci@hho.msu.edu.tr

(Geliş/Received: 11/12/2022;

Kabul/Accepted: 08/02/2023)

Öz: Siber tehdit istihbaratı siber tehdit odaklı, yapılandırılmış ve analiz edilmiş bilgiler için kullanılan bir kavramdır. Bu çalışmada sosyal medya ve siber güvenlik siteleri gibi çeşitli açık kaynaklardan, test otomasyon araçları aracılığıyla elde edilen ham verilerin yapısal verilere dönüştürülmesini ve veriye dayalı tehdit analizine hazır, siber güvenlik istihbaratı elde edilmesini sağlayacak bir model önerilmiştir. Toplanan ve yapılandırılmamış olan ham veriler, modelimiz tarafından yapılandırılmış verilere dönüştürülmekte ve siber güvenlik yazılımlarını besleyebilecek standart formlara getirilmektedir.

Anahtar kelimeler: Açık kaynak istihbaratı, siber tehdit istihbaratı, test otomasyon, veri toplama.

Extracting Cyber Threat Intelligence with Test Automation Tools from Open Sources

Abstract: Cyber threat intelligence is a concept used for cyber threat-oriented, structured and analyzed information. In this study, we propose a model to transform raw data obtained from various open sources such as social media and cybersecurity sites through test automation tools into structured data and to obtain cybersecurity intelligence ready for data-driven threat analysis. The collected and unstructured raw data is converted into structured data by our model and standardized into forms that can feed cyber security softwares.

Key words: Open-source intelligence, cyber threat intelligence, test automation, data gathering.

1. Giriş

Açık kaynak istihbaratı (Open Source Intelligence, OSINT) analiz ve değerlendirme gibi bilgi işleme süreçleri aracılığıyla anlamlı istihbarat toplamayı amaçlayan bir süreçtir. Bu süreç, gazete, dergi, sosyal medya siteleri, video paylaşım siteleri, blog ve içerik paylaşım siteleri gibi halka açık bilgileri esas alarak toplanan istihbaratlardan oluşmaktadır. OSINT süreci tarafından oluşturulan istihbaratın iki koşulu sağlaması gerekir. Birincisi, analiz edilen bilgilerin içeriğinin ve kaynağının doğrulanmasıdır. Diğeri ise analiz edilen ve değerlendirilen istihbaratın amacına uygun olarak yararlı ve anlamlı hale getirilmesi gerekliliğidir.

Siber tehdit istihbaratı (Cyber Threat Intelligence, CTI) analiz edilmiş, yapılandırılmış siber tehditler hakkında bilgi için kullanılan bir kavramdır. Kuruluşlar son yıllarda artan siber saldırı tehdidine karşı siber tehdit istihbaratını geliştirebilmek için büyük yatırımlar yapmaya başlamıştır. Bu bilgiler kuruluşlara zarar verebilecek farklı düzeylerdeki mevcut riskleri anlamalarına yardımcı olmak için kullanılmaktadır. Ayrıca bu istihbarat, kuruluşların savunma amaçlı karşı önlemler planlamasına ve kendilerine zarar verebilecek saldırılara karşı korunabilmelerine de yardımcı olabilmektedir. Temelde veri odaklı olan bu süreçte, birçok kuruluş geleneksel olarak güvenlik bilgi ve olay yönetim sistemleri (Security Information and Event Management System, SIEM), günlük dosyaları, ağ saldırı tepit ve önleme sistemleri gibi dahili sistemlerden veri toplayıp analiz ederek ortaya çıkan tehditler ve kilit tehdit aktörleri hakkında tahminler yapmaya çalışmaktadır.

Bir güvenlik sisteminin, altyapıyı doğru ve düzgün bir şekilde izlemek, sürdürmek ve güvenceye almak için zamanında ve ilgili tehdit istihbaratlarını elde etmesi gerekmektedir. Bu durum, güvenlik analistlerini çeşitli bilgi akışlarını toplayarak ve okuyarak tehdit farkındalığı için çalışmaya yönlendirmektedir. Ancak bu süreçlerin manuel olarak yapılması, büyük miktarda veri göz önüne alındığından çok fazla kaynak gerektirmektedir.

Siber güvenlik istihbaratı, siber güvenlikle ilişkili verilerin analiz edilmesi ve değerlendirilmesiyle oluşturulur. Siber güvenlik istihbaratı kullanarak siber tehdide karşı etkin bir güvenlik ve savunma stratejisi oluşturmak mümkündür.

* Sorumlu yazar: anilzgn@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: ^{1,2} 0000-0002-5754-1380, ³ 0000-0003-1016-3439

Siber güvenlik bilgi kaynakları iki grupta incelenebilir. NVD ve US-CERT gibi resmi kaynaklar ve blog, forum, Twitter, Reddit gibi sosyal medya platformları, güvenlik açıkları, tehditler ve saldırılarla ilgili bilgi sağlamaktadır. Günlük olarak çok fazla veri akışı olan bu kaynakların manuel olarak taranması, bilgi çıkarılması ve saldırının gerçekleşebileceği çeşitli senaryoların tasarlanması neredeyse imkansızdır. Açık kaynak istihbaratından elde edilen ilgili bilgilerin otomatik olarak çıkarılması araştırmacıların ilgisini çekmektedir [1] [2].

Kurumlar, şirketler, endüstriyel tesisler siber suç grupları tarafından sıklıkla hedef alınmaktadır. Saldırıların çoğu zaman ana bilgisayara kötü amaçlı yazılım yükleyerek kontrolü ele geçirme üzerine kuruludur. Son yıllarda ise Botnet saldırıları artmıştır. Bu saldırıların büyümesinin arkasındaki nedenin, nesnelere interneti ve endüstriyel nesnelere interneti kullanımındaki artış olarak açıklanabilir.

Ağ trafiğini izleyen, tehditler ve ilgili kuralların eşleşmelerini tespit etmek için paket yüklerini analiz eden, anomali tespiti yapan ve uyarılar üreten saldırı tespit sistemleri (intrusion detection system, IDS) ve önleme sistemleri (intrusion prevention system, IPS) kullanılarak saldırılardan korunulması amaçlanmaktadır.

Siber güvenlik alanında, OSINT aracılığıyla sağlanan bilgiler, geleneksel güvenlik sistemleri, IDS ve IPS gibi izleme araçları aracılığıyla elde edilen verileri birleştirerek sistemlerin güncel kalması sağlanabilir. Siber tehdit istihbaratı genellikle tehdit bilgilerini yapılandırılmış veri biçiminde resmi olarak yayınlayan açık kaynaklardan elde edilebilir. Yapılandırılmış tehdit istihbaratı, XML ya da Json şeması gibi ortak biçim ve yapıya sahip bir modele bağlıdır. Bu nedenle, yapılandırılmış siber tehdit istihbaratı, güvenlik tehditlerini uygun şekilde analiz etmek ve bunlara yanıt verebilmek için güvenlik araçları tarafından kolay ayrıştırılabilir. Siber tehdit istihbaratının resmi kaynaklarına örnek olarak Common Vulnerabilities and Exposures (CVE) veritabanı ve National Vulnerability Database (NVD) verilebilir.

Bu çalışma kapsamında siber tehdit istihbaratlarını Twitter sosyal medya ağından ve çeşitli siber güvenlik sitelerinden otomatik olarak toplayan bir sistem önerilmiştir. Sistem, Selenium gibi çeşitli test otomasyon araçlarını kullanarak yapısal olmayan verilerden yapısal veri oluşturmayı amaçlamaktadır. Bu sayede yapısal hale getirilen veriler IDS, IPS gibi siber güvenlik sistemlerinin beslenebilmesi amacıyla kullanılabilir.

2. Geçmiş Çalışmalar

Siber tehdit istihbaratı siber güvenlik sorunlarını çözmek için makine öğrenmesi ve büyük veri analitiği kullanmaya odaklanmakta ve araştırma topluluklarında yoğun ilgi görmektedir. [3] çalışmasında siber güvenliğin geleceğinin sorun çözmede veriye dayalı bir yaklaşımı benimsemekte yattığı öne sürülmüştür. Bu çalışmada şu konulara yönelik sorunlar ve yaklaşımlar açıklanmıştır: i) saldırı tespiti için veriye dayalı bilim, veri güvenilirliği ve politika esas paylaşımın temelleri ve iii) güvenlik metrikerine risk esaslı bir yaklaşım.

Sosyal medya siteleri açık kaynak istihbaratı için önemli bir kaynak haline gelmiştir. Sosyal medya sitelerine ait veriler, araştırmacılar tarafından doğal afetler [4] [5], terör saldırıları [6], hükümet seçimleri [7], borsa tahmini [8] gibi alanlarda istihbarat toplamak için kullanılmıştır. Bu alanların yanı sıra siber tehditlerle ilgili bilgilerin güvenlik amacıyla kullanılmasına yönelik çalışmalar büyük ilgi görmüştür. Siber tehdit istihbaratını Twitter'dan otomatik olarak toplamak için çeşitli yöntemler kullanılmıştır [9] [10].

Siber güvenlik tehditleriyle ilgili tweet'leri toplamak için geleneksel yöntemlerden biri CVE tanımlayıcısını içeren tweet'leri aramaktır. [11] çalışmasında bu yöntem kullanılarak veriler toplanmış ve gerçek dünyadaki siber exploit için tahminler üretilmiştir. Exploit dedektörleri, modelin kesinliğini arttırmak ve erken istismar uyarıları oluşturmak için toplanan siber tehdit tweet'lerini kullanmıştır. Ancak CVE tanımlayıcısını içermeyen tweet'ler göz ardı edildiğinden, içinde potansiyel exploitlerin bulunduğu tehdit tweet'leri sürece dahil edilememiştir.

Sosyal medya üzerindeki veriler yüksek hacimli verilerdir ve bu nedenle anlamlı bilgi çıkarabilmek için yüksek hacimli, akan verilerin işlenebilmesi gerekmektedir. [12] çalışmasında SONAR adı verilen bir model önerilmiştir. Bu model sayesinde, Twitter akışı üzerinden veri çekebilen, coğrafi olarak konumlandırabilen ve kategorize edebilen bir framework geliştirilmiştir.

Sayıları giderek artan saldırı olaylarıyla başa çıkma çabaları ve siber tehdit istihbaratı bilgilerini ücretsiz olarak dağıtan çeşitli kanalların ortaya çıkması, standart format ve protokolün oluşturulmasıyla sonuçlanmıştır. [13] çalışmasında çeşitli kanallardan toplanan OSINT bilgilerini graph veritabanına yüklerken paylaşılabilen siber tehdit istihbaratının standartlaştırılmış biçime dayalı bir yönetim yapısı ve yöntem önerilmektedir.

Günümüzde siber tehditlerin sayısı sürekli artmakta ve saldırı teknikleri giderek daha gelişmiş ve akıllı hale gelmektedir. Bu durumla ilgili dikkat edilmesi gereken önemli bir husus, bir siber saldırı için aynı IP, domain ve zararlı kodu kullanan benzer siber olaylardaki belirgin artıştır. Bu nedenle benzer siber saldırıları tespit etmek ve anında yanıt vermek için aynı saldırı altyapısının farklı siber saldırılar için yeniden kullanılması nedeniyle meydana gelen siber saldırılar arasındaki ilişkiyi anlamak önemlidir. Siber saldırılar arasındaki ilişkiyi anlamak için siber saldırıların yöntem ve teknikleri ile ilgili verilerin toplanabilmesi gerekmektedir. [14] çalışmasında bu

ihtiyaçlara yönelik siber tehdit istihbaratı toplama sistemi önerilmektedir. Önerilen sistem, saldırı altyapısı verilerini çeşitli açık kaynaklardan toplamaktadır. Önerilen sistem bir sanallaştırma yapısı ve dağıtık işleme teknolojisi kullanmaktadır.

Periyodik olarak güncellenen tehdit bilgisi sağlayan ve çeşitli analitik çözümleri beslemek için kullanılan çok sayıda OSING kaynağı mevcuttur. Bu noktada hem yapılandırılmış hem de yapılandırılmamış kaynaklardan büyük hacimli veri üretilmektedir. [15] çalışmasında yapılandırılmamış siber güvenlik bilgi kaynaklarından yaklaşık %70 hassasiyetle tehdit akışlarını çıkarabilmek için doğal dil işleme kullanılmıştır. Önerilen model, yaygın olarak kabul gören bir endüstri standardı olan STIX standardında kapsamlı tehdit raporları oluşturabilmektedir.

Açık kaynaklı siber tehdit istihbaratı madenciliği, siber güvenlik profesyonelleri için siber tehditleri hızlı bir şekilde anlama ve zamanında öneylici tedbirler alma konusunda önemli bir rol oynamaktadır. [16] çalışmasında açık kaynaklı siber tehdit istihbaratını araştırmak için bir yaklaşım önerilmiştir. Yaklaşım arama motorlarını kullanarak açık kaynaklı veri beslemesi sağlamaktadır. Arama motorlarından elde edilen sonuçlar analiz edilirken, bu durum ikili sınıflandırma problemine indirgenmektedir.

Veri madenciliği teknikleriyle siber tehdit istihbaratı oluşturulmasını sağlayacak bir modelin önerildiği [17] çalışmasında ağ trafiği kayıtları öğrenilen saldırı tiplerine göre sınıflandırılarak siber tehdit istihbaratları standart formatta otomatik olarak üretilmektedir. Sistem, bilinmeyen saldırıların uzman görüşü ile tespit edilmesini sağlayarak eğitim setini yeni saldırı tipleri ile güncelleyebilmektedir. Sistemin başarımlarını doğrulamak için literatürdeki çalışmaların sonuçları ve Weka aracı ile elde edilen doğruluğun önerilen sistemin sonuçları ile benzer olduğu gösterilmiştir.

Bilgi sistemlerini ve kişisel bilgileri siber tehditlere karşı koruyabilmek için [18] çalışmasında dağıtık ve otonom bir sistem inşa ederek Web üzerindeki kaynaklardan veriler toplanmıştır. Önerilen model 3 alt sistemden oluşmaktadır. Web alanı, otonom işbirlikçi Web tarayıcısı ve Crawler. Geliştirilen Crawler için bir sanallaştırma mimarisi kullanılarak kötü niyetli Web sitelerinin algılanabilmesi için dinamik yeniden yapılandırma gerçekleştirilebilmektedir.

Çeşitli açık kaynaklardan alınan verilere dayalı olarak tehdit analizi yapılan [19] çalışmasında geliştirilen analitik motoru için yapılandırılmamış verilerin Regex tabanlı sınıflandırmasına yönelik bir token ayrıştırma tekniği önerilmiştir. Geliştirilen motor açık kaynaklardan zaman serileri halinde verileri tarayıp getirmekte, verileri analiz etmekte ve getirilen parametreye zaman bilgisi de eklenerek kullanıcıya anlamlı bir bilgi sunulabilmektedir. Toplanan ve yapılandırılmamış olarak görünen veriler, motor tarafından yapılandırılmış bir veri olarak görünecek şekilde dönüştürülmekte ve ardından veritabanına eklenmektedir. Analiz motoru tehdit verilerini modelleyerek analiz etmektedir. Ancak buradaki zorluk analiz için kullanışlı yapılandırılmış bir veriye sahip olmaktır.

Açık, sosyal ve karanlık web son yıllarda uygun araçlar ve yöntemler kullanıldığında taranabilecek ve istihbarata dönüştürülebilecek değerli siber güvenlik bilgilerinin zengin kaynakları olarak görülmektedir. [20] çalışmasında bilgi toplama görevine odaklanılmış olup kaynak olarak açık web'deki güvenlik web siteleri, sosyal web'deki güvenlik forumları ve karanlık web'deki hacker forumları/pazarları kullanılmıştır. Önerilen mimari, veri toplama için iki aşamalı bir yaklaşımdan oluşmaktadır. Birinci aşamada veri toplama için makine öğrenmesi tabanlı bir crawler kullanılırken ikinci aşamada toplanan veriler üzerinde istatistiksel dil modelleme teknikleri kullanılmıştır. Önerilen modelde sadece açık kaynaklı araçlar tercih edilmiştir.

Temelde veri odaklı bir süreç olan siber tehdit istihbaratında birçok kuruluş geleneksel olarak günlük kayıtlarından veri toplayıp analiz ederek reaktif istihbarat elde etmektedir. Web'de bulunan siber güvenlik topluluklarının yaptıkları paylaşımlar, kuruluşları daha önce farkında olmadıkları tehditlere karşı uyararak önemli bir proaktif istihbarat değeri sunabilir. Çeşitli platformlar arasında forumlar zengin meta veriler sağlayabilir. [21] çalışmasının amacı saldırganların kullandıkları yöntem ve teknikleri sürekli olarak toplamak için tarama karşıtı önlemleri geçebilecek ve bu yöntemleri önceden tanımlanmış kategorilere göre otomatik olarak sınıflandırmak için derin öğrenme yöntemleri kullanılarak gerçek zamanlı siber tehdit istihbaratını oluşturabilecek bir altyapı sunmaktır.

Siber tehdit ortamı gittikçe daha karmaşık ve polimorfik hale geldikçe, saldırganı ve çalışma şeklini anlamak daha kritik hale gelmektedir. Siber güvenlik topluluğu, savunma bileşenlerini bilgilendirmek için teknik göstergeleri tanımlama ve paylaşma konusunda belirli bir olgunluk geliştirmiş olsa da, tehdit aktörü bağlamı gibi tek tip olmayan, yapılandırılmamış ve belirsiz üst düzey bilgilerle hala mücadele ediyoruz, bu da daha bağlamsal, doğru ve ilgili istihbarat elde etmek için farklı kaynaklarla korelasyon kurma yeteneğimizi sınırlıyor. Siber tehdit istihbaratı üretme ve daha iyi operasyonel hale getirme kabiliyetini arttırmak için bu sınırlamanın üstesinden gelinmesi gerekmektedir. [22] çalışmasında tehdit aktörlerini ve faaliyetlerini karakterize etmek için üzerinde mutabık kalınan kontrollü kelime dağarcıklarının siber tehdit istihbaratını zenginleştirmek ve açıklanabilir, sorgulanabilir daha yüksek bir bağlamsal düzeyde yeni bilgiler çıkarmak için nasıl kullanılabileceğini göstermektedir. Özellikle, tehdit aktörlerinin türlerini kişiliklerine dayalı olarak otomatik olarak çıkarmak, doğalarını

anlamak ve zaman içinde davranış ve özelliklerindeki çok biçimliliği ve değişiklikleri yakalamak için ontolojik bir yaklaşım sunulmuştur. Böyle bir yaklaşım, yüksek düzeyde bağlamsal siber tehdit istihbaratını paylaşmak için yapılandırılmış bir yol ve araç sağlayarak birlikte çalışabilirliği mümkün kılmakla kalmaz, aynı zamanda makine hızında yeni bilgiler üretir ve manuel sınıflandırma yaklaşımlarının gerektirdiği bilişsel önyargıları en aza indirir.

3. Sistem Tasarımı

Bu çalışma, açık kaynak verileri test otomasyon araçlarıyla toplayarak gerçek zamanlı siber güvenlik sistemlerinin tasarlanması ve uygulanmasına yönelik mevcut yöntemleri genişleterek ve geliştirerek mevcut bilgi tabanına katkıda bulunmaktadır. Bu yaklaşım, tehdit aktörleri için tercih edilebilecek bir dizi kaynağa görünürlük sağlamamıza ve sıfır gün güvenlik açıkları dahil olmak üzere siber güvenlik istihbaratını zamanında belirlememize olanak tanımaktadır.

Çalışmamız OSINT kaynakları üzerinden test otomasyon araçları ile siber güvenlik tehdit istihbaratının yapılabilmesi için veri toplamaya odaklanmaktadır. Çalışma kapsamında geliştirdiğimiz framework, yapısal ve yapısal olmayan açık kaynaklardan toplanan verileri siber güvenlik araçlarının beslenmesini sağlayabilecek standart formatlarda çıktı sunmaktadır.

Bu çalışma ile çözülmeye çalışılan problemlerden biri yapısal olmayan veri paylaşımı yapan açık kaynaklardan düzenli bir şekilde verilerin çekilebilmesi ve yapısal hale getirilebilmesidir. Siber güvenlik alanında çok fazla paylaşım yapan kaynak bulunmaktadır bu yüzden yayınlanan verilerin türleri birbirinden farklıdır ve yeni siber saldırı terimleri ortaya çıktıkça bu durum tespitin doğruluğunu etkilemektedir. Çalışmamızda çeşitli siber güvenlik istihbarat kaynakları için şeffaf bir şekilde tarama altyapısı sağlayabilen yeni bir mimari sunulmaktadır. Bu mimari açık kaynak taraması ve düzenli ifade (regular expresion, regex) tabanlı filtrelemenin bir kombinasyonuna başvurularak gerçekleştirilmektedir. Önerilen mimari: toplama (gathering), işleme (processing) ve yayınlama (publishing) olmak üzere 3 temel modülden oluşmaktadır.

Toplama modülünde veriler ham olarak toplanmakta ve bir veritabanında saklanmaktadır. Her bir açık kaynak için geliştirilen servisler sayesinde sosyal medya, blog, siber güvenlik haber siteleri üzerinden veriler toplanmaktadır. Her bir veri kaynağı için tahsis edilmiş servis bulunmaktadır. Bu sayede aynı anda birçok kaynak üzerinden kesintisiz olarak veri akışı gerçekleştirilebilmektedir. Veri toplama modülü ile sadece ham veri toplamaya odaklanılmasının en önemli sebebi büyük hacimli verilerin hızlı ve kayıpsız bir şekilde kaydedilmek istenmesidir. Özellikle sosyal medyadan gelen verilerin hacmi oldukça büyüktür. Bu modül sayesinde açık kaynak verileri hızlı, kayıpsız ve kesintisiz bir şekilde veritabanına aktarılmaktadır. Eş zamanlı olarak veri işleme modülü bu ham verileri çekerek analiz etmekte ve elde edilen çıktıları yapısal verilerin bulunduğu veritabanına aktarmaktadır. Bu sayede farklı kaynaklardan toplanan ve bir standart forma sahip olmayan veriler hem karşılaştırılabilmekte hem de tekrar eden ya da hatalı olabilecek veriler elenmektedir.

Siber güvenlik alanında veri toplanabilecek kaynaklar kimlik doğrulama, kısıtlama ve gizleme gibi tarama karşıtı önlemler kullanabilmektedirler. Bunun yanı sıra başta sosyal medya siteleri olmak üzere birçok kaynak, platformlardaki veriyi uygulama programlama arayüzleri (Application Programming Interface, API) aracılığıyla sunmaktadır. Ancak çoğunlukla ücretli olarak sunulan API aracılığıyla elde edilen verilerde çeşitli filtreler ve kısıtlamalar mevcut olabilmektedir.

Web kazıma (Web Scraping, Web Data Extraction ya da Web Harvesting), web sitelerinden verileri çıkarmak için kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem genellikle web üzerindeki yapılandırılmamış veya büyük verilerin (HTML/XML belgeleri) kullanıcı sorgusuna göre organize bilgilere dönüştürülmesine odaklanır. Web kazıma süreci 2 aşamada incelenebilir:

- i) Web kaynaklarının elde edilmesi
- ii) Elde edilen kaynaklardan ilgili verilerin çıkarılması

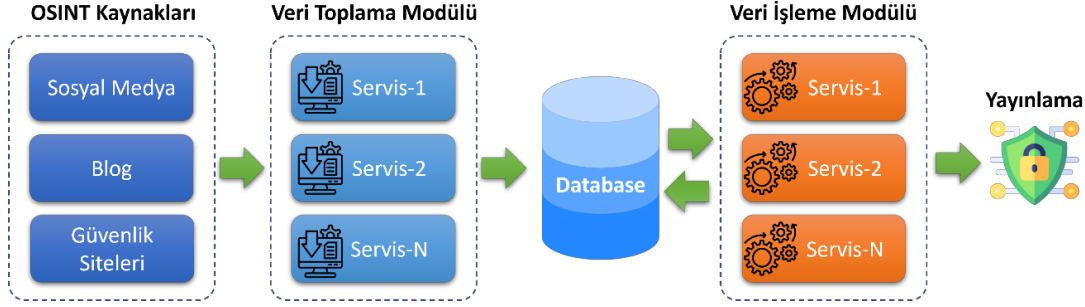
Geleneksel olarak Web kazıma yazılımları HTTP protokolünü yürüterek veya gelişmiş internet tarayıcısını kullanarak bir kullanıcının Web sayfası üzerindeki hareketlerini simüle eder. Web kazıma, bir bot veya Web tarayıcısı kullanarak Web üzerindeki verileri kaydeden ve çoğu Web arama aracında uygulanan kapsayıcı bir yöntem olan web indeksleme süreçlerinde tercih edilmektedir.

Çalışma kapsamında önerdiğimiz modelin ilk modülü hem Web Scraping hem de Web Crawling stratejilerini kullanarak HTML DOM tabanlı mimari aracılığıyla sosyal medya ve siber güvenlik sitelerinden veri çekilmesine dayanmaktadır.

Modelimizin geliştirilmesinde programlama dili olarak Python tercih edilmiş olup, veri toplama için BeautifulSoup 3 ve Selenium kütüphaneleri kullanılarak bir test otomasyonu ortamı hazırlanmıştır. BeautifulSoup, Web sayfasının verilerini HTML veya XML biçiminde getiren bir kütüphanedir. İçinden bulunan bir ayrıştırıcı ile,

DOM yaklaşımına dayalı bir ayrıştırma ağacı oluşturur ve ardından belirli bir etiketi, dizgiyi, öznitelikleri bulmak için farklı filtre işlevleri uygulanabilir. Selenium, test otomasyonları için tercih edilen bir modüldür. Google, Firefox vb. birçok tarayıcıyı desteklemektedir. Web uygulamalarını test etmek için birçok test işlemi sağlayabilmektedir. Selenium doğası gereği dinamik olan web sayfalarını destekleyen bir web sürücüdür, yani sayfanın kendisi yeniden yüklenmeden öğeleri değiştirebilen bir sayfanın o anki öğelerine erişim sağlayabilmektedir. Bu özelliği sayesinde Web tabanlı uygulamalarda test otomasyonu geliştirme amaçlı kullanılan bir üründür.

Test otomasyon ve Web kazıma araçları kullanılarak açık kaynak istihbaratından siber güvenlik istihbaratının çıkarılmasından sorumlu modelimizin çalışma akışı Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Çalışma akışı

4. Sonuç

Siber tehdit istihbaratı, kuruluşların siber tehditleri anlamasına, öngörmesine ve bunlara karşı savunma yapmasına yardımcı olan bilgileri ifade etmektedir. Siber tehdit istihbaratının önemli bir kaynağı internet siteleri ve sosyal medyadır. Test otomasyon araçları, görevleri bir bilgisayarda veya başka bir cihazda otomatik olarak gerçekleştirebilen araçlardır. Bu araçlar, veri madenciliği, web kazıma ve web sayfalarıyla etkileşim dahil olmaz üzere çok çeşitli aktiviteleri otomatikleştirmek için kullanılabilir.

Genellikle, Web sitelerinin büyük bir yüzdesi, sunucularına basit bir http isteği yapıldığında başarılı bir yanıt verir, ancak birçoğunun gerçek bir istek ile bir bot arasında ayırım yapan mekanizmaları vardır. Web kazıma, çeşitli web sitelerinden büyük miktarda veri çıkarmak için kullanılan etkili bir tekniktir. Bu veriler daha sonra herhangi bir dosyada ya da bir veritabanında saklanabilir. Web kazıma, Web sayfasının kodunun çıkarılmasını içermektedir. Modelimiz ile veri çıkarılması aşamasında öntanımlı olarak girilen OSINT kaynakları bulunmaktadır. Bu kaynaklar sosyal medya hesaplarından ve siber güvenlik sitelerinden oluşmaktadır. Bu bilgiler veri toplama modülüne parametre olarak verilmektedir. Modüle gelen adrese, Selenium web sürücüsü aracılığıyla gidilir ve her web sayfasındaki veriler için kazıma işlemi gerçekleştirilir. Kazılan tüm veriler ham olarak, zaman ve kaynak bilgisi ile veritabanına kaydedilir. Tüm bu işlemler her bir OSINT kaynağı için tanımlanan farklı servisler ile eşzamanlı olarak yapılmaktadır.

Veritabanına kaydedilen verilerin yapısal hale getirilebilmesi için çeşitli veri ön işleme teknikleri uygulanmış ve düzenli ifadeler (Regular Expression, regex) ve örüntüler kullanılarak ham verilerin içinde istenilen verilerin olup olmadığı kontrol edilerek bu verinin ayrıştırılması sağlanmaktadır.

Örüntülerin tanımlanmasında uygulama isimleri ve uzantıları, paylaşılan URL ve IP verileri, CVE kodları (Common Vulnerabilities and Exposures), öntanımlı saldırı tekniklerinin ve illegal aktivitelerin isimleri kullanılmaktadır. Bu örüntülere uyan verilerin, ham veriler içinden ayıklanıp yapısal veriler haline getirilerek veritabanına kaydedilmesi sağlanmaktadır. Her bir OSINT kaynağından elde edilen ham verilerin o kaynağa tanımlı olarak bir servis ayağına kalkmaktadır. Bu sayede her bir kaynak için paralel olarak servisler çalışmakta ve eşzamanlı olarak örüntüler yakalanabilmektedir. Veri işleme servisleri ile yapısal hale getirilen verilerin örnek JSON ve XML çıktıları Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4'te gösterilmektedir.

```
{
  "Source": "SocialMedia",
  "SourceDetail": "Twitter",
  "Channel": "MalwareHunterTeam",
  "Type": "Malware",
  "Platform": "Android",
  "FileName": "ChatService_master.apk",
  "Date": "2022-11-22 22:46:06.000"
}
```

Şekil 2. Twitter üzerinden çıkarılan örnek Malware verisinin JSON çıktısı

```
{
  "Source": "SocialMedia",
  "SourceDetail": "Twitter",
  "Channel": "CXSecurity",
  "Type": "Exploit",
  "Title": "ZTE ZXHN-H108NS Authentication Bypass",
  "DetailPage": "https://cxsecurity.com/issue/WLB-2022110035",
  "Date": "2022-11-22 22:46:06.000"
}
```

Şekil 3. Twitter üzerinden çıkarılan örnek Exploit verisinin JSON çıktısı

```
<Data>
  <Source>Website</Source>
  <SourcePage>https://www.exploit-db.com</SourcePage>
  <Type>Exploit</Type>
  <CVE>2022-37661</CVE>
  <ExploitInfo>SmartRG Router SR510n 2.6.13 - Remote Code
    Execution</ExploitInfo>
  <ExploitType>Remote</ExploitType>
  <Platform>Hardware</Platform>
  <Date>2022-11-11 00:00:00.000</Date>
</Data>
```

Şekil 4. Exploit-db üzerinden çıkarılan örnek Exploit verisinin XML çıktısı

Bu çalışmada önerilen model, yapısı ve işlevleri sayesinde açık kaynaklardan yararlanarak bir siber tehdit bilgi toplama sistemi geliştirilmiştir. Önerilen model bünyesinde 24 sosyal medya hesabından ve 3 siber güvenlik sitesinden veriler toplanmıştır. Veriler, mevcut hesapların ve sitelerin geçmiş kayıtları da dahil olmak üzere yaklaşık 100.000 siber saldırıdan toplanmıştır. Tablo 1'de toplama kanalı türleri, etkilenen platform bilgisi ve saldırı tipleri yer almaktadır.

Tablo 1. Siber saldırı öznitelikleri

Siber Saldırı Öznitelikleri	İçerik
Saldırı Tipi	Malware, Ransomware, Exploit, Phishing
Kaynak	Sosyal Medya, Siber Güvenlik Siteleri
Etkilenen Platform	Windows, MacOS, Linux, Unix, Hardware, OpenBSD, Android, iOS, Solaris, FreeBSD

Açık kaynaklardan yapılan taramalar ile siber tehdit odaklı istihbarat toplayabilen ve yapısal veri olarak standart formatlarda yayın yapabilen modelimiz sayesinde hem siber güvenlik araçlarının güncel veriler ile beslenebilmesi hem de siber tehdit modellemesi yapmakla ilgilenen araştırmacıların yararlanabileceği bir platform geliştirilmesi amaçlanmıştır.

5. Gelecek Çalışmalar

Siber tehdit istihbaratı, kuruluşların kendilerini siber saldırılara karşı korumaları ve bu saldırıların potansiyel etkilerini azaltmaları için kritik öneme sahiptir. Bu istihbaratın temel kaynaklarından biri, Twitter ve bloglar gibi sosyal medya platformlarının yanı sıra halka açık diğer çevrimiçi kaynakları içeren açık Web'dir.

Siber tehdit istihbaratı toplamak için test otomasyon araçlarını kullanmanın çeşitli faydaları vardır. Birincisi, normalde manuel olarak yapılması gereken tekrarlayan görevleri otomatikleştirerek zamandan ve kaynaktan tasarruf edebilirler. İkinci olarak, çok çeşitli kaynakları hızlı ve sürekli olarak tarayarak tehdit ortamının daha kapsamlı ve güncel bir görünümünü sağlayabilirler.

Test otomasyon araçları, bu kaynaklardan istihbaratı verimli ve etkili bir şekilde toplamak için kullanılabilir. Kuruluşlar, ilgili kaynakları belirleyerek, bu kaynakları ayıklamak için komut/script dosyaları yazarak ve toplanan verileri analiz ederek, siber güvenlik stratejilerini ve uygulamalarını bilgilendirmek için siber tehdit istihbaratı toplayabilir. Ancak test otomasyon araçlarını kullanarak açık kaynaklardan istihbarat toplamının da bazı kısıtlamaları vardır. Verileri toplamak için kullanılan kaynaklar ve anahtar kelimeler yeterli genişlikte bir istihbarat ağını temsil etmeyebileceğinden toplanan verilerin doğruluğunun teyit edilmesi gerekebilir. Açık kaynaklardan toplanan verilerin güvenilirliği ve doğruluğu değişebileceğinden kuruluşlar topladıkları istihbaratın doğruluğunu arttırmak için adımlar atmalıdır.

Gelecekte test otomasyon araçlarını kullanarak açık kaynaklardan tehdit istihbaratı toplama etkinliğini arttırmak için yeni çalışmalar yapılabilir. Açık kaynakları ayıklamak ve istihbaratı çıkarmak için daha karmaşık algoritmalar ve teknikler geliştirilerek araştırma yapılabilir. Ayrıca toplanan verilerdeki yanlışlığı azaltmanın ve istihbaratın güvenilirliğini ve doğruluğunu artırmanın yolları üzerine araştırma yapılabilir. Siber tehditlere ilişkin daha kapsamlı bir görüş sağlamak üzere test otomasyon araçlarını HUMINT ve SIGINT gibi farklı kaynaklarla entegre ederek yeni çalışmalar yapılabilir.

Teşekkür

Bu çalışma Milli Savunma Üniversitesi, ATASAREN bünyesindeki doktora tezinin bir parçasıdır. Çalışmanın ortaya çıkmasında verdiği destek için Siemens Türkiye'ye teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] F. Neri and P. Geraci, "Mining Textual Data to Boost Information Access in OSINT," in International Conference Information Visualisation, 2009.
- [2] P. Maciolek and G. Dobrowolski, "Cluo: Web-Scale Text Mining System For Open Source Intelligence Purposes," Computer, vol. 14, no. 1, pp. 45-62, 2013.
- [3] B. M. Thuraisingham, M. Kantarcioğlu, K. W. Hamlen and L. Khan, "A Data Driven Approach for the Science of Cyber Security: Challenges and Directions," in International Conference on Information Reuse and Integration (IRI), 2016.
- [4] S. Yamada, K. Utsu and O. Uchida, "An Analysis of Tweets During the 2018 Osaka North Earthquake in Japan -A Brief Report," in International Conference on Information and Communication Technologies for Disaster Management (ICT-DM), 2018.
- [5] B. Shah, V. Agarwal, U. Dubey and S. Correia, "Twitter Analysis for Disaster Management," in International Conference on Computing Communication Control and Automation (ICCUBEA), 2018.
- [6] P. Garg, H. Garg and V. Ranga, "Sentiment analysis of the Uri terror attack using Twitter," in International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA), 2017.
- [7] J. Wang and J. Q. Gan, "Prediction of the 2017 French election based on Twitter data analysis," in Computer Science and Electronic Engineering (CEEC), 2017.
- [8] D. S. A. Fernandes, M. G. C. Fernandes, G. A. Borges and F. A. A. M. N. Soares, "Decision-Making Simulator for Buying and Selling Stock Market Shares Based on Twitter Indicators and Technical Analysis," in International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC), 2019.
- [9] N. Dionísio, F. Alves, P. M. Ferreira and A. N. Bessani, "Cyberthreat Detection from Twitter using Deep Neural Networks," in International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), 2019.

- [10] F. Alves, A. Bettini, P. Ferreira and A. N. Bessani, "Processing tweets for cybersecurity threat awareness," *Information Systems*, vol. 95, 2021.
- [11] C. Sabottke, O. Suciuciu and T. Dumitraş, "Vulnerability disclosure in the age of social media: exploiting twitter for predicting real-world exploits," in *USENIX Conference on Security Symposium*, 2015.
- [12] Q. L. Sceller, E. B. Karbab, M. Debbabi and F. Iqbal, "SONAR: Automatic Detection of Cyber Security Events over the Twitter Stream," in *International Conference on Availability, Reliability and Security*, 2017.
- [13] S. Lee, H. Cho, N. Kim, B. Kim and J. Park, "Managing Cyber Threat Intelligence in a Graph Database: Methods of Analyzing Intrusion Sets, Threat Actors, and Campaigns," in *International Conference on Platform Technology and Service (PlatCon)*, 2018.
- [14] M. Kim, S. Lee, B. Cho, -I. Kim and M. Jun, "Design of a Cyber Threat Information Collection System for Cyber Attack Correlation," in *International Conference on Platform Technology and Service (PlatCon)*, 2018.
- [15] Y. Ghazi, Z. Anwar, R. Mumtaz, S. Saleem and A. Tahir, "A Supervised Machine Learning Based Approach for Automatically Extracting High-Level Threat Intelligence from Unstructured Sources," in *International Conference on Frontiers of Information Technology (FIT)*, 2018.
- [16] P. Zhang, J. Ya, T. Liu and J. Shi, "Mining Open-Source Cyber Threat Intelligence with Distant Supervision from the Web," in *International Conference on Data Science in Cyberspace (DSC)*, 2021.
- [17] S. M. Arıkan and S. Acar, "A Data Mining Based System for Automating Creation of Cyber Threat Intelligence," in *International Symposium on Digital Forensics and Security (ISDFS)*, 2021.
- [18] Y. Kawano and E. Nunohiro, "A Proposal of Distributed Autonomous Cooperative System about Exclusive Web Crawling for Cyber Security," in *International Conference on Network-Based Information Systems (NBIS)*, 2016.
- [19] M. H. Mohd Pakhari, N. Jamil, M. E. Rusli and A. A. Abdul Rahim, "Implementation of Token Parsing Technique for Regex Based Classification of Unstructured Data for Cyber Threat Analysis," in *International Conference on Information Technology and Multimedia (ICIMU)*, 2020.
- [20] P. Koloveas, T. Chantzios, C. Tryfonopoulos and S. Skiadopoulous, "A Crawler Architecture for Harvesting the Clear, Social, and Dark Web for IoT-Related Cyber-Threat Intelligence," in *IEEE World Congress on Services (SERVICES)*, 2019.
- [21] R. Williams, S. Samtani, M. Patton and H. Chen, "Incremental Hacker Forum Exploit Collection and Classification for Proactive Cyber Threat Intelligence: An Exploratory Study," in *IEEE International Conference on Intelligence and Security Informatics (ISI)*, 2018.
- [22] V. Mavroeidis, R. Hohimer, T. Casey and A. Jesang, "Threat Actor Type Inference and Characterization within Cyber Threat Intelligence," *2021 13th International Conference on Cyber Conflict (CyCon)*, 2021, pp. 327-352.

Alkolik ve Normal EEG Sinyallerinin Zaman-Alan Tanımlayıcı Analizi Tabanlı Otomatik Sınıflandırılması

Berna ARI^{1*}

¹ Elektrik-Elektronik Teknolojileri, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elâzığ, Türkiye
^{*1} bernagurler.a@gmail.com

(Geliş/Received: 21/12/2022;

Kabul/Accepted: 07/01/2023)

Öz: Alkolizm, beyin problemlerine ve buna bağlı bilişsel, duygusal ve davranışsal bozukluklara yol açan ciddi bir hastalıktır. Alkolizmi tespit etmek için öne çıkan kaynaklardan biri, Elektroensefalogram (EEG) sinyallerini analiz etmektir. Fakat alkolik EEG sinyallerinin sınıflandırılması, alkolik kişilerin beyin hastalıklarının tanı ve tedavisine yönelik biyomedikal araştırmalarda zorlu bir süreçtir. Bu çalışmada, alkolik EEG sinyallerinden zaman-alan tanımlayıcılarına ve topluluk öğrenmesine dayalı otomatik olarak tanımlayan yeni bir yöntem sunulmaktadır. Önerilen yöntem, tek kanallı EEG sinyallerinin dalgacık paket ayrıştırma ile farklı frekans alt bantlarına ayrılması, zaman-alan tanımlayıcıları ile öznelik çıkarımı ve topluluk torbalama ağaçları ile sınıflandırma aşamalarından oluşmaktadır. Tek kanallı EEG veri seti ile yapılan deneysel çalışmalarda %97,50 başarımla sağlanmıştır. Deneysel sonuçlar önerilen yöntemin, son teknoloji yöntemlere kıyasla daha iyi bir performansa sahip olduğunu göstermektedir. Bu yöntem alkolik bireylerin otomatik tespitinde uzmanlara yardımcı olabilecektir.

Anahtar kelimeler: EEG, dalgacık paket ayrıştırma, zaman-alan tanımlayıcıları, sınıflandırma.

Automatic Classification of Alcoholic and Normal EEG Signals Based on Time-Domain Descriptor Analysis

Abstract: Alcoholism is a serious disease that causes brain problems and related cognitive, emotional, and behavioral disorders. One of the prominent resources for detecting alcoholism is analyzing Electroencephalogram (EEG) signals. However, the classification of alcoholic EEG signals is a challenging process in biomedical research for the diagnosis and treatment of brain diseases in alcoholics. In this study, a new method that automatically identifies alcoholic EEG signals based on time-domain descriptors (TDD) and ensemble learning (EBT) is presented. The proposed method consists of the separation of single-channel EEG signals into different frequency subbands with Wavelet Packet Decomposition (WPD), feature extraction with TDD, and classification with EBT. In experimental studies with a single-channel EEG data set, 97.50% success was achieved. Experimental results show that the proposed method has a better performance compared to the state-of-the-art methods. This method can help experts in the automatic detection of alcoholic individuals.

Key words: EEG, wavelet packet decomposition, time-domain descriptors, classification

1. Giriş

Alkolizm, obsesif-kompulsif (sürekli tekrar eden düşüncelere sahip olunması ve bu düşüncelerinin kişinin kendisini rahatsız etmesi) bozukluğa benzer şekilde, içmeye bağımlı olunan fiziksel bir hastalıktır [1,2]. Alkol bağımlısı hastalarda yaygın görülen olumsuz etkiler; ülser, özofagus kanaması, mide kanseri, akut ve kronik pankreas iltihabı gibi sindirim sistemi hastalıkları ve zihinsel engellilik, Alzheimer, inme gibi sinir sistemi bozukluklarıdır [3]. Ayrıca aşırı alkol tüketiminin yüksek tansiyona ve gut hastalığına neden olabileceği belirtilmektedir [2]. Dünya Sağlık Örgütü'nün (WHO) 2018 yılında yayımlanan birinci basamak sağlık hizmetlerinde kardiyovasküler raporuna göre alkolizm, hastalıklara neden olması bakımından üçüncü en yüksek risk faktörü olarak kabul edilmektedir [4]. Yine aynı rapora göre her yıl yaklaşık 3,3 milyon ölümün aşırı alkol tüketiminden kaynaklandığını ve bunun dünyadaki genel ölümlerin yaklaşık %5,9'unu oluşturduğunu belirtilmektedir [5].

Alkolizmin erken teşhisi; bireylerin durumlarını anlamalarına, sakatlık gibi kalıcı hasarların ve ölüm gibi hayati sonuçların önlenmesine yardımcı olabilir [6]. Geleneksel alkolizm tespiti anketlere, nefes testlerine ve kan testlerinin yanı sıra fizyolojik incelemelere dayanmaktadır [2]. Fakat bu geleneksel tespit yöntemleri, her birinin ayrı sınırlıklarının olması nedeni ile pek tercih edilmezler [5]. Bu nedenle araştırmacılar ve uzmanlar alkolizm, epilepsi, Alzheimer gibi karmaşık beyin bozukluklarını kapsayan hastalıkların tespitinde beynin çeşitli fizyolojik

* Sorumlu yazar: bernagurler.a@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0003-1000-2619

ve patolojik aktivitelerin elektriksel resmini temsil eden elektroensefalografi (EEG) verilerini daha çok tercih etmektedirler [7]. Çünkü EEG verilerinin elde edilmesi düşük maliyetli, sistemin taşınabilir olması, cerrahi işlem gerektirmemesi, yüksek zamansal çözünürlük sağlaması ve beyin modellerini analiz etmek için etkili bir yaklaşımdır.

EEG sinyallerinden alkolizmin erken tespiti için literatürde birçok yöntem önerilmiştir. Bu yöntemler; zaman ve frekans alanlarında doğrusal ve doğrusal olmayan özellik tabanlı yöntemler, sinyal ayrışımına dayalı yöntemler ve bunların yanı sıra makine öğrenmesi ve derin öğrenme tabanlı yaklaşımları kapsamaktadır. İlk çalışmalar genellikle sinyal ayrışımına dayalı gerçekleştirilmiştir. Gökşen ve diğerleri [8], alkolizm sınıflandırmak için zaman alanı korelasyonunun karşılıklı bilgisi ile ölçülen fonksiyonel bağlantıyı vurgulamış ve %82,3 doğruluk elde etmiştir. Mümtaz ve diğerleri [9], EEG sinyallerinden alkolizmi tespit etmek için frekans alanının güç tutarlılığı fonksiyonel bağlantısını önererek ve %89,3 doğrulukta alkolizm tespiti yapmışlardır.

Sonrasında makine öğrenmesi yöntemleri, sınıflandırma çalışmalarında yaygın olarak tercih edilmiştir. Geleneksel istatistiksel sınıflandırma yöntemleriyle karşılaştırıldığında, makine öğrenimi yöntemleri daha doğru sınıflandırma sonuçları sağlayabildiği görülmüştür. Bajaj ve ark. [10], alkollü ve kontrol grubu EEG sinyallerini otomatik olarak sınıflandırmak için zaman-frekans görüntüleri, doku görüntüsü öznelik çıkarımı ve negatif olmayan en küçük kareler sınıflandırıcı (NNLS) temelli yeni bir hibrit yöntem geliştirdiler. Zaman-Frekans (Z-F) analizinde, kısa süreli Fourier dönüşümünün spektrogramı dikkate alarak Z-F görüntüleri elde ettiler. Elde edilen Z-F görüntüleri daha sonra 8 bitlik gri tonlamalı görüntülere dönüştürülerek yönlendirilmiş gradyanların (CoHOG) ve Eig(Hess)-CoHOG özelliklerinin histogramlarını çıkardılar. Son olarak, elde edilen özellikleri alkollü ve kontrol grubunun EEG sinyallerini NNLS sınıflandırıcısına uygulayarak sınıflandırdılar. Deneysel çalışmalarda %95,83 doğruluk oranına ulaşılar. Feyyaz ve ark. [11], kullanılan Destek Vektör Makinesi (Support Vector Machine-DVM) ve tepe (peak) görselleştirme yöntemiyle Uzun Kısa Süreli Bellek (Long-Short Time Memory-LSTM) modelinde %90,97 sonucuna ulaşılar. Agarwal ve Zubair [12] alkolik denekleri saptamak için, kayan tekil spektrumu analizi, bağımsız bileşen analizi ve XGBoost sınıflandırıcı kombinasyonundan oluşan bir yöntemi referans aldılar ve yapılan deneyle %98,97'lik bir doğruluk elde ettiler. Patidar ve ark. [13], EEG sinyallerinden gelen özneliklere dayanan ayarlanabilir Q dalgacık dönüşümü (Tunable Q-Factor Wavelet Transform-TQWT) ve en küçük kareler SVM yöntemlerinin kombinasyonunu kullanarak alkolizmin tespitinde yeni bir yaklaşım önerdiler. Yapılan deneysel çalışmalarda, %97,02 doğrulukta alkolizmi tespitini gerçekleştirdiler.

Son olarak manuel özellik çıkarımı yerine otomatik özellik çıkarımını içeren derin öğrenme yöntemleri kapsamında bazı çalışmalar yapılmıştır. Shen vd. [2] alkolik EEG sinyallerinden tüm beyin bağlantı analizi ve derin öğrenme yöntemleri aracılığıyla sınıflandırılmasına odaklandılar. EEG sinyalinden seçilen her frekans bandında Z-F alanı bilgisini çıkarmak için sürekli Dalgacık dönüşümü uygulandıktan sonra 2B ve 3B evrişimli sinir ağıları (Convolution Neural Networks-CNN), alkolik denekler ve sağlık kontrolü deneklerini sınıflandırdılar. UCI Alkollü EEG veri seti ile önerilen yöntemi test ederek, %96,25 doğrulukla sınıflandırma gerçekleştirdiler. Farsi ve vd. [14], derin öğrenme yöntemlerinin LSTM algoritmasının EEG alkolizm sinyalini doğrudan sınıflandırabildiğini ve deneysel çalışmalarda %93'lük doğruluk oranına ulaştıklarını belirtmektedirler.

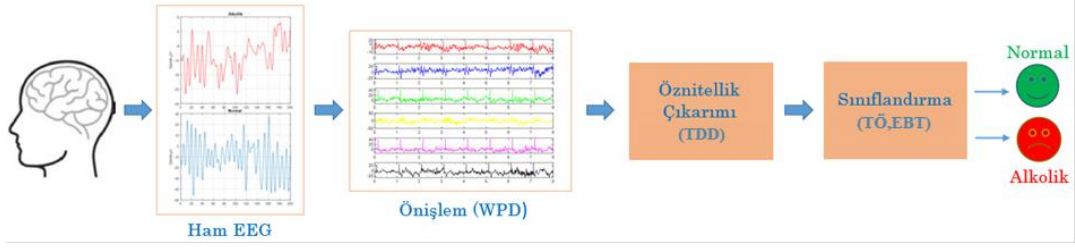
Bu çalışmada alkolizmin tespiti Zaman Alan Tanımlayıcı (Time-Domain Descriptors-TDD) ve Topluluk Torbalama Ağaçları (Ensemble Bagged Tree-EBT) öğrenmesi temelli bir model önerilmiştir. Bu modelde tek kanallı EEG sinyalleri Dalgacık Paket Ayrıştırması (Wavelet Packet Decomposition-WPD) yöntemini kullanarak EEG sinyalleri frekans alt bantlarına ayırdıktan sonra öznelik çıkarımında TDD uygulanmıştır. Elde edilen öznelikler alkolizmin tespiti için EBT sınıflandırıcıya uygulanmıştır. Çalışmanın literatüre katkıları şunlardır;

- Alkollü EEG sinyallerinin otomatik olarak tanımlanması için yeni bir model önerildi.
- WPD ile tek kanallı EEG sinyalleri frekans alt bantlarına ayrılarak sınıflandırma performansını arttıracak daha fazla öznelik elde edilmesi sağlandı.
- Mevcut çalışmalara kıyasla daha yüksek başarımlar sağlanması uzmanlara karar vermede destek sağlayacaktır.

2. Materyal ve Metodoloji

Bu çalışmada alkolik ve normal olarak etiketlenen iki sınıflı EEG sinyallerini sınıflandırmak için zaman-alan tanımlayıcılarına dayalı bir model önerilmektedir. Önerilen yöntem; ön işlem, öznelik çıkarımı ve bu özneliklerin sınıflandırılması olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak, ön işlem aşamasında WPD ile tek kanallı EEG sinyalleri dört farklı frekans alt bantlarına ayrıldı. Ardından tüm bu sinyallerden TDD yöntemi ile öznelik çıkarımı yapıldı. Son aşamada ise öznelikler alkolizmin tespiti için EBT sınıflandırıcıya

gönderilmiştir. Öznitelik çıkarımı ve sınıflandırıcı parametrelerinin belirlenmesi için kapsamlı deneysel çalışmalar yapılmıştır. Önerilen yöntemin genel yapısı Şekil 1’de verilmiştir.

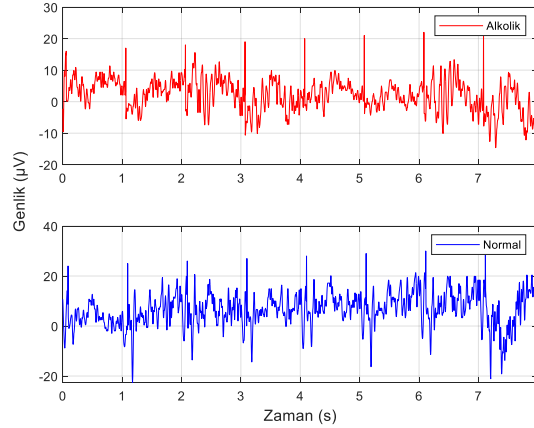


Şekil 1. Önerilen yöntemin genel yapısı.

2.1. Veri seti

Bu çalışmada, California Üniversitesi, Irvine (UCI) tarafından sağlanan açık veri seti kullanılmıştır [15]. Veri seti, EEG sinyalleri ile alkolizme genetik yatkınlık arasındaki ilişkiyi araştırmak için oluşturulmuştur. Veri seti, Amerikan Elektroensefalografi Derneği, 1990 Standart Elektrot Konum Adlandırmasına uygun olarak elde edilen 122 normal ve alkolik hastanın EEG kayıtlarını içermektedir. Bu deneklerin her biri, sırasıyla [16]’de açıklanan görüntülerden seçilen nesnelere 90 görüntüsünden oluşan farklı uyaranlar için 120 denemeye tabi tutulmuştur.

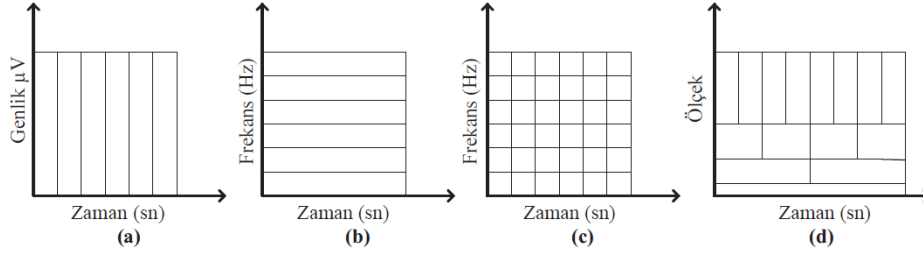
EEG sinyalleri, 61 elektrotlu başlık (Electrocap International, ECI) ile 32 saniye süreyle kaydedilmiş olup 256 Hz ve 12 bit çözünürlükte örneklendirilmiştir. Veri setinin hazırlanmasında, istenmeyen göz ve vücut hareketlerini içeren EEG sinyalleri hariç tutulmuş ve her normal ve alkolik sınıf için 30 kayıt dikkate alınmıştır. Bu çalışma, her normal ve alkolik sınıftan 120 EEG sinyali kullanmaktadır. Bu EEG sinyallerinin her biri 8 saniye süre ile kaydedilmiş ve 2048 örnek içermektedir. Şekil 1’de, sırasıyla alkolik ve normal EEG sinyallerinin örnekleri görülmektedir.



Şekil 2. Veri setinde sınıflara ait EEG sinyalleri.

2.2. Dalgacık dönüşümü

Dalgacık dönüşümü (Wavelet Transform-WT), Mallat [17] tarafından geliştirilen çok çözünürlüklü bir analiz yöntemidir. Fourier Dönüşümü (Fourier Transform-FT) gibi diğer klasik yöntemler bir sinyali yalnızca frekans alanında analiz ederken, WT’nin sinyali hem zaman hem de frekans alanında açıklayan üstün yönleri vardır. EEG sinyalleri, beyin aktiviteleri sırasında üretilen elektriksel bir işarettir. Bu sinyaller aynı zamanda durağan olmayan ve zamanla değişen kayıtlardır. Bu nedenle WT, EEG analizi için önemli bir yaklaşımdır [18]. WT, bir sinyalin düşük ve yüksek frekanslı bileşenleri için üstün zaman çözünürlüğü sunar ve bu nedenle, kısa süreli FT (Short Time Fourier Transform-STFT) gibi sabit bir zaman-frekans probleminin üstesinden gelebilmektedir. Zaman-frekans düzleminin genel bir çerçevesi Şekil 3’te gösterilmektedir.



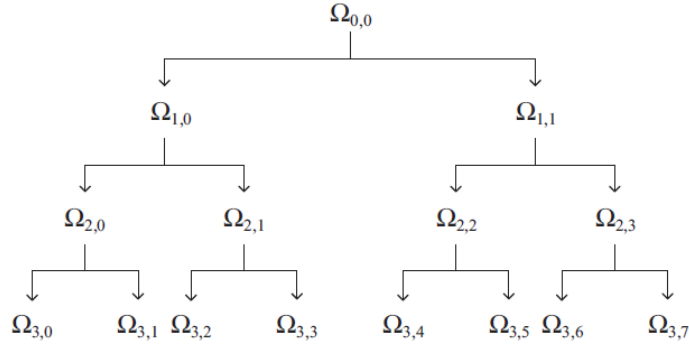
Şekil 3. (a) Pencereyi zaman-genlik düzlemi, (b) pencereyi Fourier dönüşümü frekans-genlik spektrumu, (c) STFT ile frekans-zaman düzlemi ve (d) WT ile pencereyi teknik [18].

WT'nin en önemli özelliği, farklı ayırıştırma seviyelerine bağlı olarak pencere genişliğinin değişmesidir. Böyle bir dalgacık analizinde ölçekleme fonksiyonu ve ana dalgacık dikkate alınması gereken en önemli fonksiyonlardır. Bir ana dalgacık $\psi(t)$ sıfır ortalamalı bir fonksiyondur ve aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (1)$$

WPT, bir sinyalin daha yüksek frekans alanlarını analiz etmek ve daha yüksek ayırıştırma elde etmek için özel yeteneklere sahip kullanışlı bir araçtır. Dolayısıyla bu araç, sinyal işleme için WT'den daha uygun ve etkilidir.

WPT'yi anlamak için alt uzay ağacını dikkate almak gerekir. Ağaçta, düğümleri adlandırmak için $\Omega_{j,k}$ gösterimi kullanılır [19,21]. Burada j , skalayı ve k mevcut skalaya bağlı alt bantları göstermektedir. $\Omega_{0,0}$ kök düğüm ve EEG sinyalimizi temsil etmektedir. Şekil 4'de örnek bir WPT ağacı görülmektedir.



Şekil 4. WPD ağacının gösterimi.

Kök ağacında ilk olarak kök düğümünden, yaklaşım uzayına $\Omega_{j,k} \rightarrow \Omega_{j+1,2k}$ ve detay uzayına $\Omega_{j,k} \rightarrow \Omega_{j+1,2k+1}$ ayırır. Bu işlemler, $\Omega_{j,k}$ 'nin $\{\phi_j(t - 2^{j+1}k)\}_{k \in \mathbb{Z}}$ yeni ortogonal tabanlara $\Omega_{j+1,2k}$ 'nin $\{\phi_{j+1}(t - 2^{j+1}k)\}_{k \in \mathbb{Z}}$ ve $\Omega_{j+1,2k+1}$ 'nin $\{\psi_{j+1}(t - 2^{j+1}k)\}_{k \in \mathbb{Z}}$ 'ye ayırarak uygulanır. Burada $\phi_{j,k}(t)$ ölçek fonksiyonları olup $\Psi_{j,k}(t)$ [19,21] tarafından verilen dalgacık fonksiyonlarını temsil etmektedir.

$$\phi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{|2^j|}} \phi\left(\frac{t - 2^j k}{2^j}\right) \quad (2)$$

$$\psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{|2^j|}} \psi\left(\frac{t - 2^j k}{2^j}\right) \quad (3)$$

Denklem 2 ve 3'teki 2^j , ölçekleme derecesini ölçen genişleme parametresi ve $2^j k$ dalgacığın zaman konumunu belirleyen öteleme parametresini tanımlamaktadır.

2.3. Zaman alan tanımlayıcıları

TDD, aslında EMG sinyallerinin sınıflandırılması amacıyla geliştirilen bir yöntemdir [22]. Bununla birlikte EEG sinyalleri de EMG sinyalleri gibi insan vücudunun belirli bölgelerindeki aktiviteler sonucu oluşan elektriksel işaretler olması bakımında benzerlikler göstermektedir [23]. TDD, detayları aşağıda verilen ve f_1, f_2, \dots, f_6 şeklinde tanımlanan altı ana özellikten oluşmaktadır [24].

- a) Kök Kare Sıfır Mertebe Momenti; bu özellik frekans alanındaki toplam gücü gösterir ve aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\bar{m}_0 = \sqrt{\sum_{j=0}^{N-1} x[j]^2} \quad (4)$$

burada $x[i]$, f_s örnekleme ile örneklenmiş ve $j = 1, 2, \dots, N$ uzunluğunda EEG sinyalini göstermektedir.

- b) Kök Kare İkinci ve Dördüncü Mertebe Momentler: ayrıık Fourier dönüşümü kullanılarak elde edilen $X[k]$ sinyali referans alınarak ikinci ve dördüncü derece momentler aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\bar{m}_2 = \sqrt{\sum_{j=0}^{N-1} k^2 P[k]} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} (kX[k])^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} (\Delta x[i])^2} \quad (5)$$

$$\bar{m}_4 = \sqrt{\sum_{j=0}^{N-1} k^4 P[k]} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} (\Delta^2 x[i])^2} \quad (6)$$

burada $kX[k]$ frekans fonksiyonuna karşılık gelen $k^2 P[k]$ notasyonu ile gösterilen, değişken spektrumlu bir güç olarak tanımlanmaktadır [25]. Ayrıca, zaman fonksiyonunun birinci türevi k ile çarpılan bir frekans fonksiyonunun zaman eşdeğeri olarak m_0, m_2 ve m_4 momentleri aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$m_0 = \frac{\bar{m}_0^\lambda}{\lambda}, m_4 = \frac{\bar{m}_4^\lambda}{\lambda}, m_8 = \frac{\bar{m}_8^\lambda}{\lambda} \quad (7)$$

Böylece ilk üç özelliği Denklem 7'yi referans alarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$f_1 = \log(m_0), f_2 = \log(m_0 - m_2), f_3 = \log(m_0 - m_4) \quad (8)$$

- c) Seyreklik (SP): bu özellik bir vektörün ne kadar enerjisinin yalnızca birkaç bileşene sıkıştırıldığını ölçer ve aşağıdaki tanımlanabilir.

$$f_4 = \log \left(\frac{m_0}{\sqrt{m_0 - m_2} - \sqrt{m_0 - m_4}} \right) \quad (9)$$

- d) Düzensizlik faktörü (irregularity faktör-IF): tepe sayısına bölünen yukarı doğru sıfır geçiş sayısının oranını temsil eden bir ölçüdür. Bu özellik aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$f_5 = \log \left(\frac{ZC}{NP} \right) = \log \left(\frac{\sqrt{\frac{m_4}{m_0}}}{\sqrt{\frac{m_8}{m_4}}} \right) = \log \left(\frac{m_4}{\sqrt{m_0 m_8}} \right) \quad (10)$$

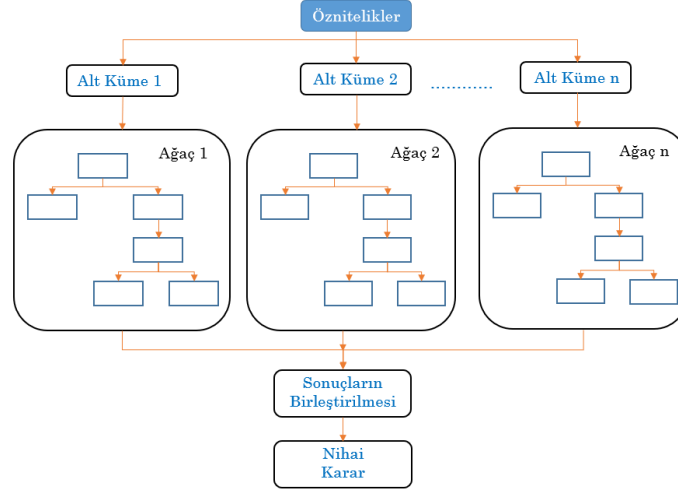
burada ZC sıfır geçişlerini ve NP ise tepe noktalarının sayısını tanımlamaktadır.

- e) Dalga boyu oranı (wavelength ratio-WL): Birinci türevin dalga biçimi uzunluğunun ikinci türevin dalga biçimi uzunluğuna oranı olarak tanımlarız. Bu özellik aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$f_6 = \log \left(\frac{\sum_{j=0}^{N-1} |\Delta^2 x|}{\sum_{j=0}^{N-1} |\Delta^4 x|} \right) \quad (11)$$

2.4. Topluluk Torbalama Ağaçları

Topluluk Öğrenimi (TÖ), denetimli öğrenmeye dayalı bir makine öğrenimi tekniğidir [26]. Topluluk öğrenim sistemleri, herhangi bir sorunun birkaç uzmanın görüşü aranarak ve uygulanarak kolayca çözülebileceğini düşünen insan davranışından ilham almıştır. Bu farklı görüşler doğrultusunda karar verilir. Topluluk öğrenim sistemleri, tek bir sınıflandırıcı kullanmaya kıyasla daha iyi performans sağlar. Topluluk öğrenme tekniği tipik olarak iki alt kategoriye ayrılır. İlki torbalama olarak bilinir ve Breiman [27] tarafından geliştirilmiştir, ikincisi artırma olarak bilinir ve Freund ve Schapire tarafından önerilmiştir [28]. Bunlar arasında torbalama, en verimli ve yüksek doğruluğa sahip topluluk algoritmasıdır [29]. EBT’de “torbalama”, eğitim veri kümelerinin sürekli olarak rastgele örnekler çekerek değiştirildiği ön yükleme toplaması anlamına gelir. Karar ağaçları (Decision Tree-DT), eğitim modeline duyarlı oldukları için zayıf öğrenenler kategorisine aittir ve bu nedenle, bireysel bir karar ağacı normalde belirli eğitim modeline aşırı uyum sağlar [30]. Torbalı DT, karar ağaçlarının performansını iyileştirmek için kullanılabilir, çünkü kararlarının çoğunluğunu alarak birçok bireysel karar ağacının sonuçlarını toplar, sonuç olarak aşırı uyum sorununu çözer ve bireysel karar ağaçlarının performansını iyileştirir. Torbalama eğitim aşamaları Şekil 5’de görülmektedir. Şekil 5’de görüldüğü üzere öznelik veri setini n sayıda öznelik veri setine rastgele bir kombinasyonunun üretilmesiyle başlar. Bu, orijinal öznelik veri setinin bu alt kümeleri üzerinde farklı sınıflandırıcıların eğitimi gerçekleşir. Sonunda, bireysel modellerin çoğunluk oylarına dayalı olarak bir model geliştirilir. Daha sonra nihai modelin kararına dayalı olarak bir tahmin yapılır [31]. Belirli bir veri kümesinde, önyüklemeli alt örnekler belirlenir. Önyükleme uygulanan her örnekte bir DT oluşturulur. Her DT’nin sonucu, en güçlü ve en doğru sonuçları elde etmek için toplanır.



Şekil 5. Torbalama eğitim aşamaları [31].

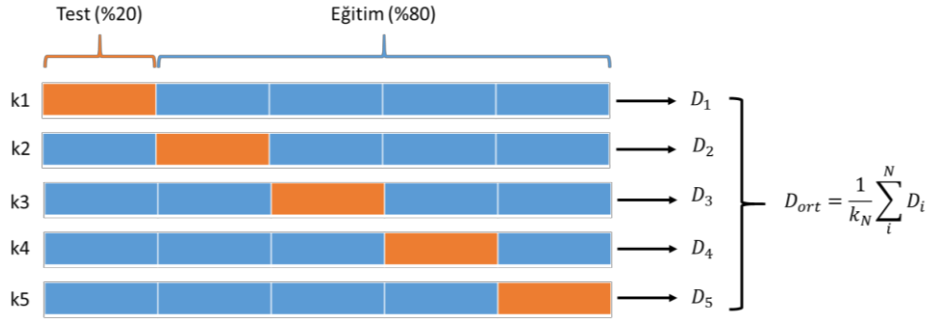
2.5. Performans değerlendirme kriterleri

Genellikle sınıflandırma modellerinde, önerilen sınıflandırıcı başarısının ölçülmesi sınıflandırıcı tarafından tahmin edilen sınıf değerleri ile gerçek sınıf değeri arasındaki ilişkilere göre belirlenir. Bunun için karmaşıklık

matrislerinden faydalanılmıştır. Önerilen yöntemin sonuçlarını analiz etmek için doğruluk, duyarlılık, özgüllük, kesinlik ve F1-skor parametreleri kullanılmıştır [32].

3. Deneysel Çalışma ve Sonuçlar

Deneysel çalışmalar, MATLAB kullanılarak, 32 GB RAM, NVIDIA P2200 Quadro GPU ve Intel Xeon Silver 3.3 GHz işlemciye sahip bilgisayarda gerçekleştirildi. Deney düzeneğinin ilk aşamasında tek kanallı her biri 1×2048 boyutundaki alkolik ve normal EEG sinyalleri WPD ile dört farklı frekans alt bantlarına ayrılarak 4×512 boyutunda EEG sinyalleri elde edilir. Elde edilen bu EEG sinyallerinden öznelik çıkarımı için zaman alan tanımlayıcıya uygulanır. TDD her bir alt bant için 4×6 boyutunda veri ve 1×2048 boyutundaki bir EEG sinyali için 4×24 boyutunda bir öznelik matrisi form edilir. Bu matris düzeltme işlemi ile 1×96 boyutunda öznelik vektörüne dönüştürülür. Bu işlem sonucunda toplamda bütün veri seti için 240×96 boyutunda öznelik matrisi elde edilir. Alkolizmin tespiti için öznelikler matrisi EBT sınıflandırıcıya girdi olarak uygulanır. Önerilen EBT sınıflandırıcıyı test etmek için yüksek düzeyde güvenilirliğe sahip olan 5-katlı çapraz doğrulama yöntemi kullanılmıştır [33]. Şekil 6'da 5-kat çapraz doğrulama yönteminin genel prensibi gösterilmektedir.



Şekil 6. 5 kat çapraz doğrulama modeli.

Şekil 6'de görüldüğü üzere D_i , ($i=1, 2, \dots, 5$) her bir kat için sistem performansını temsil etmekte ve D_{ort} genel performansı temsil etmektedir.

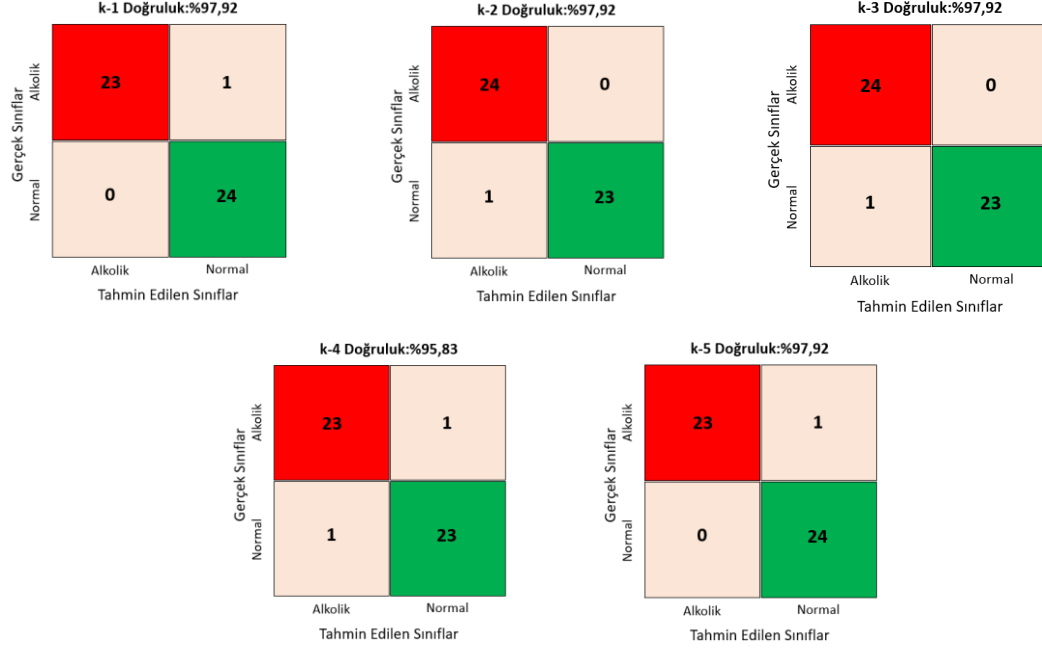
Veri seti ile yapılan deneysel çalışmaların her bir k-kat için sınıflandırma performansları, doğruluk, duyarlılık, özgüllük, kesinlik ve F1 skor sonuçları Tablo 1'de detaylı olarak verilmiştir.

Tablo 1. EBT sınıflandırıcının her katman için sınıflandırma performansı (%)

k-Kat	Doğruluk	Duyarlılık	Özgüllük	Keskinlik	F1 Skor
k-1	97,92	95,83	100,00	100,00	97,87
k-2	97,92	100,00	96,00	95,83	97,96
k-3	97,92	100,00	96,00	95,83	97,96
k-4	95,83	95,83	95,83	95,83	95,83
k-5	97,92	95,83	100,00	100,00	97,87
Genel Ortalama	97,50	97,49	97,56	97,49	97,49

Tablo 1'deki sonuçlarda görüldüğü üzere en yüksek doğruluk oranına k-1, k-2, k-3 ve k-5 katlı doğrulamalarda ulaşılmıştır. Ayrıca diğer performans değerlendirme ölçütleri olan duyarlılıkta k-2, k-3, özgüllük, kesinlik ve F1-skorda k-1, k-5 katlı doğrulamalarda sırasıyla %100, %100 ve %97,87 başarı oranına ulaşılmıştır. Tüm katmanların genel ortalamasında, %97,50 doğrulukta EEG sinyalleri alkolik ve normal olarak sınıflandırılmıştır. Genel ortalama %97,56 özgüllük dikkat çekmektedir.

Önerilen yöntemin genel başarımlarını değerlendirmesi ile birlikte veri setindeki her bir sınıfa ait daha ayrıntılı performans analizi önerilen yöntemin performans başarımları görebilmek için karmaşıklık matrisleri kullanılmaktadır. Şekil 7’de her bir katmana ait karmaşıklık matrisleri verilmiştir.



Şekil 7. Her k-kat'a ait karmaşıklık matrisleri.

Şekil 7’de EBT sınıflandırıcının katmanlara göre sınıflandırma performanslarına ait karmaşıklık matrislerinde görüldüğü gibi k-1 ve k-5 katlı doğrulamalarda test veri setindeki 24 normal sınıf etkili verinin tamamı doğru olarak tahmin edilmiştir. Aynı şekilde k-2 ve k-3 doğrulamalarında test veri setindeki 24 alkolik sınıf etkili verinin tamamı doğru olarak tahmin edilmiştir.

Önerilen yöntemin daha detaylı performans değerlendirmesi için, aynı veri setlerinin kullanıldığı bazı son teknolojik yöntemlerin performans karşılaştırmaları Tablo 2’de verilmiştir. Tablo 2’deki çalışmalar, doğrusal ve

Tablo 2. Bazı yöntemlerin performans karşılaştırmaları.

Yazar	Model	Doğruluk (%)
Ekaputri vd. (2020) [34]	DVM	77,80
Goksen vd. (2017) [7]	Karşılıklı bilgi işlevsel bağlantı+K-NN	82,33
Malar vd. (2020) [35]	WPT+Aşırı Öğrenme Makinesi	87,60
Khan vd. (2021) [6]	CNN	87,85±4,64
Mumtaz vd. (2017) [8]	Tutarlılık işlevsel bağlantı+Lojistik regresyon	89,30
Kannathal vd. (2005) [36]	En büyük Lyapunov üssü	90,00
Kumari vd. (2022) [37]	CNN	92,70
Farsi vd. (2020) [13]	LSTM	93,00
Bajaj vd. (2017) [9]	Yönlendirilmiş gradyanların histogramları+NNLS	95,83
Shen vd. (2023) [2]	CNN	96,25±3,11
Önerilen Yöntem	WPT+TDD+EBT	97,50

doğrusal olmayan özellik tabanlı yöntemler, sinyal ayrışımına dayalı yöntemler, makine öğrenmesi ve derin öğrenme tabanlı yaklaşımları içermektedir. Önerilen yöntemin mevcut diğer yöntemlerden daha iyi doğruluk performansına sahip olduğu görülebilmektedir. Tablo 2'deki çalışmalara ait sınıflandırma sonuçlarında en yüksek sınıflandırma doğruluğu elde edilmesi önerilen yöntemin başarısını göstermektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, EEG sinyallerinden alkolikleri otomatik olarak belirlemek için WPT yaklaşımı ile tek kanallı EEG sinyalleri frekans alt bantlarına ayrıştırılır. Ardından alt bantlara ayrılan EEG sinyalleri TDD kullanılarak zaman-alan tanımlayıcıları belirlenir ve bu tanımlayıcılar öznitelik olarak kullanılmaktadır. Son olarak alkolik ve normal EEG verilerini içeren sinyallerine ait öznitelikler topluluk öğrenim sınıflandırıcısına girdi olarak uygulanarak sınıflandırılmaktadır. Deneysel çalışmalarda tek kanallı EEG verileri kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda %97,50 doğruluk oranına ulaşılmış olması önerilen yöntemin etkinliğini göstermektedir. Ayrıca önerilen çalışmaya ait deneysel sonuçlar son teknolojik çalışmalar ile karşılaştırıldı. Gelecekte önerilen yöntem alan uzmanların daha iyi tedavi için beynin fizyolojik durumlarını belirlemesine yardımcı olabilmek için farklı EEG veri setlerinde test edilecektir.

Kaynaklar

- [1] Oscar-Berman, M., & Marinković, K. (2007). Alcohol: effects on neurobehavioral functions and the brain. *Neuropsychology review*, 17(3), 239-257.
- [2] Shen, M., Wen, P., Song, B., & Li, Y. (2023). Detection of alcoholic EEG signals based on whole brain connectivity and convolution neural networks. *Biomedical Signal Processing and Control*, 79, 104242.
- [3] Das, D., Zhou, S., & Lee, J. D. (2012). Differentiating alcohol-induced driving behavior using steering wheel signals. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(3), 1355-1368.
- [4] World Health Organization. (2018). What Quantitative and Qualitative Methods Have Been Developed to Measure Community Empowerment at a National Level? (Vol. 59). World Health Organization.
- [5] Sadiq, M. T., Akbari, H., Siuly, S., Li, Y., & Wen, P. (2022). Alcoholic EEG signals recognition based on phase space dynamic and geometrical features. *Chaos, Solitons & Fractals*, 158, 112036.
- [6] Khan, D. M., Yahya, N., Kamel, N., & Faye, I. (2021). Effective connectivity in default mode network for alcoholism diagnosis. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 29, 796-808.
- [7] Demir, F., Sengur, A., Ari, A., Siddique, K., & Alswaiti, M. (2021). Feature Mapping and Deep Long Short Term Memory Network-Based Efficient Approach for Parkinson's Disease Diagnosis. *IEEE Access*, 9, 149456-149464.
- [8] Gökşen, N., & Arıca, S. (2017). A simple approach to detect alcoholics using electroencephalographic signals. In *EMBECE & NBC 2017* (pp. 1101-1104). Springer, Singapore.
- [9] Mumtaz, W., Vuong, P. L., Xia, L., Malik, A. S., & Rashid, R. B. A. (2017). An EEG-based machine learning method to screen alcohol use disorder. *Cognitive neurodynamics*, 11(2), 161-171.
- [10] Bajaj, V., Guo, Y., Sengur, A., Siuly, S., & Alcin, O. F. (2017). A hybrid method based on time-frequency images for classification of alcohol and control EEG signals. *Neural Computing and Applications*, 28(12), 3717-3723.
- [11] Fayyaz, A., Maqbool, M., & Saeed, M. (2019, August). Classifying alcoholics and control patients using deep learning and peak visualization method. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Vision, Image and Signal Processing* (pp. 1-6).
- [12] Agarwal, S., & Zubair, M. (2021). Classification of Alcoholic and Non-Alcoholic EEG Signals Based on Sliding-SSA and Independent Component Analysis. *IEEE Sensors Journal*, 21(23), 26198-26206.
- [13] Dong, H., Li, T., Ding, R., & Sun, J. (2018). A novel hybrid genetic algorithm with granular information for feature selection and optimization. *Applied Soft Computing*, 65, 33-46.
- [14] Farsi, L., Siuly, S., Kabir, E., & Wang, H. (2020). Classification of alcoholic EEG signals using a deep learning method. *IEEE Sensors Journal*, 21(3), 3552-3560.
- [15] American Electroencephalographic Association 1990 (2007) Standard electrode position nomenclature, <http://kdd.ics.uci.edu/databases/eeg/eeg.data.html/>
- [16] Snodgrass, J. G., & Vanderwart, M. (1980). A standardized set of 260 pictures: norms for name agreement, image agreement, familiarity, and visual complexity. *Journal of experimental psychology: Human learning and memory*, 6(2), 174.
- [17] Mallat, S. (1989). A Theory for Multiresolution Approximations and Wavelet Orthonormal Bases of ℓ_2 (r). *IEEE Trans. Pattern Recognition and Machine Intelligent*, 11, 674-693.
- [18] Alçin, Ö. F., Budak, Ü., Aslan, M., Akbulut, Y., Cömert, Z., Akpınar, M. H., & Şengür, A. (2020). Classification of physical actions from surface EMG signals using the wavelet packet transform and local binary patterns. In *Modelling*

- and Analysis of Active Biopotential Signals in Healthcare, Volume 1. IOP Publishing.
- [19] Hu, Y., Wong, Y., Wei, W., Du, Y., Kankanhalli, M., & Geng, W. (2018). A novel attention-based hybrid CNN-RNN architecture for sEMG-based gesture recognition. *PloS one*, 13(10), e0206049.
- [20] Wei, W., Wong, Y., Du, Y., Hu, Y., Kankanhalli, M., & Geng, W. (2019). A multi-stream convolutional neural network for sEMG-based gesture recognition in muscle-computer interface. *Pattern Recognition Letters*, 119, 131-138.
- [21] Arı, A. (2020). Analysis of EEG signal for seizure detection based on WPT. *Electronics Letters*, 56(25), 1381-1383.
- [22] Khushaba, R. N., Al-Ani, A., Al-Timemy, A., & Al-Jumaily, A. (2016, December). A fusion of time-domain descriptors for improved myoelectric hand control. In *2016 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)* (pp. 1-6). IEEE.
- [23] Arı, A., Ayaz, F. & Hanbay, D. (2019). EMG sinyallerinin kısa zamanlı fourier dönüşüm özellikleri kullanılarak yapay sinir ağları ile sınıflandırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 31(2), 443-451.
- [24] Al-Timemy, A. H. (2017, October). An investigation of feature combinations of time-domain power spectral descriptors feature extraction for myoelectric control of hand prostheses. In *2017 Fourth International Conference on Advances in Biomedical Engineering (ICABME)* (pp. 1-4). IEEE.
- [25] Hjorth, B. (1970). EEG analysis based on time domain properties. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, 29(3), 306-310.
- [26] Aslan, M., & Zurel, E. N. (2022). An efficient hybrid model for appliances classification based on time series features. *Energy and Buildings*, 266, 112087.
- [27] Breiman, L. (1996). Bagging predictors. *Machine learning*, 24(2), 123-140.
- [28] Freund, Y. R., Schapire, (1995), A decision theoretic generalization of online learning and application to boosting. In *European Conference on Computational Learning Theory* (pp. 23-37).
- [29] PAZOKI, M. A Novel Fault Classification Scheme for Series Capacitor Compensated Transmission Line Based on Bagged Tree Ensemble Classifier.
- [30] Chairatanasongporn, N., & Jaiyen, S. (2015, October). A hybrid ensemble of machine and statistical learning using confidence-based boosting. In *2015 7th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)* (pp. 41-45). IEEE.
- [31] Saeed, M. S., Mustafa, M. W., Sheikh, U. U., Jumani, T. A., & Mirjat, N. H. (2019). Ensemble bagged tree based classification for reducing non-technical losses in multan electric power company of Pakistan. *Electronics*, 8(8), 860.
- [32] ASLAN, M. Derin Öğrenme Tabanlı Otomatik Beyin Tümör Tespiti. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 34(1), 399-407.
- [33] Uzen, H., Turkoglu, M., & Hanbay, D. (2021). Texture defect classification with multiple pooling and filter ensemble based on deep neural network. *Expert Systems with Applications*, 175, 114838.
- [34] Ekaputri, C., Widadi, R., & Rizal, A. (2020, June). EEG signal classification for alcoholic and non-alcoholic person using multilevel wavelet packet entropy and support vector machine. In *2020 8th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT)* (pp. 1-4). IEEE.
- [35] Malar, E., & Gautham, M. (2020). Wavelet analysis of EEG for the identification of alcoholics using probabilistic classifiers and neural networks. *International Journal of Intelligence and Sustainable Computing*, 1(1), 3-18.
- [36] Kannathal, N., Acharya, U. R., Lim, C. M., & Sadasivan, P. K. (2005). Characterization of EEG—a comparative study. *Computer methods and Programs in Biomedicine*, 80(1), 17-23.
- [37] Kumari, N., Anwar, S., & Bhattacharjee, V. (2022). A Deep Learning-Based Approach for Accurate Diagnosis of Alcohol Usage Severity Using EEG Signals. *IETE Journal of Research*, 1-15.

Nanosilika Modifiyeli Bağlayıcıların Tekerlek İzi Direnci ve Sıcaklık Hassasiyetlerinin Belirlenmesi

Mustafa AKPOLAT^{1*}

¹ İnşaat Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Munzur Üniversitesi, Tunceli, Türkiye
^{*1} mustafaakpolat@munzur.edu.tr

(Geliş/Received: 28/12/2022;

Kabul/Accepted: 22/02/2023)

Öz: Bu çalışmada, Nanosilika (NS) katkısının bitümlü bağlayıcıların tekerlek izi ve sıcaklık hassasiyetine olan etkisi değerlendirilmiştir. Bu kapsamda saf ve 3 farklı orandaki (%2, %4 ve %6) nanosilika modifiyeli bağlayıcılar üzerine penetrasyon, yumuşama noktası, viskozite ve çoklu gerilmeli sünme geri dönme (MSCR) deneyi uygulanmıştır. Saf ve NS modifiyeli bağlayıcıların sıcaklık hassasiyetini belirlemek için geleneksel deney sonuçlarından yararlanılarak penetrasyon indeksi (PI) ve penetrasyon-viskozite sayısı (PVN) belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, saf bağlayıcının nanosilika ile modifiye edilmesiyle bağlayıcının kıvamında azalma ve viskozitesinde artış sağlanmıştır. Bu sayede sıcaklık hassasiyeti daha düşük modifiye bağlayıcılar elde edilmiştir. Ayrıca MSCR deney sonuçlarına göre nanosilika modifiyesinin bütün sıcaklıklarda daha düşük Jnr değerleri vererek bağlayıcının tekerlek izi parametresini geliştirdiği daha ağır taşıt trafiklerine cevap verebileceği ve yüksek servis sıcaklıklarında kullanılabilceği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Nanosilika, modifikasyon, sıcaklık hassasiyeti, tekerlek izi

Determination of Rutting and Temperature Susceptibility of Nanosilica Modified Binders

Abstract: In this study, the effect of Nanosilica (NS) additive on rutting and temperature susceptibility of bituminous binders was evaluated. In this context, penetration, softening point, viscosity and multiple stress creep recovery (MSCR) tests were applied on pure and nanosilica modified binders in 3 different ratios (2%, 4% and 6%). In order to determine the temperature sensitivity of pure and NS modified binders, the penetration index (PI) and penetration-viscosity number (PVN) were determined by using conventional test results. According to the results obtained, the consistency of the binder decreased and the viscosity increased by modifying the pure binder with nanosilica. In this way, modified binders with lower temperature sensitivity were obtained. In addition, according to the MSCR test results, it was determined that the nanosilica modifier can respond to heavier vehicle traffic, where the binder improves the rutting parameter by giving lower Jnr values at all temperatures and can be used at high service temperatures.

Key words: Nanosilica, modification, temperature susceptibility, rutting

1. Giriş

Stiren-bütadien-stiren (SBS) ve stiren bütadien kauçuğu (SBR) gibi polimerler, asfalt bağlayıcı özelliklerini iyileştirmek için son 40 yıldır asfalt bağlayıcı modifikasyonunda kullanılmaktadır. Bu polimerlerin tümü bitüm özelliklerini bir dereceye kadar iyileştirmesine rağmen, yüksek maliyet, yüksek sıcaklıkta depolama stabilitesindeki problemler gibi dezavantajları vardır [1]. Bu nedenle, asfalt modifikasyonu için nanomalzemelerin kullanımı, bu dezavantajların üstesinden gelmek ve asfalt kaplama performansını daha da iyileştirmek için araştırılmaktadır ve çeşitli polimerler ve öğütülmüş araç lastiği (CR)'nin yanı sıra, nanomalzemeler, birçok alanda olduğu gibi bitüm modifikasyonunda da son yıllarda sıklıkla kullanılmaya başlamıştır.

Nanomalzemeler, inşaat mühendisliği malzemeleri, özellikle asfalt ve asfalt karışımlarının yaşlanma ve yapışma özelliklerini artıran kaplama inşaat malzemeleri gibi malzemelerin performansını iyileştirmek için yaşamın sayısız uygulamasında kullanımlarıyla bilinmektedir [2,3].

Nanomalzemelerin malzeme performansını iyileştirme yeteneğinin arkasındaki nedenin, geniş yüzey alanı, yeterli dispersiyon kabiliyeti, kimyasal saflık, yüksek absorpsiyon kabiliyeti ve mükemmel stabilite olduğu da belirtilmektedir. [4,5]. Nanosilika (NS), beton karışımlarının performansını ve elastomerlerin reolojik özelliklerini geliştirmek için yaygın olarak kullanılan nanomalzemelerden biridir [6].

Silika parçacıklarının şekli ve boyutu, asfalt bağlayıcıda kullanım için oldukça arzu edilir çünkü temas yüzey alanı, geleneksel dolgu maddelerinkinden çok daha yüksektir ve nispeten daha yüksek polariteye ve kimyasal

* Sorumlu yazar: mustafaakpolat@munzur.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-7070-3217

olarak aktif yüzeye sahiptir [7,8]. Yusoff ve diğerlerinin (2014) yaptığı çalışmada, polimer modifiyeli bağlayıcıların performans özelliklerini iyileştirmek için %4 NS eklenmesinin optimum içerik olduğunu ve oksidatif yaşlanmaya duyarlılığı belirgin bir şekilde azalttığını belirtmişlerdir [6]. Fini ve ark. [8]'nın katkı malzemesi olarak NS parçacıklarını kullandığı, asfaltın reolojik ve oksidatif yaşlanma direnci üzerindeki etkisini araştırmak için yaptığı çalışmada, NS parçacıklarının, elastikiyeti ve depolama stabilitesini artırarak bağlayıcının reolojik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiği ve tekerlek izi performansını arttırdığı belirtilmiştir. Ayrıca, NS partiküllerinin geniş yüzey alanı nedeniyle, modifiye edilmiş bağlayıcıların reolojik yaşlanma indeksi, modifiye edilmemiş olana kıyasla kayda değer bir gelişme gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca yapılan bir diğer çalışmada da, NS ile modifiye edilmiş asfaltın tekerlek izi ve yaşlanma performansındaki iyileşme ifade edilmiştir [3].

Tekerlek izi sıcak asfalt karışımlarında en sık rastlanan bozulma türüdür. Türkiye gibi ağır taşıt trafiğine sahip ve bölgesel olarak sıcak yerlerde tekerlek izi oluşumu sıklıkla görülür. Tekerlek izleri, üstyapıyı oluşturan tabakaların hepsinde veya bir kısmında meydana gelen deformasyonlardan, trafik tekerrür sayısına bağlı olarak deformasyonların birikmesinden, yeterli sıkışmanın sağlanamamasından veya bitüm miktarının fazla olmasından dolayı oluşabileceği belirtilmektedir [9].

Saf bitüme bağlayıcı ağırlığınca %2 ila %4 oranında NS ilavesinin tekerlek izini neredeyse yarı yarıya azaltabileceği belirtilmiştir [6]. Öğütülmüş araç lastiği (CR) modifiyeli bağlayıcılara NS ilavesi ile bağlayıcıların reolojik özelliklerindeki değişimin incelendiği çalışmada, NS'nin CR modifiyeli bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki reolojik özelliklerini iyileştirme potansiyeline sahip olduğu tespit edilmiştir [10].

NS ve palmye yağı ile modifiye edilmiş bağlayıcılar üzerine yapılan çalışmada, penetrasyonun azaldığı ve yumuşama noktası ve dinamik viskoziteyi artırarak sıcaklık hassasiyetini iyileştirildiği belirtilmiştir. Ayrıca NS partiküllerinin tekerlek izi parametresini ($G^*/\sin\delta$) artırırken ve biyo-asfaltın yaşlanma hassasiyetini ve sünme uyumunu (Jnr) azaltarak bağlayıcının esnekliğini arttırdığı belirtilmiştir [11].

Samsudin ve diğerleri [12], saf bağlayıcıya %1, %2, %3, %4 ve %5 oranında nanosilika ilave ederek MSCR deneyi ile bağlayıcıların tekerlek izi dirençlerini incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre nanosilikanın sünme geri dönme (R) yüzdesini artırırken Jnr değerini azaltarak daha elastik davranış sergilediğini ve tekerlek izi direncini geliştirdiğini belirlemişlerdir.

Taherkhani ve Afrooz [13], nano-silika içeren asfalt karışımının sünme davranışını araştırmıştır. Sonuçta, artan nano-silika içeriği ile akış sayısının (flow number) arttığını ve kararlı hal gerinim hızının (steady-state strain rate) azaldığını belirtmiştir. Bunun da kalıcı deformasyona karşı direnci artıracığını ifade etmiştir.

Zghair ve ekibi, 2%, 4%, and 6% oranlarında Nanosilika ile modifiye edilmiş bağlayıcıların reolojik özelliklerini incelemiştir ve nanosilikanın artan yüzdesiyle bağlayıcının rijitliğinin arttığı ve sıcaklık hassasiyetinin azaldığını belirtmişlerdir [14].

Rizai ve ekibi yaptığı çalışmalarda SBS modifiyeli bağlayıcılara nanosilika ilavesinin tekerlek izi direncini geliştirebileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca, SBS/nanosilika modifiyeli bağlayıcı ile hazırlanan karışımların yüksek akış sayısı verdiğini bununda yüksek sıcaklıklardaki performansının geliştiğine işaret ettiğini ifade etmişlerdir [15,16].

Yapılan çalışmada Fume Silika'nın bitüm modifikasyonunda tek başına ve Crumb rubber (CR) ile birlikte kullanılmasının bağlayıcının geleneksel ve reolojik özelliklerine etkisi araştırılmış ve SBS modifiyeli bağlayıcı ile kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, bitüm ağırlığınca %6 CR modifikasyonu içerisinde %1.5 Fume silika kullanılması ile yumuşama noktasında diğer bağlayıcılara göre daha fazla artış sağlandığı ve sıcaklık hassasiyetinin azaldığı, bağlayıcının kıvamının arttığı, kompleks modül değerlerinin artarak tekerlek izine karşı daha dirençli olduğu ve daha esnek davranış sergileyerek düşük sıcaklık parametrelerini iyileştirdiği belirtilmiştir [17].

Farklı iki bitüm sınıfına %2 ve %4 oranlarında NS ilavesinin bağlayıcının tekerlek izi parametresini arttırdığı, lineer genlik taraması sonucuna göre yorulma parametresi üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı belirtilmiştir. Ayrıca NS modifikasyonunun yüksek kaplama sıcaklıkları ve ağır taşıt trafiği koşullarında kullanımının uygun olacağı ifade edilmiştir [18].

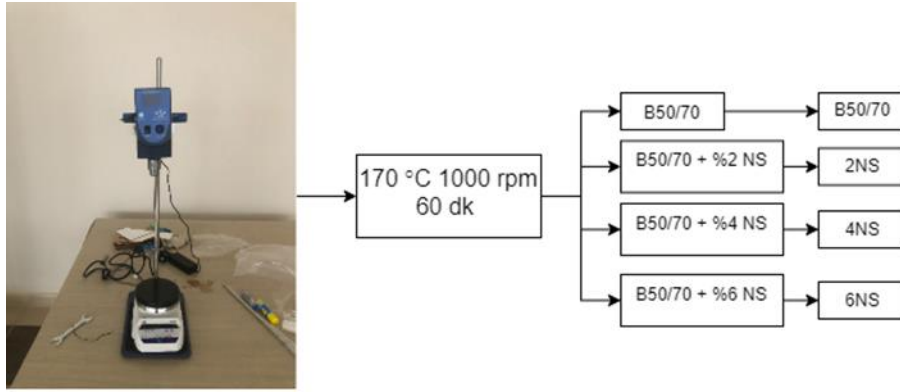
Sonuç olarak yapılan literatür çalışması sonucunda yazarlar bağlayıcı ağırlığınca %0.1 ile %7 arasında farklı oranlarda nanosilika katkısı kullanmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda nanosilika modifiyeli bağlayıcıların tekerlek izi direncini, yorulma ömrünü, yüzde geri dönme değerlerini ve sünme uyumunu geliştirdiği belirlenmiştir [7,19-23]

Bu çalışmada saf ve 3 farklı oranda (%2, %4 ve %6) nanosilika (NS-Aerosol 150) modifiyeli bağlayıcıların penetrasyon ve yumuşama noktası deneyi ile sıcaklık hassasiyeti, viskozite ve penetrasyon deneyi ile penetrasyon-viskozite sayısı (PVN) ve MSCR deneyi ile sünme geri dönme (%R) ve sünme uyumu (Jnr) tespit edilecektir.

2. Materyal ve Metod

2.1 Materyal

Çalışmada kullanılan mekanik karıştırıcı, katkı oranları ve kısaltmaları Şekil 1’de verilmiştir. Katkı malzemesi olarak nanosilika çeşidi olan Aerosil 150 katkısı özellikleri de Tablo 1’de verilmiştir. Bütün modifiye bağlayıcılar TÜPRAŞ rafinerisinden temin edilen ve ülkemizde aşınma tabakası için sıklıkla kullanılan B 50/70 penetrasyon sınıfında saf bağlayıcılar ile Şekil 1’de görülen mekanik karıştırıcı kullanılarak hazırlanmıştır. Ayrıca çalışmada kullanılan nanosilikanın (NS) kullanım oranları da Şekil 1’de görülmektedir. Modifiye bağlayıcılar 1000 devir/dk karıştırma hızında, 170 °C sıcaklıkta 1 saat karıştırılarak hazırlanmıştır. Ayrıca bağlayıcılar arasında karıştırma sırasındaki yaşlanmayı elemine etmek için saf bağlayıcılar da aynı karıştırma prosedürüne tabi tutulmuştur.



Şekil 1. Mekanik karıştırıcı, katkı oranları ve kısaltmalar

Tablo 1. Nanosilika (NS) katkısının fiziksel ve kimyasal özellikleri

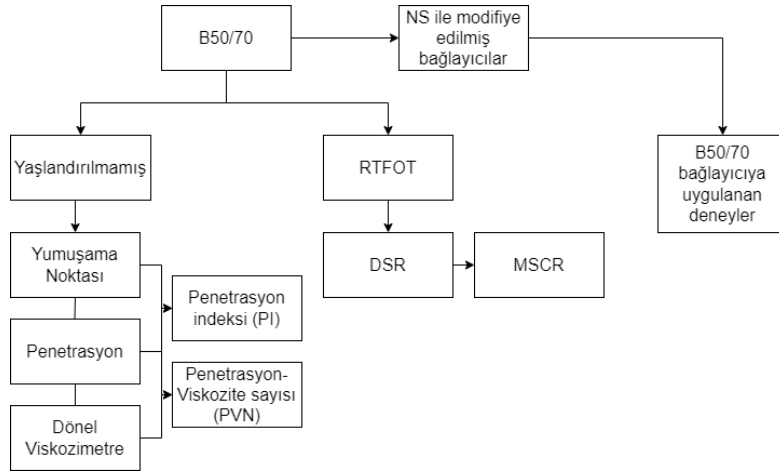
Özellikler	Birim	Değer
Özgül yüzey alanı	m ² /g	150±15
Ortalama tane büyüklüğü	nm	14
Sıkıştırılmış yoğunluk	g/l	50
Nem	% wt.	≤ 1.5
Ateşleme kaybı	% wt.	≤ 1.0
pH (%4 çözelti içinde)		3.7 - 4.7
SiO ₂	% wt.	≥ 99.8

2.2 Metod

Çalışmada kullanılan deneysel plan Tablo 2’de verilirken deney dizaynı da Şekil 2’de verilmiştir.

Table 2. Deneysel plan

Deney adı	Standart	Ekipman	Test sıcaklık aralığı (°C)	Yaşlanma durumu
Penetrasyon	AASHTO T49	Penetrometre	25	Yaşlandırılmamış
Yumuşama noktası	AASHTO T53			Yaşlandırılmamış
Viskozite	AASHTO T 316	Dönel viskozimetre	135 ve 165	Yaşlandırılmamış
Çoklu gerilme sünme geri dönme (MSCR)	AASHTO T350	DSR	58-76	RTFOT



Şekil 2. Deneysel dizayn

2.2.1 Penetrasyon deneyi

Bitüm sınıflandırılmasında kullanılan geleneksel bir test yöntemi olan penetrasyon deneyi aynı zaman bağlayıcının kıvamını belirlemek için de kullanılmaktadır. Standart penetrasyon deneyi, 100 gr. ağırlığındaki bir iğnenin 25°C sıcaklıkta ve 5 saniye süreyle bitüm içerisinde kat ettiği düşey mesafe olarak tanımlanmaktadır [24]. Penetrasyon değeri kıvam ile ters orantılıdır yani penetrasyon değeri arttıkça bağlayıcının kıvamı azalmaktadır.

2.2.2 Yumuşama noktası deneyi

Bitümlü bağlayıcıların yumuşama sıcaklığını tespit etmek amacıyla AASHTO T53 standardında belirtildiği gibi bitüm doldurulmuş standart halkanın üzerine bırakılan bilyenin sıcaklık artışıyla aşağıya doğru düşmesi ve bu düşüşün 2.5 cm olduğu andaki sıcaklık olarak tanımlanmaktadır [25]. Deney 5 °C’de başlatılarak sıcaklık her dakikada 5 °C artacak şekilde cihaz ayarlanır. Bağlayıcıların yumuşama noktalarının artması ile tekerlek izinde iyileşme sağlandığı bilinmektedir.

2.2.3 Viskozite deneyi

Dönel viskozimetre (RV) deneyi, bitümlü bağlayıcıların yüksek sıcaklıktaki akışkanlık karakteristiklerini belirlemek amacıyla uygulanmaktadır. Deney AASHTO T316 standardına göre yapılmaktadır [26]. Bağlayıcıların yüksek sıcaklık viskozite değerleri, pompalanma ve karıştırma sırasında bağlayıcıların yeterince akışkan olduklarının tespiti amacıyla belirlenmektedir. 135°C’deki viskozite değerinin 3 Pa.s’yi aşmaması istenir.

2.2.4 MSCR deneyi

MSCR deneyi, AASHTO T350 [27] standardına uygun olarak AASHTO T315 standardına göre hazırlanmış saf ve modifiye bağlayıcılar üzerine 25 mm plak kullanılarak RTFOT kalıntısı üzerine yapılmıştır. Test, 0,1 kPa gerilme seviyesinde 20 döngü 3,2 kPa gerilme seviyesinde 10 döngü olacak şekilde 58-76 °C (6 °C’e arttırılarak) sıcaklık arasında yapılmıştır. Her döngü 1 sn kayma gerilmesi 9 sn geri kazanımdan oluşmaktadır. Bağlayıcının davranışını karakterize etmek için lineer viskoelastik bölgedeki davranış 0.1 kPa gerilim seviyesi ile sağlanırken lineer olmayan viskoelastik bölgedeki davranış 3.2 kPa gerilme seviyesi ile sağlanmaktadır.

Deney sonucunda iki parametre elde edilmektedir. Bunlardan birincisi kalıcı sünme uyumu (Jnr) diğeri ise yüzde geri dönme (R) değeridir. Asfalt bağlayıcılar için ortalama yüzde geri dönme değerleri sırasıyla 0.1 kPa (R0.1) ve 3.2(R3.2) kPa kayma gerilmeleri seviyesinde Denklem 1 ve 2’ye göre hesaplanmaktadır [28].

$$R_{0.1} = \frac{\sum_{N=11}^{20} [\varepsilon_r(0.1, N)]}{10} \quad (1)$$

$$R_{3.2} = \frac{\sum_{N=1}^{10} [\varepsilon_r(3.2, N)]}{10} \quad (2)$$

ε_r N dögü sayısında sırasıyla 0.1 ve 3.2 kPa gerilme seviyesindeki yüzde geri dönmeyi ifade etmektedir. R parametresi bağlayıcı içerisinde katkı varlığının bir göstergesi olarak kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda Jnr parametresinin tekerlek izi oluşumu ile iyi bir uyumunun olduğu belirtilmektedir [29][30]. Standartta dikkate alınan farklı trafik yükleme kategorileri standart (S), ağır (H), çok ağır (V) ve aşırı ağır (E) olarak verilmiştir. 0.1 kPa (Jnr0.1) ve 3.2 kPa (Jnr3.2) için kalıcı sünme uyumu değerlerinin hesaplanması Denklem 3 ve 4'te, Jnr_{diff} değerinin hesaplanması ise Denklem 5'te verilmiştir.

$$Jnr_{0.1} = \frac{\sum_{N=1}^{20} [Jnr(0.1, N)]}{10} \quad (3)$$

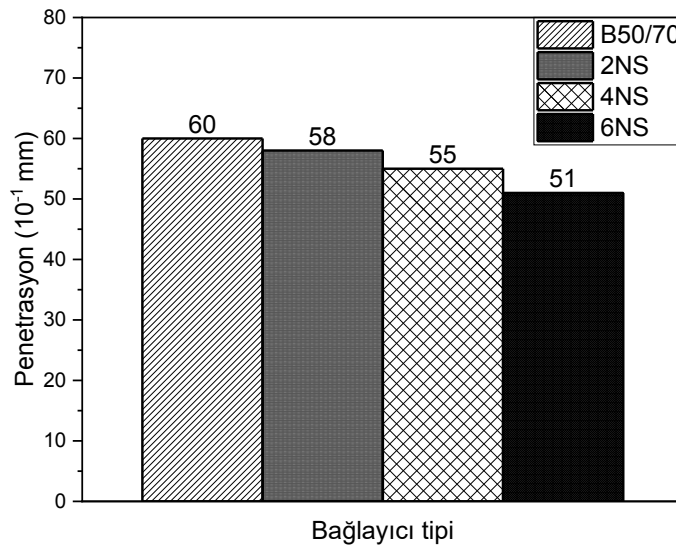
$$Jnr_{3.2} = \frac{\sum_{N=1}^{10} [Jnr(3.2, N)]}{10} \quad (4)$$

$$Jnr_{diff} = \frac{(Jnr_{3.2} - Jnr_{0.1})}{Jnr_{0.1}} * 100 \leq 75 \quad (5)$$

3. Deneysel Sonuçları

3.1 Penetrasyon deneysel sonuçları

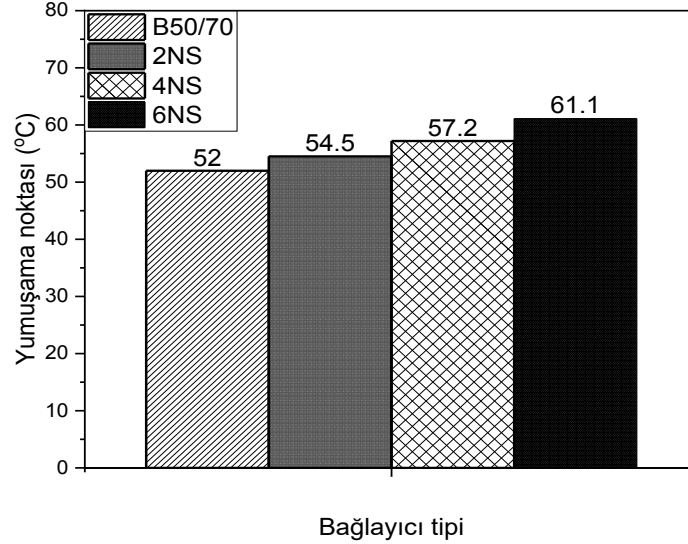
Şekil 3'te saf ve NS modifiyeli bağlayıcıların penetrasyon değerleri verilmiştir. Şekle göre nanosilika oranı arttıkça bağlayıcının penetrasyon değerleri düşmektedir. Yani bağlayıcının kıvamı azalmaktadır. Bu azalma %2, %4 ve %6 NS içeriğinde saf bağlayıcıya göre sırasıyla %3.3, %8.3 ve %15 olmaktadır. Penetrasyon değerlerindeki düşüş bitümün bir miktar sertleştiği ifade etmektedir. Buda yumuşama noktasında artış ve tekerlek izinde daha iyi bir direnç sağlayabileceğini işaret etmektedir.



Şekil 3. Saf ve NS modifiyeli bağlayıcıların penetrasyon değerleri

3.2 Yumuşama noktası deney sonuçları

B50/70 ve NS modifiyeli bağlayıcıların yumuşama noktasındaki değişimi Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 4'e göre, saf bağlayıcı içerisine NS ilave ile yumuşama noktasında artış görülmüştür. Bu artış saf bağlayıcıya göre %2, %4 ve %6 nanosilika modifiyesi ile 1.05, 1.1 ve 1.18 kat olmaktadır. Buda nanosilika katkısının bağlayıcının yumuşama noktasını arttırarak daha yüksek servis sıcaklıklarında kullanılabilirliğini ifade etmektedir.



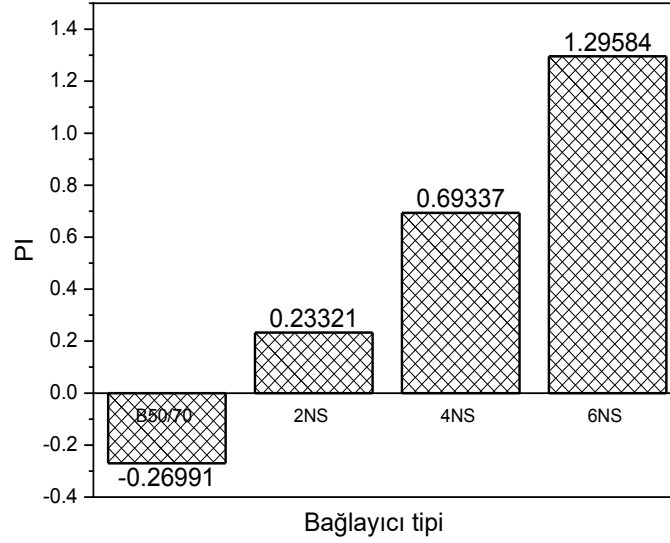
Şekil 4. Saf ve NS modifiyeli bağlayıcıların yumuşama noktası değerleri

Isıya karşı duyarlılık, bağlayıcıları kıyaslarken önemli bir parametredir. Bağlayıcıların ısıya karşı hassasiyetinin bilinmesi kaplamanın sıcaklık değişiminden nasıl etkileneceği hakkında bilgi sağlamamıza yardımcı olmaktadır. Bu parametre bağlayıcıların penetrasyon ve yumuşama noktası değerlerinden faydalanılarak hesaplanmaktadır ve Penetrasyon indeksi (PI) olarak adlandırılmaktadır. Bağlayıcılar için PI değerinin genellikle -2 ile +2 değeri arasında olması istenmektedir. Ancak PI değeri ne kadar yüksekse ısıya karşı duyarlılık o kadar azdır. PI değerleri 6 ve 7 nolu denklemler yardımıyla bulunmaktadır.

$$A = \frac{\text{Log}800 - \text{Log}P_{25}}{T_{YN} - 25} \quad (6)$$

$$PI = \frac{20 - 500A}{1 + 50A} \quad (7)$$

Burada P_{25} penetrasyon ve T_{YN} ise yumuşama noktası değerini ifade etmektedir. Bu çalışmada penetrasyon ve yumuşama noktasına göre elde edilen PI değerleri Şekil 5'te görülmektedir. Şekle göre saf bağlayıcıya NS ilavesi bağlayıcının PI değerlerinde artışa neden olmuştur. Saf bağlayıcıya %2, %4 ve %6 nanosilika ilavesi ile PI değerlerinde 0.87, 2.57 ve 4.8 kat artış sağlanmıştır. Bu artış bağlayıcının ısıya karşı duyarlılığının azaldığını ifade etmektedir. Yani bağlayıcının daha yüksek servis sıcaklıklarında hizmet verebileceği anlaşılmaktadır.



Şekil 5. Saf ve NS modifiyeli bağlayıcıların PI değerleri

3.3 Dönel viskozimetre deney sonuçları

Saf ve nanosilika modifiyeli bağlayıcıların viskozite ve karıştırma-sıkıştırma sıcaklıkları Tablo 3'te verilmiştir. Tablo 3'e göre, saf bağlayıcıya NS ilavesi ile viskozite de önemli oranda artış görülmüştür. Bu artış %2, %4 ve %6 NS modifiyeli bağlayıcılarda sırasıyla %68, %171 ve %382 olmaktadır. Ayrıca 6NS bağlayıcısı şartname kriteri olan 3000 cP değerini aşmaktadır. Buda işlenebilirlik açısından bu bağlayıcının şartname kriterlerini sağlamadığını göstermektedir. Viskozite değerine göre nanosilika katkısının optimum oranının %4 olduğu görülmektedir. Ayrıca nanosilika katkısıyla artan viskoziteden dolayı saf bağlayıcıya göre karıştırma sıcaklıklarında yaklaşık olarak 3, 4 ve 5 °C, sıkıştırma sıcaklıklarında ise 6, 9 ve 11 °C artış meydana gelmiştir.

Tablo 3. Saf ve NS modifiyeli bağlayıcıların viskozite değerleri ve karıştırma-sıkıştırma sıcaklıkları

Bağlayıcı Tipi	Viskozite (cP)		Karıştırma Sıcaklığı (°C)	Sıkıştırma Sıcaklığı (°C)
	135 °C	165 °C		
B50/70	750	212.5	166.2-168.5	159.5-162.9
2NS	1263	312.5	168.8-170.1	165.0-166.9
4NS	2038	525	171.6-172.4	169.2-169.9
6NS	3613	887.5	172.7-173.1	171.4-171.7

McLeod (1989), tarafından 25 °C'deki penetrasyona ve 135 °C'deki viskoziteye bağlı olan PI'e alternatif olarak bir penetrasyon-viskozite numarası (PVN) geliştirilmiştir[31]. PVN değeri genellikle - 2 ve 0.5 aralığındadır. Yüksek PVN düşük sıcaklık hassasiyeti gösterirken düşük PVN yüksek sıcaklık hassasiyeti göstermektedir. PVN değeri Denklem 8'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır ([32][33]). Denklem 8'deki LogL ve LogM değerleri Denklem 8(a) verilen formüle göre belirlenmektedir.

$$PVN = \frac{\text{Log}L - \text{Log}X}{\text{Log}L - \text{Log}M} \times (-1.5) \quad (8)$$

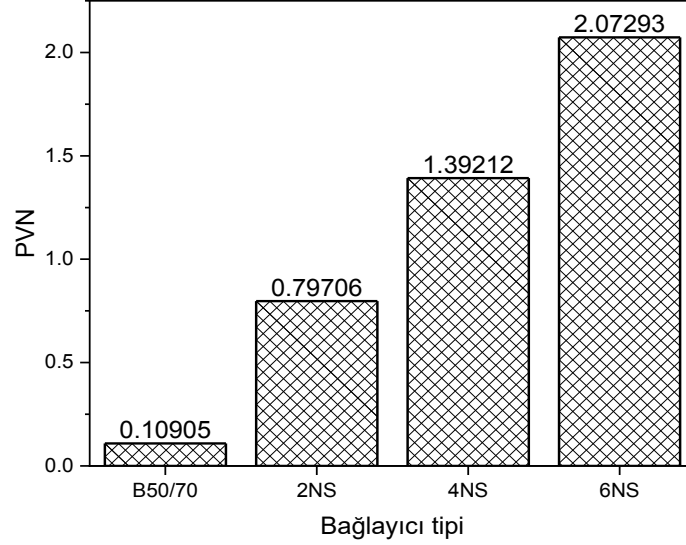
$$\text{Log}L = 4.2580 - 0.79674 \times \log P$$

$$\text{Log}M = 3.46289 - 0.61094 \times \log P \quad (8.a)$$

Burada; X = 135°C'deki viskozite, L = PVN=0,0 için 135°C'deki viskozite, M = PVN=1,5 için 135°C'deki viskozite ve P = 25°C'deki penetrasyon, 1/10 mm olarak tanımlanmaktadır.

Şekil 6'da saf ve NS modifiyeli bağlayıcıların PVN değerleri verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere saf bağlayıcı içerisinde nanosilika ilavesi ile PVN değerlerinde önemli oranda artış sağlanmıştır. Bu artış %2, %4 ve %6 NS

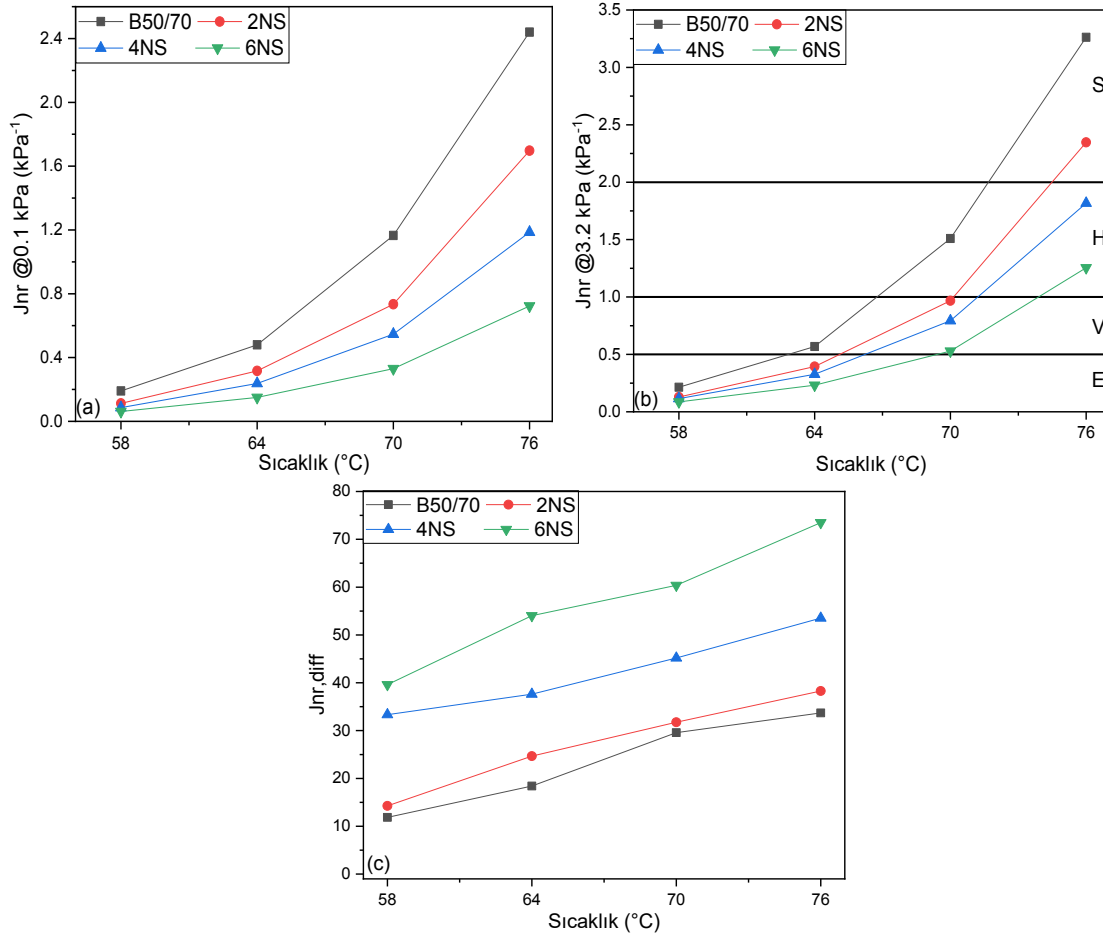
modifiyeli bağlayıcılarda saf bağlayıcıya göre sırasıyla 7.3, 12.7 ve 19 kat olmaktadır. PVN'deki artış bağlayıcının sıcaklık hassasiyetinin azaldığını göstermektedir.



Şekil 6. Saf ve NS modifiyeli bağlayıcıların PVN değerleri

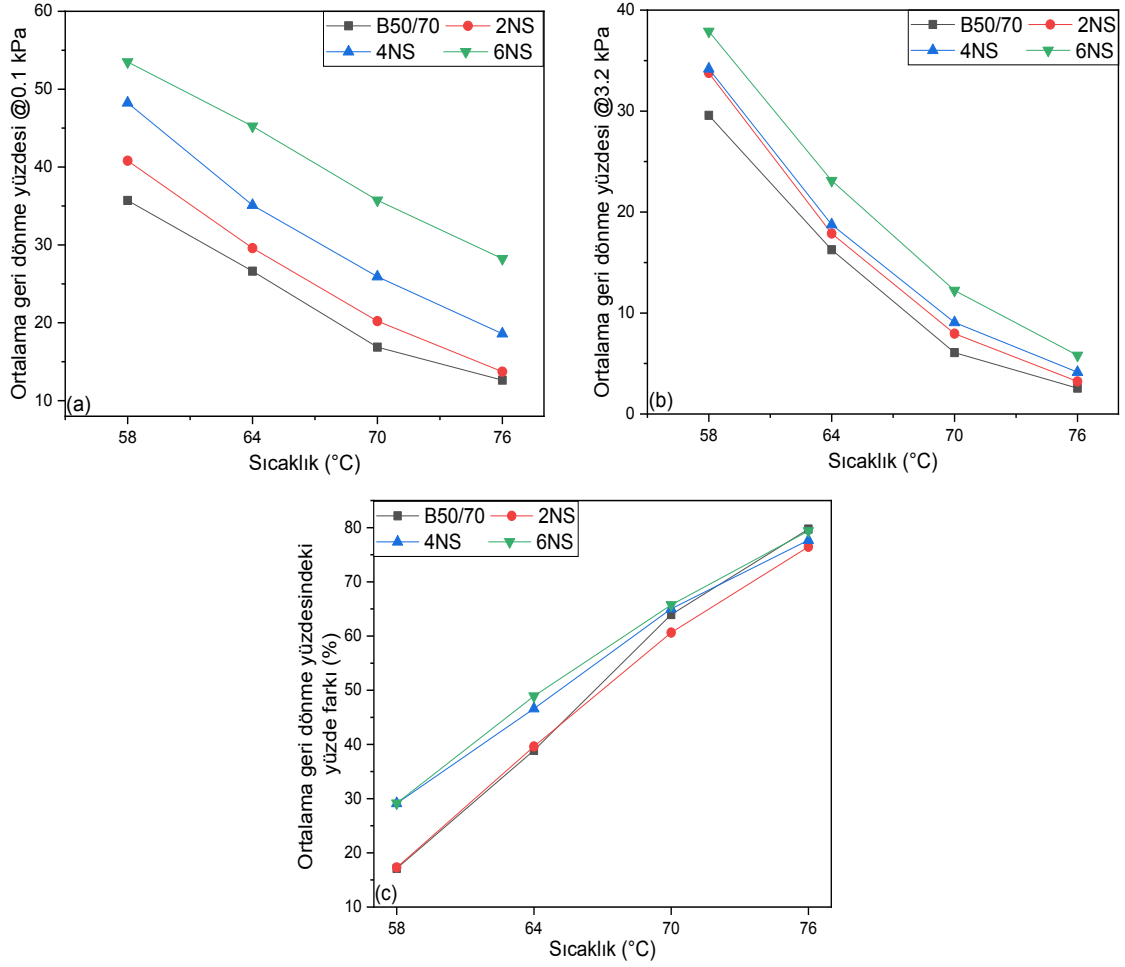
3.4 MSCR deney sonuçları

Şekil 7'de farklı sıcaklıklarda uygulanan MSCR testinin 3.2 kPa ve 0.1 kPa gerilme seviyelerindeki ve bu gerilme seviyeleri arasındaki yüzdesel farkların ($J_{nr,diff}$) sonuçları verilmiştir. Şekil 7(a) ve Şekil 7(b)'de görüldüğü üzere her iki yük seviyesinde de saf bağlayıcı içerisinde nanosilika kullanılmasıyla J_{nr} değerlerinde önemli oranda düşüş görülmüştür. Buda modifiyeli bağlayıcıların her sıcaklıkta saf bağlayıcıya göre tekerlek izine karşı daha dirençli olacağını bir göstergesidir. 76 °C'de 3.2 kPa'daki J_{nr} değerlerine göre %2, %4 ve %6 NS modifiyeli bağlayıcılar saf bağlayıcıya göre sırasıyla %28, %44 ve %61 daha düşük J_{nr} değeri verirken, bu oran 70 °C'de %37, %47 ve %65 olmaktadır. Bu değişim 0.1 kPa yük seviyesinde ise bütün sıcaklıklarda yaklaşık olarak %2, %4 ve %6 NS modifiyeli bağlayıcı için sırasıyla yaklaşık olarak %35, %52 ve %70 çıkmaktadır. Buradan anlaşılacağı üzere NS modifiyeli bağlayıcılar saf bağlayıcıya göre daha düşük yük seviyelerinde tekerlek izine karşı daha iyi davranış sergilemektedir. Şekil 7(c)'de görüldüğü üzere saf ve NS modifiyeli bağlayıcılar bütün sıcaklıklarda MSCR protokolünün ikinci kriteri olan $J_{nr,diff} \leq 75$ değerini sağlamıştır. Şekilde görüleceği üzere sıcaklık artışıyla saf ve modifiyeli bağlayıcıların $J_{nr,diff}$ değerleri lineer bir şekilde artmaktadır. 58 °C ile 76 °C'de değerlendirildiğinde saf bağlayıcının $J_{nr,diff}$ değerindeki artış 2.9 kat iken modifiyeli bağlayıcıların $J_{nr,diff}$ değerindeki artışı sırasıyla 2.7, 1.6 ve 1.8 kat olmaktadır. Yani modifiye bağlayıcıların iki yük arasındaki (0.1 kPa ve 3.2 kPa) oranı daha düşük çıktığından sıcaklık artışından daha az etkilendiği ve yüksek sıcaklıklarda saf bağlayıcıya göre daha iyi direnç göstereceği belirlenmiştir.



Şekil 7. Saf ve NS modifiyeli bağlayıcıların MSCR test sonuçları a) $J_{nr3.2}$ b) $J_{nr0.1}$ c) $J_{nr,diff}$

Şekil 8’de saf ve NS modifiyeli bağlayıcıların farklı sıcaklıklardaki 0.1 kPa ve 3.2 kPa gerilme seviyelerindeki ortalama yüzde geri dönemleri ve bu iki gerilme seviyesindeki geri dönme yüzdeleri arasındaki yüzdesel farklar verilmiştir. Şekil 8(a)’da görüldüğü üzere sıcaklık artışıyla 0.1 kPa gerilme seviyesindeki ortalama geri dönme yüzdeleri lineer olarak azalmaktadır. %2, %4 ve %6 NS modifiyeli bağlayıcıların 58 C’de ve 0.1 kPa’daki geri dönme yüzdeleri saf bağlayıcıya göre sırasıyla 1.14, 1.35 ve 1.50 kat daha fazla olurken 70 C’de sırasıyla 1.19, 1.47 ve 2.24 kat daha fazla olmaktadır. Bu da 0.1 kPa yük seviyesinde sıcaklık artışıyla modifiyeli bağlayıcıların daha esnek davranış sergilediğini göstermektedir. Şekil 8(b)’de ise 3.2 kPa yük seviyesindeki geri dönme yüzdeleri değerlendirildiğinde 58 C’de saf bağlayıcıya göre modifiye bağlayıcılar sırasıyla 1.14, 1.25 ve 1.28 kat 70 C’de ise sırasıyla 1.31, 1.49 ve 2.01 kat daha fazla geri dönme yüzdesi vermiştir. Yine burada da yük ve sıcaklık artışıyla modifiye bağlayıcıların daha esnek davranış sergilediği görülmektedir. Şekil 8 (c)’ye göre sıcaklık artışıyla 3.2 kPa ve 0.1 kPa gerilme seviyelerinde arasındaki fark saf ve modifiyeli bağlayıcılarda lineer olarak artmıştır. Bu artış 58 °C ile 76 °C sıcaklık arasında %4 NS ve %6 NS modifiyeli bağlayıcılar için 1.20 kat iken saf ve %2 NS modifiyeli bağlayıcılarda 1.25 kat olmuştur. Yani %4 NS ve %6 NS modifiyeli bağlayıcılar gerilme artışından en az etkilenen bağlayıcılar olmuştur.



Şekil 8. Farklı sıcaklıklardaki MSCR test sonuçları a) $R_{0.1}$ b) $R_{3.2}$ c) 3.2 kPa ve 0.1 kPa'daki ortalama geri dönme yüzdesindeki yüzde farkı

Tablo 4. MSCR deney sonuçlarından elde edilen Jnr değerleri

Bağlayıcı Tipi	Sıcaklık ©	Jnr (0.1 kPa, kPa^{-1})	Jnr (3.2 kPa, kPa^{-1})
B50/70	58	0.1909	0.2136
	64	0.4799	0.5683
	70	1.1652	1.5098
	76	2.4401	3.2622
2NS	58	0.1127	0.1287
	64	0.3161	0.3941
	70	0.7345	0.9678
	76	1.6974	2.3473
4NS	58	0.086	0.1147
	64	0.2373	0.3266
	70	0.5465	0.7934
	76	1.1861	1.8173
6NS	58	0.0621	0.0866
	64	0.1502	0.2313
	70	0.33	0.5292
	76	0.7231	1.2545

4. Sonuçlar

Farklı oranlardaki nanosilika katkısının bitümlü bağlayıcının kıvamına, sıcaklık hassasiyetine ve tekerlek izi direncine olan etkisinin B50/70 bitüm sınıfı için araştırıldığı bu çalışmada:

- NS oranı arttıkça kıvamın azaldığı ve yumuşama noktasının arttığı belirlenmiştir.
- NS oranı arttıkça viskozite değerlerinin arttığı ve %6 NS içeriğinde 3 Pa.s sınır şartının aşılarak işlenebilirlik açısından olumsuz bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.
- NS oranı arttıkça hem PI hem de PVN değerlerinde saf bağlayıcıya göre artış görülerek sıcaklık hassasiyetinin azaldığı belirlenmiştir.
- MSCR deney sonucuna göre nanosilika oranı arttıkça Jnr değerlerinde bütün sıcaklıklarda saf bağlayıcıya göre artış görülmüştür. Buda NS modifiyeli bağlayıcıların tekerlek izi direncinin saf bağlayıcıya göre daha yüksek olduğunu ve MSCR şartname kriterlerine göre yüksek sıcaklıklarda ağır taşıt trafiğine daha uygun olduğu belirlenmiştir.
- Yine MSCR deney sonuçlarına göre bağlayıcının NS ile modifiye edilmesi ile geri dönme yüzdelерinde (R) artış sağlanmıştır ve daha elastik bir davranış sergilediği görülmüştür.
- %4 NS ve %6 NS modifiyeli bağlayıcıların gerilme artışından en az etkilenen bağlayıcılar olduğu belirlenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Ouyang C, Wang S, Zhang Y, Zhang Y. Improving the Aging Resistance of Asphalt by Addition of Zinc Dialkyldithiophosphate. *Fuel* 2006; 85(7-8): 1060-1066.
- [2] Moghadas Nejad F, Tanzadeh R, Tanzadeh J, Hamed GH. Investigating the Effect of Nanoparticles on the Rutting Behaviour of Hot-Mix Asphalt. *Int. J. Pavement Eng.* 2016; 17(4): 353-362.
- [3] Al-Sabaei AM, Napiyah MB, Sutanto MH, Alaloul WS, Zoorob SE, Usman A. Influence of Nanosilica Particles on the High-Temperature Performance of Waste Denim Fibre-Modified Bitumen. *Int. J. Pavement Eng.* 2022; 23(2): 207-220.
- [4] Bala N, Napiyah M, Kamaruddin I. Nanosilica Composite Asphalt Mixtures Performance-Based Design and Optimisation Using Response Surface Methodology. *Int. J. Pavement Eng.* 2020; 21(1): 29-40.
- [5] Kong D, Du X, Wei S, Zhang H, Yang Y, Shah SP. Influence of Nano-Silica Agglomeration on Microstructure and Properties of the Hardened Cement-Based Materials. *Constr. Build. Mater.* 2012; 37: 707-715.
- [6] Yusoff NIM, Breem AAS, Alattug HNM, Hamim A, Ahmad J. The Effects of Moisture Susceptibility and Ageing Conditions on Nano-Silica/Polymer-Modified Asphalt Mixtures. *Constr. Build. Mater.* 2014; 72: 139-147.
- [7] Yao H, You Z, Li L, Lee CH, Wingard D, Yap YK, Shi X, Goh SW. Rheological Properties and Chemical Bonding of Asphalt Modified with Nanosilica. *J. Mater. Civ. Eng.* 2013; 25(11): 1619-1630.
- [8] Fimi EH, Hajikarimi P, Rahi M, Moghadas Nejad F. Physicochemical, Rheological, and Oxidative Aging Characteristics of Asphalt Binder in the Presence of Mesoporous Silica Nanoparticles. *J. Mater. Civ. Eng.* 2016; 28(2).
- [9] Uluçaylı M. Türkiye'de Asfalt Beton Kaplamalar ve Alternatifleri. *Karayolları Tek. Bülten* 1976.
- [10] Han L, Zheng M, Li J, Li Y, Zhu Y, Ma Q. Effect of Nano Silica and Pretreated Rubber on the Properties of Terminal Blend Crumb Rubber Modified Asphalt. *Constr. Build. Mater.* 2017; 157: 277-291.
- [11] Al-Sabaei AM, Napiyah M, Sutanto M, Alaloul W, Md Yusoff NI, Imran Khan M, Modibbo Saeed S. Physicochemical, Rheological and Microstructural Properties of Nano-Silica Modified Bio-Asphalt. *Constr. Build. Mater.* 2021; 297: 123772.
- [12] Samsudin MS, Arshad AK, Masri KA, Rawi SN, Hassan HM, Mustakim NH. Characterisation of Colloidal Nanosilica Modified Asphalt Binder. *J. Phys. Conf. Ser.* 2021; 1874(1).
- [13] Taherkhani H, Afrooz S. Investigating the Creep Properties of Asphaltic Concrete Containing Nano-Silica. *Sādhanā* 2018; 43(2): 24.
- [14] Zghair HH, Jony H, Hassan M. Rheological Characteristics of Nano Silica Modified Asphalt Binder Material. In: 2019 Int. Eng. Conf. IEEE 2019; 79-84.
- [15] Rezaei S, Ziari H, Nowbakht S. Low Temperature Functional Analysis of Bitumen Modified with Composite of Nano-SiO₂ and Styrene Butadiene Styrene Polymer. *Pet. Sci. Technol.* 2016; 34(5): 415-421.
- [16] Rezaei S, Khordehbinan M, Fakhrefatemi S-M-R, Ghanbari S, Ghanbari M. The Effect of Nano-SiO₂ and the Styrene Butadiene Styrene Polymer on the High-Temperature Performance of Hot Mix Asphalt. *Pet. Sci. Technol.* 2017; 35(6): 553-560.
- [17] Akpolat M, Kök BV, Aydoğmuş E. Research on the Rheological Properties of Asphalt Binder Modified by Fume Silica and Crumb Rubber Compound. *Period. Polytech. Civ. Eng.* 2022.
- [18] Sukhija M, Saboo N, Yadav AK, Rath C. Laboratory Study on the Suitability of Nano-Silica as a Modifier for Asphalt Binders. *Constr. Build. Mater.* 2021; 302(April): 124406.
- [19] Motamedi M, Shafabakhsh G, Azadi M. Evaluating Fatigue-Damage of Asphalt Binder and Mastic Modified with Nano-Silica and Synthesized Polyurethane Using VECD Method. *J. Mater. Civ. Eng.* 2020; 32(8).

- [20] Bhat FS, Mir MS. Rheological Investigation of Asphalt Binder Modified with Nanosilica. *Int. J. Pavement Res. Technol.* 2021; 14(3): 276–287.
- [21] Leiva-Villacorta F, Vargas-Nordbeck A. Optimum Content of Nano-Silica to Ensure Proper Performance of an Asphalt Binder. *Road Mater. Pavement Des.* 2019; 20(2): 414–425.
- [22] Arshad AK, Samsudin MS, Masri KA, Karim MR, Abdul Halim AG. Multiple Stress Creep and Recovery of Nanosilica Modified Asphalt Binder. *MATEC Web Conf.* 2017; 103: 09005.
- [23] Ghanoun SA, Tanzadeh J. Laboratory Evaluation of Nano-Silica Modification on Rutting Resistance of Asphalt Binder. *Constr. Build. Mater.* 2019; 223: 1074–1082.
- [24] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). *Standard Method of Test for Penetration of Bituminous Materials.* USA: 2007.
- [25] American Association of State and Highway Transportation Officials. “AASHTO T53-09 Standard Method of Test for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus).” 2004.
- [26] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). *AASHTO T316-Standard Method of Test for Viscosity Determination of Asphalt Binder Using Rotational Viscometer This Document Is Only for Acquaintance This Document Is Only for Acquaintance.* USA: 2019.
- [27] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). *AASHTO T350-Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer(DSR), vol. i.* USA: 2012.
- [28] AASHTO. *AASHTO M332-Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test.* USA: 2015.
- [29] Wasage TLJ, Stastna J, Zanzotto L. Rheological Analysis of Multi-Stress Creep Recovery (MSCR) Test. *Int. J. Pavement Eng.* 2011; 12(6): 561–568.
- [30] Behnood A, Shah A, McDaniel RS, Beeson M, Olek J. High-Temperature Properties of Asphalt Binders: Comparison of Multiple Stress Creep Recovery and Performance Grading Systems. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 2016; 2574(1): 131–143.
- [31] McLEOD NW. Relationship of Paving Asphalt Temperature Susceptibility as Measured By PVN to Paving Asphalt Specifications, Asphalt Paving Mixture Design and Asphalt Pavement Performance NORMAN W. McLEOD1. *Asph. Paving Technol.* 1989; 58(Group C): 410.
- [32] Morrison GR, Lee JK, Hesp SAM. Chlorinated Polyolefins for Asphalt Binder Modification. *J. Appl. Polym. Sci.* 1994; 54(2): 231–240.
- [33] Rajib B. Mallick TE-K, editor. *Pavement Engineering: Principles and Practice.* CRC Press 2017.

AISI 5140 Çeliğinin Farklı Soğutma Teknikleri Kullanılarak Frezelenmesinin Güç Tüketimi Üzerine Etkileri

Serhat ŞAP^{1*}

¹ Elektrik ve Enerji, Teknik Bilimler MYO, Bingöl Üniversitesi, Bingöl, Türkiye

*¹ ssap@bingol.edu.tr

(Geliş/Received: 30/12/2022;

Kabul/Accepted: 22/02/2023)

Öz: Yüksek mukavemete sahip olan AISI 5140 çeliği genellikle dişli ve mil yapımında kullanılmaktadır. Bu çelikler genellikle talaşlı imalat yöntemleri kullanılarak şekillendirilmektedir. Talaşlı imalat sırasında hızlı takım aşınması ve düşük yüzey kalitesi gibi olumsuz özelliklerin yanında güç tüketimi de fazla olabilmektedir. Bu olumsuz koşulların üstesinden gelebilmek için çevre ve insan sağlığına zararlı olmayan soğutma sıvıları kullanılmaktadır. Bu çalışmada AISI 5140 imalat çeliğinin çevre dostu minimum miktarda yağlama (MMY) koşulları ve farklı kesme parametreleri altında frezelenmesinin güç tüketimine olan etkileri araştırılmıştır. Deney sayısını ve maliyetleri azaltmak amacıyla Taguchi L₉ ortogonal dizisi kullanılmıştır. Kuru, hava ve MMY olmak üzere üç farklı soğutma ortamı seçilmiştir. Kesme parametreleri olarak üç farklı kesme hızı (80-120-160 m/dak) ve üç farklı ilerleme hızı (0.08-0.12-0.16 mm/dev) seçilmiştir. Kesme hızının artmasıyla güç tüketiminin arttığı, ilerleme hızının artmasıyla ise güç tüketiminin bir miktar azaldığı tespit edilmiştir. Kesme ortamı açısından değerlendirildiğinde, kuru ortamdaki MMY ortamına doğru gidildikçe güç tüketimi değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Güç tüketiminde optimum kontrol faktör seviyeleri kesme hızı için 80 m/dak, ilerleme hızı için 0.16 mm/dev ve kesme ortamı için MMY olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak MMY kesme ortamı ile frezelemede güç tüketiminin azaltılabileceği gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: AISI 5140 çeliği, CNC frezeleme, minimum miktarda yağlama, güç tüketimi, Taguchi analizi.

Effects of Milling AISI 5140 Steel Using Different Cooling Techniques on Power Consumption

Abstract: AISI 5140 steel, which has high strength, is generally used in gear and shaft construction. These steels are usually shaped using machining methods. In addition to negative features such as rapid tool wear and low surface quality during machining, power consumption can be high. Coolants that are not harmful to the environment and human health are used to overcome these adverse conditions. This study investigated the effects of milling AISI 5140 manufacturing steel under environmentally friendly minimum quantity lubrication (MQL) conditions and different cutting parameters on power consumption. Taguchi L₉ orthogonal array was used to reduce the number of experiments and costs. Three different cooling environment were selected dry, air, and MQL. Three cutting speeds (80-120-160 m/min) and three feed rates (0.08-0.12-0.16 mm/rev) were selected as cutting parameters. It was determined that the power consumption increases with the increase in cutting speed, and the power consumption decreases slightly with the rise in the feed rate. When evaluated in terms of cutting environment, it was determined that the power consumption values decreased from the dry environment to the MQL environment. The optimum control factor levels in power consumption were 80 m/min for cutting speed, 0.16 mm/rev for feed rate, and MQL for cutting environment. As a result, it was observed that power consumption can be reduced in milling with MQL cutting environment.

Key words: AISI 5140 steel, CNC milling, minimum quantity lubrication, power consumption, Taguchi analysis.

1. Giriş

İmalat sanayisinde sıklıkla kullanılan AISI 5140 çeliği, otomotiv ve inşaat sanayisinde özellikle tercih edilen bir malzemedir. AISI 5140 çeliği yüksek oranda krom içermesi sebebiyle işlenebilirliği oldukça zor olabilmektedir [1]. İşlenebilirliğinin zor olması aynı zamanda güç tüketimini de olumsuz yönde etkilemektedir. Birçok endüstride sürdürülebilir imalat için yeni araştırmalar yapılmaktadır [2, 3]. Sürdürülebilir imalat kavramı ile çevre ve insan sağlığı korunarak enerji verimliliği sağlanmaktadır [4]. Talaşlı imalat sektöründe geleneksel soğutma ve yağlama teknikleri ile hem israf hem de yüksek enerji tüketimi gibi sorunlar yaşanmaktadır [5]. Geleneksel soğutma sıvıları ile yapılan talaşlı imalat işlemlerinde çevre ve insan sağlığına zararlı olan bir takım yağlar kullanılmaktadır [6]. Bu geleneksel kesme sıvıları taşkın soğutma şeklinde kullanıldıkları için aynı zamanda maliyetleri de yüksektir [7]. Oysa daha etkili soğutma teknikleri kullanılarak sürdürülebilir imalat koşulları altında üretim yapılabilir.

* Sorumlu yazar: ssap@bingol.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0001-5177-4952

Sürdürülebilir koşullar altında yapılan soğutma tekniklerinden biri de minimum miktarda yağlama (MMY) sistemidir. Bu sistemde minimum miktarda sıvı kesme bölgesine basınçlı ve buğu şeklinde gönderilerek mükemmel bir soğutma yapılabilir [8]. Kesme sıvısı çok az miktarda kullanıldığı için maliyetlerde azaltılabilmektedir. Kamata ve Obikawa [9] nikel tabanlı Inconel 718 süper alaşımını MMY koşulları altında işlenebilirlik özelliklerini araştırdılar. MMY ortamı kullanılan tornalamada optimum hava basıncı ömrü elde edilmiştir. Ayrıca MMY kullanımı ile daha kaliteli bir yüzey elde edildiği bildirilmiştir. Race vd. [10] SA516 karbon çeliğinin frezelenmesinde MMY tekniğini kullanarak takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve enerji tüketimini araştırmışlardır. Sonuç olarak MMY ortamında yapılan işleme ile daha fazla enerji tasarrufu sağlandığı bildirilmiştir. Ayrıca taşma soğutmaya kıyasla daha fazla çevresel avantaj elde edilmiştir. Sarıkaya ve Güllü [11] AISI 1050 çeliğini MMY koşullarında tornalamanın yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü üzerindeki en etkili parametrenin ilerleme hızı olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca MMY koşullarında en mükemmel yüzey kalitesinin elde edildiğini rapor etmişlerdir.

Yüksek kalitede sistemler tasarlamak için birçok analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden biri de Taguchi tekniğidir. Bu teknik ile sistematik bir yaklaşım kullanılarak tasarımlar, performans ve maliyet açısından optimize edilebilmektedir. Taguchi tasarımı ile tasarım parametreleri optimize edilebilir ve sistem performansı artırılabilir [12]. Son zamanlarda Taguchi tekniği ilgi görmekte ve birçok araştırmacı deneylerini bu yöntemi kullanarak tasarlamaktadır [13-16]. Bilga vd. [17] çok katmanlı kaplamalı EN 353 çeliğinin CNC tornalanmasını Taguchi yöntemini kullanarak araştırmışlardır. Sonuç olarak EN 353 çeliğinin geleneksel tornalama koşullarına kıyasla; enerji verimliliği (EE), makine tarafından tüketilen aktif enerji (AECM) ve güç faktörü (PF) parametrelerinde sırasıyla % 61,776, % 57,025 ve % 7,49'luk bir iyileşme sağlandığını kaydetmişlerdir. Mia vd. [18] AISI 1060 çeliğini MMY koşullarında tornalayarak Taguchi yöntemi ile analiz etmişlerdir. Sonuç olarak yapılan kantitatif analiz ile kesme hızının yüzey pürüzlülüğünü etkilediği bildirilmiştir. Ayrıca varyans analizi ile kesme hızının, ilerleme hızının ve talaş derinliğinin yanıt tepkileri üzerindeki etkileri belirlenmiştir.

Bu çalışmada imalat sektöründe kullanılan AISI 5140 çeliğinin MMY şartlarında CNC frezelenmesinin güç tüketimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla üç farklı kesme hızı, üç farklı ilerleme hızı ve tek kesme derinliği seçilmiştir. Deney tasarımında Taguchi L₉ ortogonal dizisi kullanılmıştır. Elde edilen bulgular ile güç tüketimi üzerinde en etkili kontrol faktörleri belirlenmiştir. Ayrıca 3B yüzey grafikleri ile MMY ve kesme parametrelerinin etkileri tartışılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Mevcut çalışmada AISI 5140 imalat çeliği deney malzemesi olarak kullanılmıştır. Bu imalat çeliği birçok endüstride kalıp, dişli, mil vb. malzemelerin yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Tablo 1, AISI 5140 imalat çeliğinin kimyasal içeriğini temsil etmektedir.

Tablo 1. AISI 5140 imalat çeliğinin kimyasal bileşimi [19].

Elementler	C	Si	Mn	P	S	Cr
Ağırlıkça %	0.45	0.3	0.75	0.035	0.03	1

Frezeleme deneyleri için beş adet numune (80x20 mm) hazırlanmıştır. Numunelerin her bir yüzeyi üzerine birer adet frezeleme yapılmıştır. Kesme işlemlerinde AlTiN kaplanmış karbür kesici uçlar kullanılmıştır. İşlenebilirlik deneyleri Dahlih MCV-860 CNC dik işleme freze tezgahında yapılmıştır. Şekil 1, deneylerin yapıldığı takım tezgahını göstermektedir.



Şekil 1. Deneylerde kullanılan takım tezgahı ve deney düzeneği [19].

Yapılan ön deneyler ve üretici firma tavsiyeleri dikkate alınarak üç farklı kesme hızı (80-120-160 m/dak), üç farklı ilerleme hızı (0.080-0.120-0.160 mm/dev) ve tek kesme derinliği (0.5 mm) seçilmiştir. Soğutma/yağlama koşulları olarak kuru, hava ve MMY ortamları kullanılmıştır. Basınçlı hava, takım tezgahına monte edilen bir kompresör yardımıyla kesme bölgesine aktarılmıştır. MMY sistemi için ise Werte STN 15 model bir püskürtme cihazı kullanılmıştır. MMY sistemi kesme bölgesine yaklaşık 200 mm mesafede ve 40° açıyla konumlandırılmıştır. Tablo 2’de frezeleme parametreleri ve seviyeleri görülmektedir. Deney tasarımı Tablo 3’te gösterilmektedir. Frezeleme deneylerinde optimum değerlerin belirlenmesi için Taguchi L₉ deney tasarımı uygulanmıştır. Taguchi yönteminde deneylerden elde edilen sonuçlar ve arzu edilen değerler arasındaki korelasyon için bir fonksiyon kullanılmaktadır. Bu fonksiyon Minitab yazılımı ile bir sinyal/gürültü (S/N) oranı haline dönüştürülür. Deneylerde elde edilen sonuçlarda en küçük değerler daha iyi olduğu için “daha küçük olan en iyi” seçeneği uygulanmıştır. Denklem (1) ile S/N oranları elde edilmiştir.

$$S/N_{\text{daha küçük olan en iyi}} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y^2) \right] \quad (1)$$

Tablo 2. Frezeleme parametreleri ve seviyeleri [19].

Frezeleme parametreleri	Birim	Seviyeler		
		1	2	3
A-Kesme ortamı	-	Kuru	Hava	MMY
B-Kesme hızı, (V _c)	m/dak	80	120	160
C-İlerleme hızı, (f _n)	mm/dev	0.08	0.12	0.16

Tablo 3. Taguchi L₉ (3³) deney tasarımı [19].

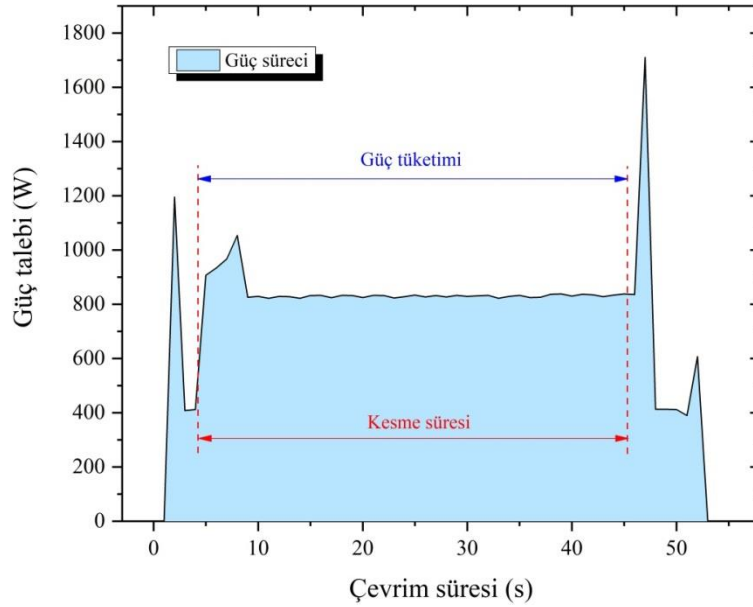
Deney numarası	Kesme hızı (m/dak)	İlerleme hızı (mm/dev)	Kesme ortamı
1	80	0.08	Kuru
2	80	0.12	Hava
3	80	0.16	MMY
4	120	0.08	Hava
5	120	0.12	MMY
6	120	0.16	Kuru
7	160	0.08	MMY
8	160	0.12	Kuru
9	160	0.16	Hava

HIOKI-PW3198 model bir güç analizörü deneyler sırasında harcanan gücün belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Şekil 2, kullanılan güç analizörünü göstermektedir. Güç analizörünün maşaları takım tezgahının gerekli kablolarına bağlanmıştır. Güç analizöründen elde edilen ham verilerden özel bir yazılım aracılığı ile

harcanan toplam güç hesaplanmıştır. Şekil 3'te işlenen bir numune için gerekli güç miktarı ve süre gösterilmektedir.



Şekil 2. Güç tüketiminin belirlenmesi için kullanılan analizör.

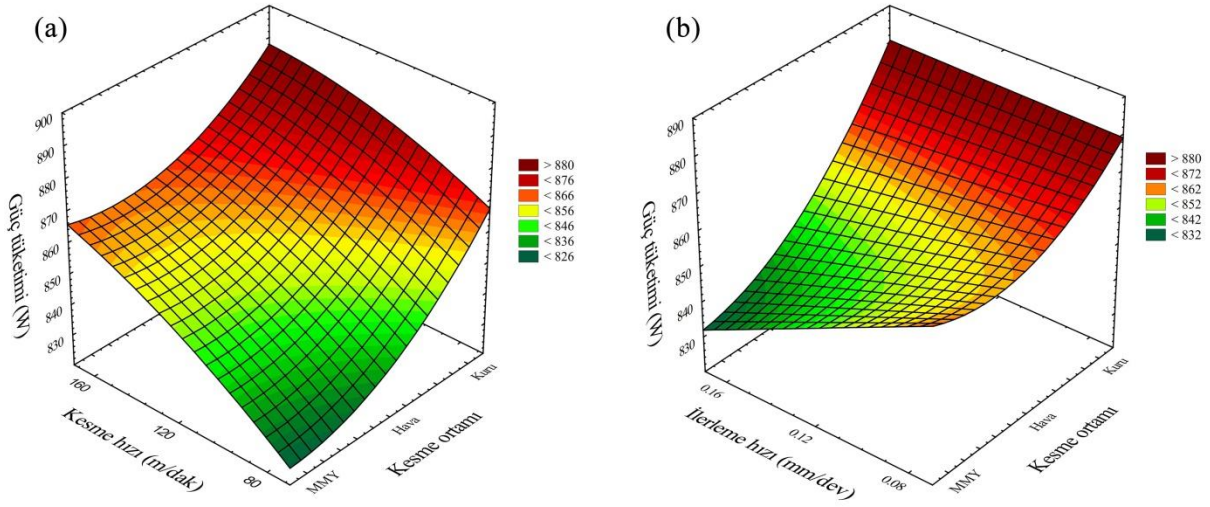


Şekil 3. 6 no'lu deneyde tüketilen enerji ve süresi

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Güç Tüketimi Analizi

Son yıllarda gittikçe artan sağlık sorunları ve verimli enerji üretimi küresel bir sorun haline gelmektedir [20]. Bu nedenle üretim endüstrilerinin enerji tüketimini azaltmak konusunda oldukça çaba göstermesi gerekmektedir. Enerji maliyetlerinin artması, küresel ısınma ve yüksek karbon emisyonları, enerji tüketimini kontrol altında tutmak için yeterli sebeplerdir [21]. Bir malzemenin farklı şekillerde üretilebilmesi için imalat sektöründe takım tezgahları yaygın olarak kullanılmaktadır. Takım tezgahları üzerinde bulunan aksesuarlar (soğutma sistemleri, işleme parametreleri ve işleme koşulları) oldukça fazla enerji tüketebilmektedir. İmalat sektörünün gelişmesiyle birlikte düşük maliyetli ve çevreye zarar vermeyen sürdürülebilir kesme sıvıları kullanılmaya başlamıştır [22]. Şekil 4, AISI 5140 çeliğinin frezlenmesi sonucu harcanan güç tüketiminin kesme parametreleri ile ilişkisini gösteren 3B yüzey grafiklerini temsil etmektedir. Grafikler incelendiğinde kesme hızının artmasıyla güç tüketiminin arttığı, ilerleme hızının artmasıyla ise güç tüketiminin bir miktar azaldığı görülmektedir. Uygun kesme parametrelerinin seçimi ile takım ömrü artırılabilir ve güç tüketiminin azaltılabileceği bildirilmiştir [23].

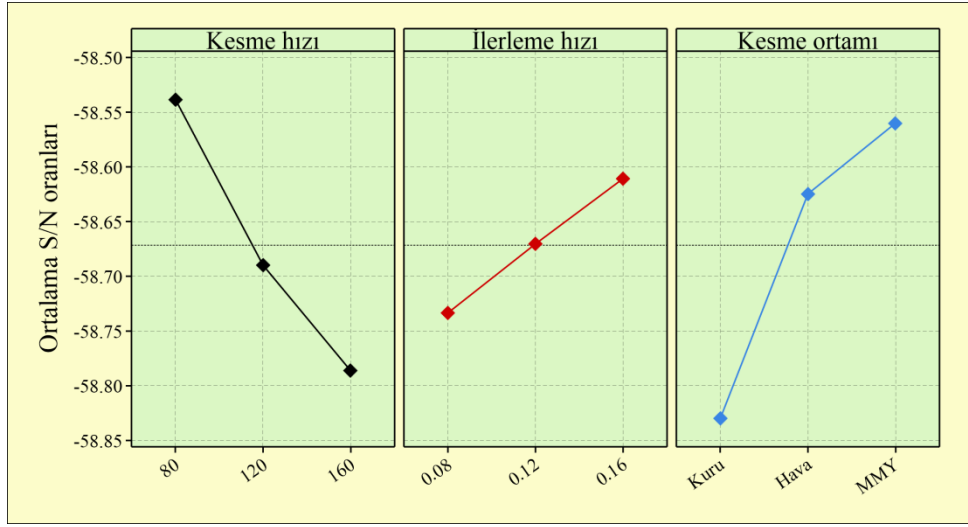


Şekil 4. AISI 5140 çeliğinin frezelenmesi sırasında harcanan güç tüketiminin farklı kesme parametreleri ile ilişkisini gösteren 3B yüzey grafikleri; a) Kesme hızı-Kesme ortamı, b) ilerleme hızı-Kesme ortamı.

Camposeco-Negrete [24] AISI 6061 T6 alüminyumun tornalanmasında tepki yüzey yöntemi (RSM) kullanarak kesme parametrelerini optimize etmiştir. Enerji tüketimi ve yüzey pürüzlülüğünün aynı anda optimize edildiği bildirilmiştir. Aynı zamanda tüketilen enerjinin azaltılmasında ilerleme hızı ve kesme derinliğinin en önemli faktörler olduğu rapor edilmiştir. Grafikler kesme ortamı açısından değerlendirildiğinde, kuru ortamdan MMY ortamına doğru gidildikçe güç tüketimi değerlerinin azaldığı görülmektedir. En iyi kesme ortamının MMY ortamı olduğu tespit edilmiştir. En düşük güç tüketimi 830 W (kesme hızı 80 m/dak, ilerleme hızı 0.16 mm/dev, kesme ortamı MMY) olarak kayıt altına alınmıştır. Benzer sonuçlar birçok araştırmacı tarafından bildirilmiştir. Ji vd. [25] Ti6Al4V alaşımının delinmesi sırasında farklı soğutma/yağlama teknikleri kullanarak enerji tüketimini araştırdılar. MMY soğutma/yağlama tekniği ile enerji tüketimi değerlerinin azaldığını rapor etmişlerdir. Kuru ortamda yapılan işlenebilirlik uygulamalarında sürtünmeden dolayı daha fazla takım aşınması meydana gelmektedir. Takım aşınmasının artmasıyla enerji tüketimi de artabilmektedir [26].

3.2. İstatistiksel analiz

Yanıt parametresi ve her bir kontrol faktörünün tüm seviyeleri için S/N oranları ve ortalamaları Şekil 5'te gösterilmektedir. Grafiğin ortasında bulunan referans çizgisinin altında kalan bölge artışı, üst kısmında kalan bölge ise azalmayı temsil etmektedir. Grafik incelendiğinde; kesme hızındaki artışla güç tüketiminin arttığı, ilerleme hızındaki artışla güç tüketiminin azaldığı görülmektedir. Kesme ortamı açısından değerlendirildiğinde MMY tekniği ile yapılan soğutma/yağlamanın güç tüketimini azalttığı tespit edilmiştir. Güç tüketimi için optimum kontrol faktör seviyeleri kesme hızı için 80 m/dak, ilerleme hızı için 0.16 mm/dev ve kesme ortamı için MMY olduğu belirlenmiştir. Tablo 4'te güç tüketiminin deney sonuçları, tahmin edilen sonuçlar ve S/N oranları gösterilmektedir.



Şekil 5. G tetimi için S/N oranlarının ana etki grafiği.

Tablo 4. G tetimi deneysel, tahmini sonuçlar ve S/N oranları.

Deneş numarası	G tetimi (W)	Tahmini g tetimi (W)	Güç tetimi için S/N oranları (dB)
1	871	867	-58.8004
2	835	840	-58.4337
3	830	828	-58.3816
4	863	861	-58.7202
5	853	849	-58.6190
6	864	869	-58.7303
7	859	864	-58.6799
8	887	885	-58.9585
9	863	859	-58.7202

G tetimi için varyans analizi (ANOVA) sonuçları Tablo 5'te gösterilmektedir. Tabloda g tetimi üzerinde etkili olan kontrol faktörleri görülmektedir. G tetimini; kesme hızının % 37.308, ilerleme hızının % 9.027 ve kesme ortamının % 47.432 oranında etkilediği belirlenmiştir. Hata oranı % 6.233 olarak kaydedilmiştir. Analizler % 95 güven seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Böylece g tetimi üzerinde en fazla etkiye sahip kontrol faktörünün kesme ortamı, en az etkiye sahip kontrol faktörünün ise ilerleme hızı olduğu gözlenmiştir.

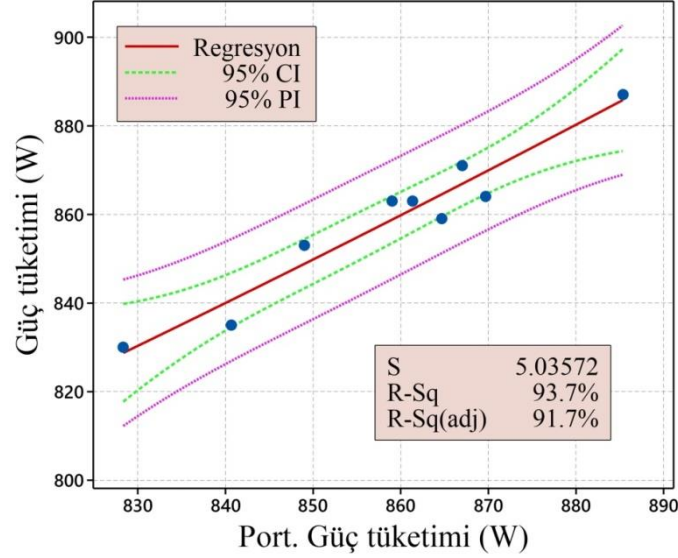
Tablo 5. G tetimi için ANOVA sonuçları.

Kaynak	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Katkı oranı (%)
G tetimi							
A-Kesme hızı (m/dak)	2	0.09349	0.09349	0.046745	5.99	0.143	37.308
B-İlerleme hızı (mm/dev)	2	0.02262	0.02262	0.011312	1.45	0.408	9.027
C-Kesme ortamı	2	0.11886	0.11886	0.059428	7.61	0.116	47.432
Hata oranı	2	0.01562	0.01562	0.007808	-	-	6.233
Toplam	8	0.25059	-	-	-	-	100.000

Regresyon analizi, en az bir yanıt parametresi ile bir ya da birden fazla bağımsız değişken arasında ilişkili olan farklı değişkenlerin modellenmesi amacıyla yapılmaktadır [27]. Bu çalışmada bağımlı değişken olan yanıt parametresi g tetimi, bağımsız değişkenler ise kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme ortamıdır. G tetiminin tahmin denklemini elde etmek amacıyla regresyon analizi yapılmıştır. Tahmin denklemini ikinci dereceden regresyon modeli için tasarlanmıştır. G tetimi için ikinci dereceden regresyon modeli ile elde edilen denklem 2 aşağıda gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 6'da deney sonuçları ve ikinci dereceden regresyon modeli ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmaktadır. Tahmin edilen sonuçlar ile deney sonuçları arasında çok iyi bir ilişki olduğu görülmektedir. G tetimi için ikinci dereceden regresyon modeli ile elde edilen denklemin R^2 değeri % 93.7

olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak ikinci dereceden regresyon modelinin güç tüketimi tahmininde başarılı olduğu anlaşılmaktadır.

$$\text{Güç tüketimi} = 575 - 0.344 \times P_{\text{ort. Güç}} + 0.000785 \times P_{\text{ort. Güç}}^2 \quad (2)$$



Şekil 6. Güç tüketimi için regresyon analizi.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada AISI 5140 imalat çeliğinin farklı soğutma/yağlama ortamlarında ve farklı kesme parametreleri altında frezelenmesinin güç tüketimi üzerindeki etkileri Taguchi analizi kullanılarak araştırılmıştır. Sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Kesme hızının artmasıyla güç tüketiminin arttığı, ilerleme hızının artmasıyla ise güç tüketiminin bir miktar azaldığı tespit edilmiştir.
- Kesme ortamı açısından değerlendirildiğinde, kuru ortamdan MMY ortamına doğru gidildikçe güç tüketimi değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. En iyi kesme ortamının MMY ortamı olduğu tespit edilmiştir. En düşük güç tüketiminin 830 W (kesme hızı 80 m/dak, ilerleme hızı 0.16 mm/dev, kesme ortamı MMY) olduğu gözlenmiştir.
- Güç tüketiminde optimum kontrol faktör seviyeleri kesme hızı için 80 m/dak, ilerleme hızı için 0.16 mm/dev ve kesme ortamı için MMY olduğu belirlenmiştir. Ayrıca ikinci dereceden regresyon modeli oluşturularak elde edilen tahmin denklemi ile % 93.7 oranında başarılı bir analiz gerçekleştirilmiştir.

Kaynaklar

- [1] Kuntoğlu M, Acar O, Gupta MK, Sağlam H, Sarıkaya M, Giasin K, et al. Parametric Optimization for Cutting Forces and Material Removal Rate in the Turning of AISI 5140. Machines. 2021;9(5).
- [2] Şap S, Ultra Yüksek Mukavemetli S1100 Çeliğinin MQL koşullarında Frezelenmesinin Takım Aşınması Üzerindeki Etkileri. 4 th International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences; 2022 November 10-13, 2022; Konya/Turkey.
- [3] Usca ÜA, Şap S, Uzun M, Kuntoğlu M, Salur E, Karabiber A, et al. Estimation, Optimization and Analysis Based Investigation of the Energy Consumption in Machinability of Ceramic-Based Metal Matrix Composite Materials. J Mater Res Technol. 2022;17:2987-98.
- [4] Şap S, Usca ÜA, Uzun M, Kuntoğlu M, Salur E, Pimenov DY. Investigation of the Effects of Cooling and Lubricating Strategies on Tribological Characteristics in Machining of Hybrid Composites. Lubricants. 2022;10(4):63.
- [5] Salur E. Understandings the tribological mechanism of Inconel 718 alloy machined under different cooling/lubrication conditions. Tribol Int. 2022;174:107677.

- [6] Usca ÜA, Şap S, Uzun M. Evaluation of Machinability of Cu Matrix Composite Materials by Computer Numerical Control Milling under Cryogenic LN2 and Minimum Quantity Lubrication. *J Mater Eng Perform.* 2022;1-15.
- [7] Salur E, Kuntoğlu M, Aslan A, Pimenov DY. The Effects of MQL and Dry Environments on Tool Wear, Cutting Temperature, and Power Consumption during End Milling of AISI 1040 Steel. *Metals.* 2021;11(11):1674.
- [8] Şap E, Usca ÜA, Uzun M. Machining and optimization of reinforced copper composites using different cooling-lubrication conditions. *J Braz Soc Mech Sci & Eng.* 2022;44(9):399.
- [9] Kamata Y, Obikawa T. High speed MQL finish-turning of Inconel 718 with different coated tools. *J Mater Process Technol.* 2007;192-193:281-6.
- [10] Race A, Zwierzak I, Secker J, Walsh J, Carrell J, Slatter T, et al. Environmentally sustainable cooling strategies in milling of SA516: Effects on surface integrity of dry, flood and MQL machining. *J Clean Prod.* 2021;288:125580.
- [11] Sarıkaya M, Güllü A. Taguchi design and response surface methodology based analysis of machining parameters in CNC turning under MQL. *J Clean Prod.* 2014;65:604-16.
- [12] Yang WH, Tarn YS. Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method. *J Mater Process Technol.* 1998;84(1):122-9.
- [13] Singh SP, Geethan KAV, Elilraja D, Prabhuram T, Durairaj JI. Optimization of dry sliding wear performance of functionally graded Al6061/20% SiC metal matrix composite using Taguchi method. *Materials Today: Proceedings.* 2020;22:2824-31.
- [14] Sekar K, Vasanthakumar P. Mechanical properties of Al-Cu alloy metal matrix composite reinforced with B4C, Graphite and Wear Rate Modeling by Taguchi Method. *Materials Today: Proceedings.* 2019;18:3150-9.
- [15] Saravanan S, Senthilkumar P, Ravichandran M, Shivasankaran N. Wire electrical discharge machining of AA6063-TiC particle reinforced metal matrix composites using Taguchi method. *Mater Res Express.* 2018;5(10).
- [16] Şap E. Investigation of mechanical properties of Cu/Mo-SiCp composites produced with P/M, and their wear behaviour with the Taguchi method. *Ceram Int.* 2021;47(18):25910-20.
- [17] Bilga PS, Singh S, Kumar R. Optimization of energy consumption response parameters for turning operation using Taguchi method. *J Clean Prod.* 2016;137:1406-17.
- [18] Mia M, Dey PR, Hossain MS, Arafat MT, Asaduzzaman M, Shoriat Ullah M, et al. Taguchi S/N based optimization of machining parameters for surface roughness, tool wear and material removal rate in hard turning under MQL cutting condition. *Measurement.* 2018;122:380-91.
- [19] Şap S. AISI 5140 İslah Çeliğinin Minimum Miktarla Yağlama Ortamı Altında Frezelenmesinin Takım Aşınması Üzerindeki Etkileri. 4 International Scientific Research and Innovation Congress (ISARCH); 24.12.2022; İstanbul2022. p. 915-24.
- [20] Sarıkaya M, Yılmaz V, Güllü A. Analysis of cutting parameters and cooling/lubrication methods for sustainable machining in turning of Haynes 25 superalloy. *J Clean Prod.* 2016;133:172-81.
- [21] Bagaber SA, Yusoff AR. Energy and cost integration for multi-objective optimisation in a sustainable turning process. *Measurement.* 2019;136:795-810.
- [22] Yıldırım ÇV, Kıvak T, Sarıkaya M, Şirin Ş. Evaluation of tool wear, surface roughness/topography and chip morphology when machining of Ni-based alloy 625 under MQL, cryogenic cooling and CryoMQL. *J Mater Res Technol.* 2020;9(2):2079-92.
- [23] Camposeco-Negrete C, de Dios Calderón Nájera J, Miranda-Valenzuela JC. Optimization of cutting parameters to minimize energy consumption during turning of AISI 1018 steel at constant material removal rate using robust design. *Int J Adv Manuf Technol.* 2016;83(5):1341-7.
- [24] Camposeco-Negrete C. Optimization of cutting parameters using Response Surface Method for minimizing energy consumption and maximizing cutting quality in turning of AISI 6061 T6 aluminum. *J Clean Prod.* 2015;91:109-17.
- [25] Ji M, Xu J, Chen M, Mansori ME. Effects of different cooling methods on the specific energy consumption when drilling CFRP/Ti6Al4V stacks. *Procedia Manuf.* 2020;43:95-102.
- [26] Usca ÜA, Uzun M, Şap S, Giasin K, Pimenov DY, Prakash C. Determination of machinability metrics of AISI 5140 steel for gear manufacturing using different cooling/lubrication conditions. *J Mater Res Technol.* 2022;21:893-904.
- [27] Cetin MH, Ozcelik B, Kuram E, Demirbas E. Evaluation of vegetable based cutting fluids with extreme pressure and cutting parameters in turning of AISI 304L by Taguchi method. *J Clean Prod.* 2011;19(17):2049-56.

Evrişimsel Sinir Ağı Mimarileri ve Öğrenim Aktarma ile Bitki Zararlısı Çekirge Türlerinin Sınıflandırması

Nurullah ŞAHİN^{1*}, Nuh ALPASLAN², Mustafa İLÇİN³, Davut HANBAY⁴

^{1,4} Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye

² Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Bingöl Üniversitesi, Bingöl, Türkiye

³ Bitki Koruma Bölümü, Ziraat Fakültesi, Bingöl Üniversitesi, Bingöl, Türkiye

*¹ nursahin.net@gmail.com, ² nalpaslan@bingol.edu.tr, ³ milcin@bingol.edu.tr, ⁴ davut.hanbay@inonu.edu.tr

(Geliş/Received: 03/01/2023;

Kabul/Accepted: 15/02/2023)

Öz: Çekirgeler, mahsullere zarar vererek her yıl milyonlarca ton gıdanın yok olmasına neden olmaktadır. Etkili ve doğru çekirge tanımlama sistemlerinin geliştirilmesi, çekirge türlerinin kontrol altına alınması ve gıda kaybının önlenmesinde kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, ülkemizin ve dünyanın çeşitli yerlerinde görülen 11 farklı bitki zararlısı çekirge türü çeşitli evrişimsel sinir ağı modelleri kullanılarak sınıflandırılmıştır. Çalışmada kullanılan veri seti ülkemizin Doğu ve Güneydoğu Anadolu bölgesinde gözlemlenerek elde edilmiştir. Bu çalışmanın en büyük yeniliği, ülkemizde bulunan 11 farklı bitki zararlısı çekirge türüne ait GHCD11 adında yeni bir veri setinin oluşturulmuş olmasıdır. Bunun yanında, çalışmada 11 farklı bitki zararlısı çekirge türünün otomatik olarak sınıflandırılması için Keras kütüphanesinde bulunan ve görüntü sınıflandırmasında yaygın olarak kullanılan VGG16, VGG19, ResNet50, DenseNet121, EfficientNet, MobileNet kullanılmıştır. Öğrenme aktarımı ile GHCD11 veri seti üzerinde yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, %95 ile %99 aralığında kayda değer sınıflandırma doğrulukları elde edilmiştir. Çalışma yeni bir veri seti sunmasının yanı sıra, bitki zararlısı çekirge türlerinin evrişimsel sinir ağı mimarileri ile otomatik tanı ve tespitinin yüksek başarımla yapılabilmesini göstermesi açısından önem arz etmektedir.

Anahtar kelimeler: Çekirge, sınıflandırma, görüntü işleme, derin öğrenme, evrişimsel sinir ağı.

Classification of Plant Pest Grasshopper Species by Convolutional Neural Network Architectures and Transfer Learning

Abstract: Grasshoppers damage crops and causes millions of tons of food to be destroyed every year. The development of effective and accurate locust identification systems is critical in controlling locust species and preventing food loss. In this study, 11 different plant pest grasshopper species seen in various parts of our country and the world were classified using various convolutional neural network models. The dataset used in the study was obtained by observing the Eastern and Southeastern Anatolia regions of our country. The novelty of this study is that a dataset named GHCD11 has been created for 11 different plant pest grasshopper species in our country. In addition, VGG16, VGG19, ResNet50, DenseNet121, EfficientNet, MobileNet, which are in the Keras library and are widely used in image classification, were used for the automatic classification of 11 different grasshopper species in the study. As a result of experimental studies on the GHCD11 dataset with learning transfer, remarkable classification accuracies in the range of 95% to 99% were obtained. The study is important because it not only presents a novel dataset, but also demonstrates that automatic identification and detection of plant pest grasshopper species can be done with high accuracy using convolutional neural network architectures.

Key words: Grasshopper, classification, image processing, deep learning, convolutional neural network.

1. Giriş

Artan nüfus yoğunluğu, gıda güvenliği problemini geleceğin önemli sorunlarından biri haline getirmektedir. Tarım zararlıları ile etkili mücadele bu problemin çözümünde ve tarımsal ürünlerin verimliliğinin artırılmasında önemli bir yere sahiptir [1]. Böcekler, tarım ürünleri ile beslenerek, ürünlerde verim düşüklüğüne veya doğrudan ürün kaybına neden olabilmektedir [2]. Bu böcekler ile mücadele ve böcekleri yok etmek maliyetli bir iştir ve milyonlarca dolara mal olabilir. Doğru haşere ilaçlarının kullanılarak etkili bir mücadele yapılabilmesi için belirli düzeyde bir uzman eğitimi gerekmektedir. Ayrıca kimyasal haşere ilaçlarının kapsamlı kullanımı zararlı çevresel etkilere neden olmaktadır [3]. Bahsedilen nedenlerden ötürü tarımsal haşerelerin erken ve doğru tespiti, zararlılarla mücadele ve gıda güvenliğinin sağlanmasında kritik öneme sahiptir. Dünyada çok sayıda zararlı türü bulunmakta ve farklı türler arasında benzerlikler bulunmaktadır. Ayrıca, haşere tanımlama görevi zaman alıcı bir süreçtir ve

* Sorumlu yazar: nursahin.net@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-3578-9959, ² 0000-0002-6828-755X, ³ 0000-0002-2542-9503, ⁴ 0000-0003-2271-7865

tarla bitkileri hakkında uzman bilgisi gerektirmektedir. Bu nedenlerden ötürü, zararlı türlerinin uzman entomologlar tarafından klasik yöntemlerle sınıflandırılması ve tanımlanması zorlu bir süreçtir. Zararlı türlerinin tam olarak anlaşılması, böcek taksonomisi ve morfolojik özelliklerin terminolojisini gerektirir. Bu nedenle, tür düzeyinde zararlı kategorilerini ayırt etmek zordur, bu da mahsul kayıplarının artmasına veya pestisitlerin yanlış/aşırı kullanımına yol açmaktadır [4]. Bahsedilen zorluklarla baş edebilmek için son yıllarda böcek tanı/tespitinde bilgisayar destekli tespit sistemleri yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [5]. Bilgisayar destekli görüntü tespit sistemleri, tanıma maliyetini etkin bir şekilde azaltabilir ve hem tanıma hızı hem de verimliliği önemli ölçüde artırılabilir. [6], SIFT öznelik histogramı tabanlı bir taş sineği larvaları sınıflandırma yöntemi önermiştir. [7], görüntülerdeki beyaz sineklerin bölütlenmesi ve sayımı için pikseller arasındaki nispi farkları hesaplayan RDI algoritmasını kullanmıştır. [8], beyaz sinek görüntülerinin bölütlenmesinde, işaretçi kontrollü watershed algoritmasını kullandı ve elde edilen başarıyı ölçme için Fuzzy C-Means algoritması ile sonuçları karşılaştırdı. [9], şeker kamışı pamuk bitlerinin tespitinde C-Means algoritmasına dayanan bir model önerdi. [10], eşek arısı türlerinin sınıflandırılmasında DAISY olarak adlandırılan bir dijital otomatik tanımlama sistemini önerdiler. Önerdikleri sistem, kanat görüntüleri üzerinde kritik özelliklerin çıkarılması için Temel Bileşen Analizi (Principal Component Analysis, PCA) ve temel bileşen analizi ile elde edilen özellik vektörlerinin sınıflandırılması için Kendall- τ istatistik sınıflandırıcı yöntemlerini kullanmaktadır. [11], örümcek tür grubunu tanımlamak için otomatik bir örüntü tanıma sistemi geliştirmiş ve örümcek görüntülerinin temel şekil bilgilerini çıkarmak için dalgacık dönüşümü yöntemini, sınıflandırma işlemi için ise Çok Katmanlı Algılayıcı (Multilayer Perceptron, MLP) kullanmıştır. [12], böcek tespitinde renk özellikleri üzerinde araştırma yapmış ve renk histogramına ve gri-seviye eş oluşturma matrisine dayalı bir böcek tanımlama yöntemi önermiştir.

Geleneksel bilgisayar destekli tanı sistemleri böcek tanı tespitine oldukça katkı sağlamış olsalar da, yine de bir takım eksiklikleri bulunmaktadır. Araziyelerden elde edilen görüntüler yüksek miktarda gürültü içermektedir ve bu gürültü önileme adımları ile giderilmez ise tanımlama başarımını düşürmektedir. Ayrıca geleneksel bilgisayar destekli tespit sistemleri elde edilen veri setine yüksek ölçüde bağımlıdır ve farklı veri setleri üzerinde test edildiklerinde başarımları önemli miktarda düşmektedir [13],[14]. Son yıllarda derin öğrenme tekniklerinin gelişmesi ve derin öğrenme tekniklerinin elde ettikleri yüksek başarımlar nedeniyle birçok araştırmacı bu teknolojiyi yüz tanıma [15], nesne tanıma [16], medikal görüntüleme [17], lezyon bölütleme [18] ve daha pek çok farklı alanlarda uygulamış ve dikkate değer sonuçlar elde etmişlerdir. Derin öğrenme yöntemleri gösterdikleri başarımlardan dolayı bilgisayar destekli haşere tespit yöntemlerinde de yaygın biçimde kullanılmaya başlanmıştır. [19], gelişmiş evrşimsel sinir ağına dayalı bir böcek tespiti ve sınıflandırma modeli önermiştir. Bu çalışmada, böcek görüntülerinden özellik çıkarımı için VGG19 ağı ve böceklerin gerçek konumlarını öğrenmek için bölge öneri ağı (Region Proposal Network, RPN) önerilmiştir. Daha sonra elde edilen özellik haritaları, bir boyutlu vektöre dönüştürülerek sınıflandırma yapılmıştır. [20], çeltik zararlılarının tespitinde, görüntünün segmentasyonu için GrabCut algoritması ve sınıflandırma işlemi için 8 katmandan oluşan bir evrşimsel sinir ağı modeli önermiştir. [21], AlexNet evrşimsel sinir ağına dayalı kullanılan evrşim çekirdeklerinin, böcek türlerinin sınıflandırma başarısı üzerindeki etkisini incelemiştir. [22], böcek türlerinin sınıflandırılması için böcek görüntülerini içeren bir veri seti önermiştir. Sınıflandırma için yalınlığı nedeniyle mobil uygulamalar için tasarlanmış olan MobileNet mimarisini kullanmıştır. [23], derin öğrenmeye dayalı büyük ölçekli çok sınıflı haşere tespiti ve sınıflandırması için PestNet adlı bölge tabanlı uçtan uca bir yaklaşım önermiştir. Çalışmada ilk olarak, her iki evrşimsel blok arasındaki kanal ve uzamsal bilgiyi geliştirmek için Kanal-Uzamsal Dikkat (CSA) modülünü sunulmuştur. İkinci olarak, görüntülerden çıkarılan özellik haritalarına dayalı olarak potansiyel haşere konum tespiti için bölge öneri ağı (RPN) önerilmiştir. Son olarak, sınıflandırma başarımını arttırmak için konum duyarlı skor haritası (Position-Sensitive Score Map -PSSM) modeli sunulmuştur. [24], haşere tanımlamasında, kullanılan derin ağların optimizasyonu için farklı Adam algoritmaları önermiştir. Bu çalışmada, ülkemizin ve dünyanın çeşitli yerlerinde görülen ve tarım ürünlerine zarar veren çekirge türlerinin erken tanı ve tespiti için 11 farklı çekirge türünü içeren (GrassHopper Classification Dataset-GHCD11) bir veri seti önerilmiştir. Bu veri setini oluşturan zararlı türleri ülkemizin Doğu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinde gözlemlenerek elde edilmiştir. Elde edilen görüntüler, ImageNet veri seti üzerinde eğitilmiş VGG16, VGG19, ResNet50, DenseNet121, EfficientNetB0, MobileNet derin öğrenme ağları, sunulan veri tabanı üzerinde öğrenme aktarımı (transfer learning) yapılarak çekirge türlerinin sınıflandırma başarısı üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Önerilen veri seti çalışmanın en önemli katkılardan biridir. Bunun yanında, derin öğrenme tabanlı yöntemlerin ülkemizdeki bitki zararlısı çekirge türlerinin otomatik olarak sınıflandırılmasındaki başarımlarının gözlemlenmesi açısından, yapılan çalışma öncü niteliği taşımaktadır.

Çalışmanın devamı şu şekildedir; Bölüm 2'de, veri seti hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Bölüm 3'te, kullanılan derin öğrenme mimarileri hakkında bilgi sunulmuştur. Bölüm 4'te deneysel sonuçlar verilmiştir ve son olarak Bölüm 5'te elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

2. Materyal

Bu bölümde çalışma kapsamında elde edilen *Acrida bicolor*, *Anacridium aegyptium*, *Calliptamus italicus*, *Dociostaurus maroccanus*, *Notostaurus anatolica*, *Oedipoda miniata miniata*, *Pyrgodera armata*, *Saga ephippigera*, *Schistocerca gregaria*, *Tettigonia caudata*, *Tettigonia viridissima* olmak üzere 11 farklı bitki zararlısı çekirge türü hakkında bilgiler sunulmuştur.

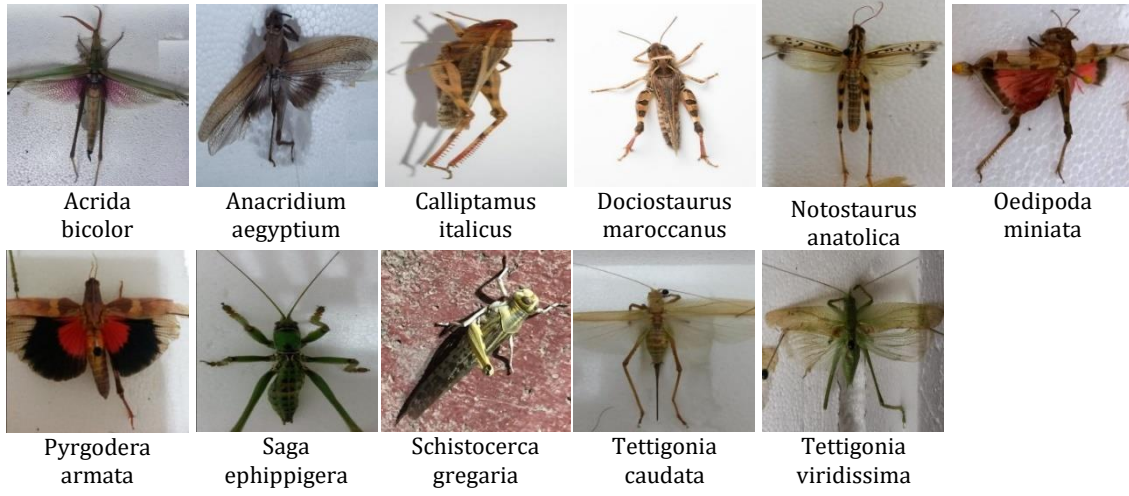
2.1 Veri Seti

Calliptamus italicus, sürü oluşturma özelliğine sahip olan ve Türkiye'nin birçok yerinde görülebilen bir türdür. Bitkisel ürünlere zarar veren bu tür, 2021 yılında Bingöl ili Adalı ilçesindeki birçok tarım arazisine zarar vermiş ve ekonomik kayıplara neden olmuştur [25]. *Dociostaurus maroccanus*, diğer bir adı ile Fas çekirgesi olarak bilinir. Bu tür bahçe ve meyve bahçeleri gibi alanlara zarar verebilir. Türkiye'nin birçok bölgesinde etkili olan bu tür, Bingöl ili kırsal alanları ve hububat tarlalarında ekonomik zarara neden olmuştur [25]. Mısır çekirgesi olarak bilinen *Anacridium aegyptium* türünün ekin alanlarında ekonomik kayıplara neden olduğu kaydedilmiştir. *A. aegyptium* önemli bir bitki zararlısı olmakla beraber, ülkemizin tahıl yetiştirilen alanlarında yaygın olarak görülebilmektedir. *Tettigonia viridissima* türleri çayır, mera ve tahıl alanlarında tespit edilmiş olup yerel olarak yaygın bir türdür. *Tettigonia caudata* türü omnivor olmasına rağmen özellikle pamuk ve yonca bitkilerine zarar verir. Bu tür, *T. viridissima* türü ile aynı cinse ve tipik benzerliklere sahiptir. *Truxalis robusta robusta*, Doğu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinde, özellikle ormanlık alanlarda ve pamuk bitkilerinin yoğun olduğu bölgelerde tespit edilmiştir. *Oedipoda miniata miniata*, en yaygın çekirge türlerinden biri olup, tarla ve bahçelerde kayda değer olmamakla beraber, zarar verdiği tespit edilmiştir. *Notostaurus anatolica*, nimf (instar) aşamasında toplanan belirli kanat ve bacak bantları ile tanınabilen ve vücut desenleri benzersiz olan bir türdür. *Schistocerca gregaria*, sürü oluşturma ve geniş alanlara yayılma yeteneğine sahip nadir çekirge türlerinden biridir. FAO verilerine göre 2020 yılında, Afrika kıtasında yer alan ülkelerde 20,2 milyon insanın açlıkla karşı karşıya kalmasına neden olmuştur [26]. Ciddi ekonomik kayıplara neden olur.

Pyrgodera armata, başının ve diğer vücut organlarının şekil ve rengi bakımından özgün özellikleri olan bir tür olup, zarar durumu tespit edilememiştir. Bu tür, Güneydoğu Anadolu Bölgesi Batman ili kırsal alanlarından toplanmıştır. *Saga ephippigera ephippigera* türü, etçil çekirge olarak bilinen yırtıcı bir çekirgedir. Doğu ve Güneydoğu Anadolu bölgeleri başta olmak üzere birçok yerde gözlemlenen etkili ve faydalı bir çekirge türüdür [27]. Şekil 1'de, 11 farklı çekirge türüne ait örnek görüntüler görülmektedir.

2.2 Veri Artırımı & Görüntü Yeniden Boyutlandırma

Başlangıçta, her bir çekirge türüne ait 32 adet görüntü bulunmaktadır. Elde edilen görüntüler daha sonra sınıflandırma performansına doğrudan etki edebileceğinden her tür için görüntüler elde edilirken farklı açılardan ve çekirgelerin farklı duruşlarından görüntülerin elde edilmesine özen gösterildi. Derin öğrenme mimarilerinin veri açıklığını karşılayabilmek için ise elde edilen görüntülere veri artırımı uygulandı. Veri artırımı yaparak sınıflandırma başarısını iyileştirmek, derin ağ mimarilerinin veri açıklığını gidermek ve aşırı uyumun önüne geçebilmek amacı ile, orijinal görüntülere döndürme, ölçekleme ve yansıtma gibi birtakım geometrik dönüşümler uygulanmıştır. Bu sayede veri setindeki görüntü sayısı 24 kat artırılmıştır. Nihayetinde her sınıf için 768 olmak üzere toplamda 8.448 çekirge görüntüsü elde edildi. Tablo 1 veri setimizin tür başına içerdiği görüntü sayısını gösterir. Farklı boyutlarda görüntüler içeren GHCD11 veri seti, derin ağ modelleri eğitilirken, işlem maliyetini düşürmek için 224×224 boyutuna ölçeklendirildi. Türler için görüntü sayıları Tablo 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. On bir farklı çekirge türüne ait görüntü örnekleri

Tablo 1. GHCD11 veri setinin detaylı gösterimi

Tür Adı	G. Sayısı
Acrida bicolor	768
Anacridium aegyptium	768
Calliptamus italicus	768
Dociostaurus maroccanus	768
Notostaurus anatolica	768
Oedipoda miniata miniata	768
Pyrgoderma armata	768
Saga ephippigera	768
Schistocerca gregaria	768
Tettigonia caudata	768
Tettigonia viridissima	768

3. İlgili Çalışmalar

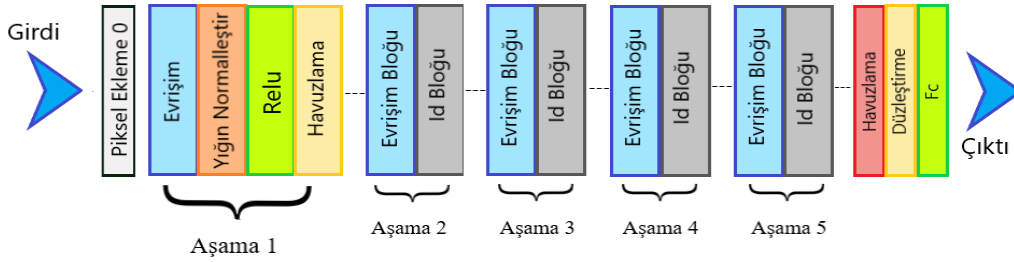
Bu bölümde çalışmada kullanılan VGG16, VGG19, ResNet50, DenseNet121, EfficientNetB0 ve MobileNet olmak üzere 6 farklı evrişimsel sinir ağı mimarileri hakkında bilgiler sunulmuştur.

3.1 VGG16 ve VGG19

VGG, 2014 yılında, Oxford üniversitesinden K. Simonyan ve A. Zisserman tarafından önerilen ve ILSVR-2014 yarışmasında, 1000 sınıftan oluşan 14 milyondan fazla görüntü ihtiva eden bir veri seti olan Imagenet üzerinde başarılı sonuç elde eden bir evrişimsel sinir ağı modelidir [28]. Model genel bir ifade ile AlexNet evrişimsel sinir ağı modeli üzerinde iyileştirmeler yapılarak oluşturulmuştur. Ağ giriş olarak 224×224 boyutlarına sahip olan girdiler alır. AlexNet’de, evrişim katmanlarında kullanılan büyük boyutlu filtreler (11×11 ve 5×5) birden fazla 3×3 boyutlu filtreler kullanır. Bu evrişimsel blokları, atlama değeri 2 olan 2×2 ’lik bir maksimum havuzlama işlemi takip etmektedir. Tüm mimari boyunca tutarlı bir şekilde bu evrişim ve maksimum havuzlama katmanları düzenlenmesi takip edilir. Mimari 2 adet tam bağlı katman ve bunu takip eden bir Softmax katmanı ile son bulur. Oldukça büyük bir ağ olan VGG16 mimarisi yaklaşık 138 milyon parametreye sahiptir. VGG19 mimarisi VGG16 mimarisine benzemekle birlikte fazladan 3 evrişimsel katman içerir ve yaklaşık 143 milyon parametreye sahiptir [29].

3.2 ResNet50

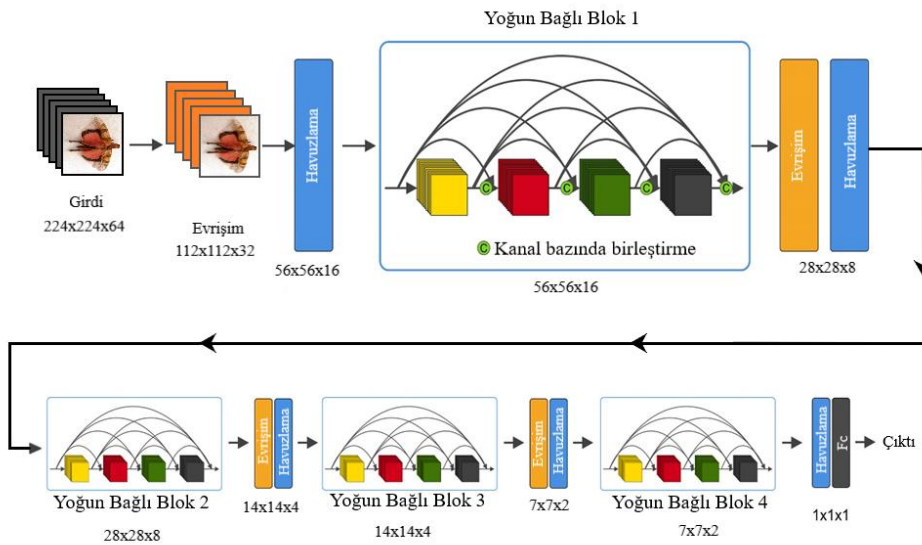
[30], tarafından 2015 yılında önerilen yenilikçi bir sinir ağı modelidir. Temel olarak VGG ağı mimarisinden esinlenmesine rağmen, ResNet ağlarını güçlü ve popüler kılan esas neden, derin öğrenme mimarilerinin temel problemlerinden biri olan derinliğin artması ile meydana gelen eğimin kaybolması problemine karşı getirdiği çözümdür. Bunun için ResNet mimarileri artık blok olarak adlandırılan bloklar kullanır. Ağ derinliği arttırıldığında üst katmanlardaki evrişimsel bloklar belirli periyotlarla alt katmanlardaki evrişim bloklarının çıktılarına bağlanarak eğimin kaybolması probleminin önüne geçer [30]. 224×224 boyutunda girdi görüntüleri alan ağ, yaklaşık 25 Milyon parametreden oluşur. VGG mimarisine göre daha az eğitilebilir parametreye sahip olan bu mimari, gösterdiği yüksek performans nedeniyle, yaygın olarak tercih edilmektedir. Şekil 2’te ResNet 50 mimarisi görülmektedir.



Şekil 2. ResNet50 mimarisi

3.3 DenseNet121

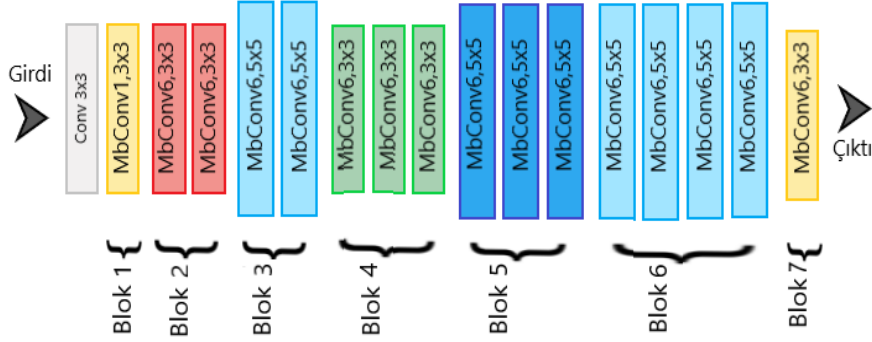
Huang ve arkadaşları tarafından önerilen DenseNet modeli girdi olarak 224×224 boyutunda görüntüler alır ve yaklaşık olarak eğitilebilir parametre sayısı 7 milyondur. DenseNet121, eğimin kaybolması probleminin üstesinden gelebilmekte bu sayede yeterli derinlikte ağların oluşturulmasına imkân vermekle beraber, ağı diğer ağlara nispeten daha az parametreye sahip olması ağı hızlı olmasını sağlar. Bu mimaride kullanılan her katman kendinden sonraki bütün katmanlara ileri beslemeli bir biçimde bağlar. Bu da demek oluyor ki, her katman için, kendinden önceki tüm katmanların özellik haritaları girdi olarak kullanılır ve her katmanın kendi özellik haritaları, kendinden sonraki katmanlar için girdi olarak kullanılır. Genel olarak ResNet mimarisine benzer bir yapı kullanmak ile beraber, DenseNet mimarisinde bir katmandan çıkan öznelikler alt katmanların tümüne girdi olarak verilir [31]. Şekil 3’te DenseNet Mimarisinin yapısı görülmektedir.



Şekil 3. DenseNet mimarisi

3.4 EfficientNetB0

Derin öğrenme mimarilerinin yaygınlaşması ile derin öğrenme ağlarının karmaşıklığı arttıkça başarımların yükseldiği görüldü. Fakat işlem maliyetleri de buna paralel olarak artıyordu. Bu problemi çözmek için son yıllarda başarımları yüksek fakat daha küçük ölçekli ağ modelleri üretmek için çalışılmaktadır. EfficientNet, bu ihtiyacı karşılamak amacı ile Google araştırma ekibinde Tan ve Le tarafından 2019 yılında, ortaya atılmıştır. Yazarlar yaptıkları incelemelerde ağın sadece derinliği, genişliği ya da çözünürlüğünü düşürmek yerine derinlik, genişlik ve çözünürlüğü belirli ölçek dahilinde birlikte küçültmenin, ağın başarımları üzerine olumlu etkileri olduğunu gözlemlemiştir. Yaptıkları gözlem neticesinde, ağın derinlik, genişlik ve çözünürlüğünü eşit olarak artırıp azaltılabilen yeni bir ölçeklendirme metodu geliştirmişlerdir. EfficientNet, B0 ile başlayıp B7'ye kadar giden, 8 farklı modelden oluşmaktadır ve model büyüdükçe kullanılan parametre sayısı artmakla birlikte, başarımları oranı da artmaktadır. Çalışmaya göre, başlangıçta temel model olan ve yaklaşık 11 Milyon eğitilebilir parametreye sahip olan EfficientNetB0 modeli oluşturulur. Daha sonra model boyutunu artırmak ve doğruluk değerini yükseltmek için temel model, bileşik ölçeklendirme yardımıyla EfficientNet-B1'den, EfficientNetB7'ye kadar genişletilebilir [32]. EfficientNet'i öne çıkaran bir diğer husus ise MBCONV katmanıdır. Kanalları önce ezip sonra genişleten ve bu sayede atlama bağlantıları ile zengin kanal katmanları birbirine bağlayan ResNet bloklarının aksine MBCONV blokları önce kanalları genişleten sonra sıkıştıran, bu sayede hesaplama miktarını azaltan bir yapıya sahiptir. Şekil 4'te, EfficientNetB0 mimarisinin yapısı görülmektedir.



Şekil 4. Efficient-B0mimarisi

3.5 MobileNet

MobileNet Andrew ve arkadaşları tarafından önerilmiş, mobil cihaz uygulamaları için uyumlu, küçük boyutlu, hızlı ve basit bir derin evrışimsel sinir ağı modelidir [33]. Normal evrışimsel bloklar yerine derinlemesine ayrıştırılabilir evrışimsel bloklar kullanılır. Derinlemesine ayrılabilir bir evrişim, derinlemesine evrişim ve noktasal evrişim olmak üzere iki işlemde meydana gelir. Derinlemesine ayrıştırılabilir evrişimlerde her girdi katmanına bir filtre uygulanır ve daha sonra nokta bazlı evrişimde, 1×1 evrişimler kullanılarak derinlik bazlı katmanlardan gelen çıktının doğrusal kombinasyonu oluşturulur. Derinlemesine ayrıştırılabilir evrişim blokları MobileNet'in performansının ana omurgasını oluşturur. Örneğin 3×3 'lük bir normal evrişimsel blok yerine 3×3 boyutunda derin bir evrişimsel blok kullanıldığında, hesaplama süresi yaklaşık 8-9 kat düşer.

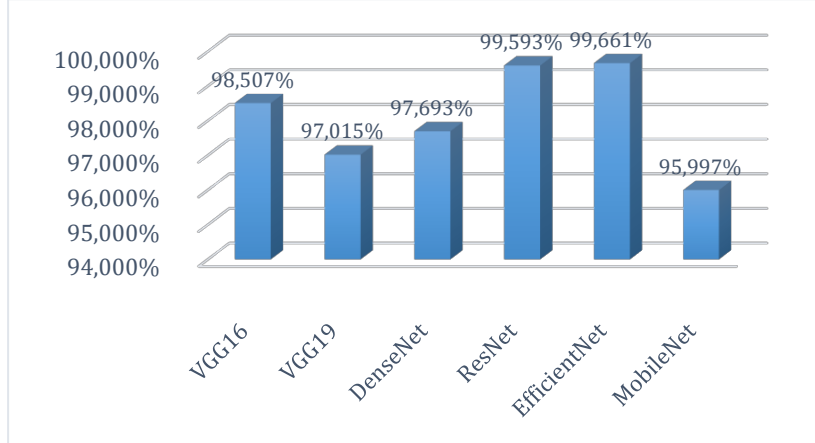
4. Deneysel Sonuçlar

Bu çalışmada, 11 farklı bitki zararlısı çekirge türü içeren GHCD11 veri seti üzerinde sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, VGG16, VGG19, ResNet50, DenseNet121, EfficientNetB0 ve MobileNet olmak üzere 6 farklı evrışimsel sinir ağı mimarisi kullanılmıştır. Çalışma Google Colab üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kullanılan VGG16, VGG19, ResNet50, DenseNet121, EfficientNet-B0 ve MobileNet mimarilerinin kodlamaları Python dilinde ve Keras kütüphaneleri kullanılarak yapılmıştır. Çalışmada, veri setine ait görüntüler öncelikle 224×224 boyutuna indirildi ve daha sonra veri seti sırası ile %60, %20, %20 oranında; eğitim (train), doğrulama (validation) ve test olarak ayrılmıştır. Kullanılan ağların tamamı, daha önce 'ImageNet' görüntüleri üzerinde eğitilmiş evrişimsel sinir ağlarıdır. Eğitim süreci Öğrenim Aktarımı (Transfer Learning) ile gerçekleştirilmiştir. Eğitim sürecinde optimizasyon olarak Adam Optimizasyonu, loss fonksiyonu olarak ise çapraz entropi kullanılmıştır. Eğitim süreci her CNN için 5 çağ boyunca sürdürülmüş olup, eğitim sürecinde kullanılan

parametreler Tablo 2’de gösterilmiştir. Kullanılan ağ mimarilerinin performansları doğruluk metriği kullanılarak değerlendirilmiştir. Doğruluk metriğinin nasıl hesaplandığı Denklem (1)’de gösterilmiştir.

$$accuracy = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \frac{TP_i + TN_i}{TP_i + TN_i + FP_i + FN_i} \quad (1)$$

Burada Denklem 1’de, TP gerçek pozitiflerin sayısını; TN, gerçek negatiflerin sayısını; FP, yanlış pozitiflerin sayısını; FN, yanlış negatiflerin sayısını ve p, sınıfların sayısını temsil etmektedir.



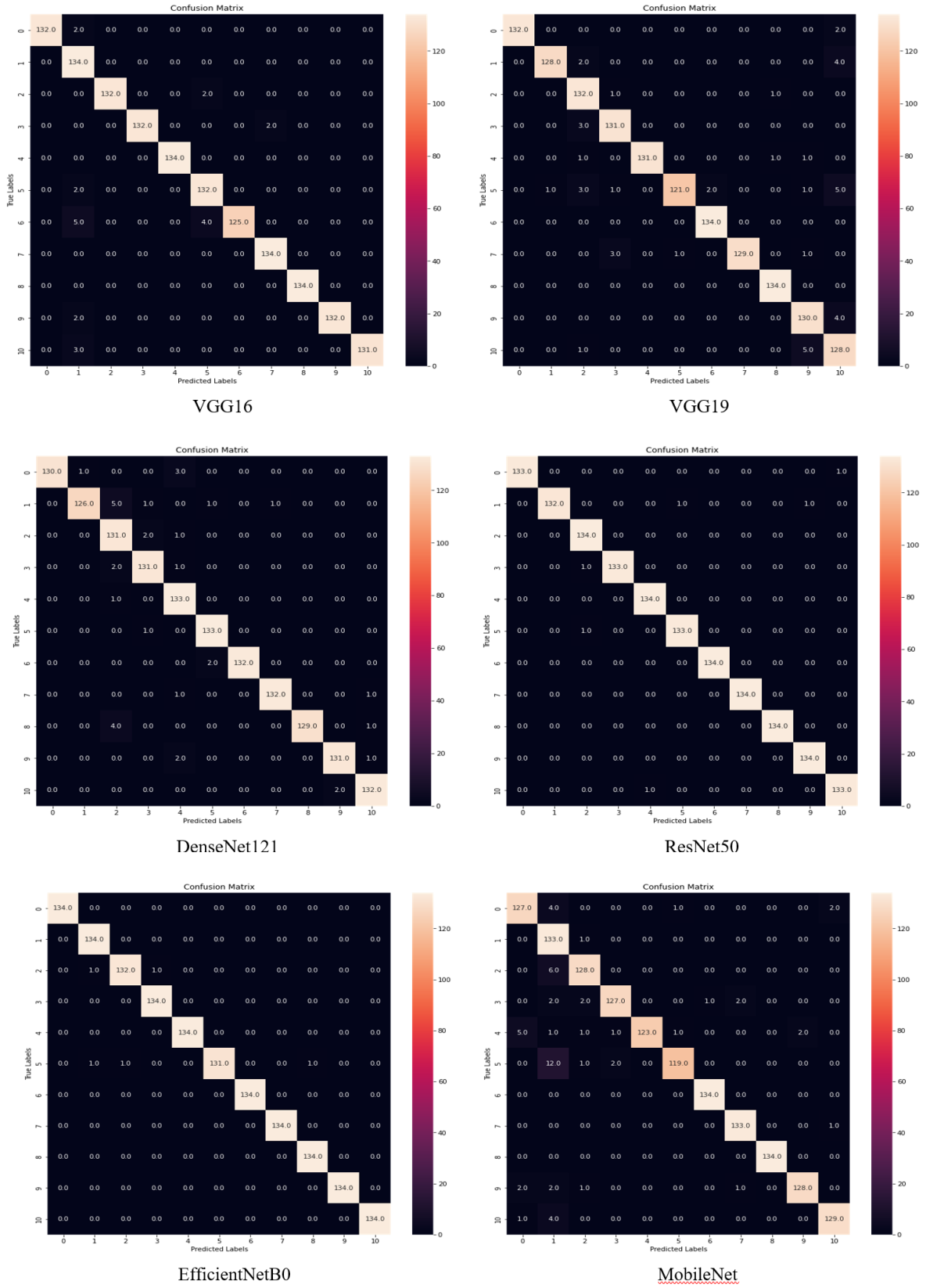
Şekil 5. Kullanılan CNN Mimarilerine ait doğruluk sonuçları

Eğitilmiş ağlar test verisi üzerinde uygulanarak, sınıflandırma başarıları elde edilmiştir. Ağların başarıları 1.474 test görüntüsü üzerinde sınanmış olup yapılan sınıflandırma sonucu en yüksek doğruluk değerini %99.661 ile EfficientNetB0 mimarisi ve en düşük doğruluk değerini %95.997 ile MobileNet mimarisinin verdiği gözlemlendi. Ayrıca, modellerin performanslarını değerlendirmek için karşıtlık matrislerinden (confusion matrix) faydalanılmıştır. Her bir CNN mimarisi için elde edilen karşıtlık matrisleri Şekil 9’da verilmiştir. Kullanılan tüm CNN mimarileri için elde edilen doğruluk değerleri Şekil 5’te verilmiştir.

Tablo 2. Mimarilerde kullanılan temel eğitim parametreleri.

CNN Modeli	Giriş Boyutu	Mini Batch Size	Öğrenme Oranı
VGG16	224×224×3	32	0.001
VGG19	224×224×3	32	0.001
ResNet50	224×224×3	32	0.001
DenseNet121	224×224×3	32	0.001
EfficientNetB0	224×224×3	32	0.001
MobileNet	224×224×3	32	0.001

Evrimsel Sınır Ağı Mimarileri ve Öğrenim Aktarma ile Bitki Zararlısı Çekirge Türlerinin Sınıflandırması



Şekil 6. Kullanılan CNN mimarilerine ait karşıtlık matrisleri

VGG16, VGG19, ResNet50, DenseNet121, EfficientNetB0 ve MobileNet CNN mimarileri GHCD11 veri seti üzerinde sırası ile %98.507, %97.015, %99.593, %97.693, %99.661, %95.997 sınıflandırma doğruluğu elde etmişlerdir. Bununla birlikte, karışıklık matrisi incelendiğinde, VGG19 ve MobileNet CNN mimarilerinin en çok “Oedipoda miniata miniata” türünü yanlış sınıflandırdığı gözlemlenmiştir. VGG16 mimarisinin “Pyrgodera armata” türünü DenseNet121 mimarisinin ise en çok “Anacridium aegyptium” türünü yanlış sınıflandırdığı gözlemlenmiştir. Yine karmaşıklık matrisinden, “Oedipoda miniata miniata”, “Pyrgodera armata” ve “Anacridium aegyptium” türlerindeki yanlış sınıflandırmanın tek bir türü içermeyip türler arasında dağılım göstermesi, bu ağların çekirge türlerine ait anahtar öznitelikleri çıkarmada yeterince başarılı olamadığı düşüncesini doğursa da gerek eğitimin çağının kısa tutulması gerekse veri setinin ağların veri ihtiyacını karşılayacak boyutlara ulaşmamış olma ihtimallerinden ötürü kesin yargıda bulunmak için erken olduğu düşünülmektedir. Nispeten daha başarılı performans veren ResNet50 ve EfficientNetB0 CNN mimarilerinin her ikisinin de; “Notostaurus anatolica”, “Pyrgodera armata”, “Saga ephippigera”, “Schistocerca gregaria”, “Tettigonia caudata” türlerine ait görüntülerin tamamını doğru sınıflandırdığı gözlemlenmiştir. Bu, kısa çağlarda yapılan ağ eğitimleri ve yeterince büyük olmayan veri setlerinde dahi ResNet50 ve EfficientNetB0 ağlarının anahtar öznitelikleri elde etmede, çalışmada kullanılan diğer ağlara göre daha başarılı olabileceği düşüncesini oluşturmaktadır. Ayrıca, “Saga ephippigera” türü, DenseNet121 hariç tamamında %100 doğrulukla sınıflandırılmıştır. Bu durumun nedeni, “Saga ephippigera” türünün, diğer türlere göre daha fazla ayırt edici özelliklerinin bulunmasıdır.

5. Sonuçlar

Çekirgeler, dünya çapında yıkıma neden olan küresel zararlılardır. Her yıl milyarlarca dolarlık mahsulü mahvediyorlar ve milyonlarca insan için kitlesel açlığa neden olma potansiyeline sahiptirler. Bu nedenle bitki zararlısı çekirge türlerinin otomatik tespit ve sınıflandırılması oldukça önemlidir. Bu çalışmada, öncelikle ülkemizin özellikle Doğu ve Güneydoğu Anadolu bölgelerinde görülen 11 farklı bitki zararlısı çekirge türüne ait GHCD11 adında yeni bir veri seti oluşturulmuştur. Bu veri seti çalışmanın en büyük yeniliğini oluşturmaktadır. Bunun yanında, çalışmada 11 farklı bitki zararlısı çekirge türünün otomatik olarak sınıflandırılması için görüntü sınıflandırmasında yaygın olarak kullanılan VGG16, VGG19, ResNet50, DenseNet121, EfficientNet ve MobileNet olmak üzere 6 farklı evrimsel sinir ağı modelleri kullanılmıştır. Öğrenme aktarımı yöntemi ile GHCD11 veri seti üzerinde, yukarıda bahsedilen mimariler kullanılarak yapılan sınıflandırma neticesinde; elde edilen sonuçların %95 ve %99 aralığında kayda değer sonuçlar elde ettiği gözlemlenmiştir. EfficientNetB0’ın en yüksek sınıflandırma başarısı gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu durumun şu sebeplerden kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir. Birincisi EfficientNet’i diğer ağlardan ayıran ve parametre sayısını düşürürken performans kayıplarının önüne geçmesini sağlayan ve EfficientNet’in temel yapıtaşı olan MbConv katmanlarının sınıflandırma başarımını arttırmış olabileceğidir. İkincisi, yine EfficientNet’i diğer ağlardan ayıran ve ağı derinlemesine ve genişlemesine olarak belirli bir ölçekte arttırarak ilerlemesinin, GHCD11 veri setinde sınıflandırma başarımını arttırmış olabileceğidir. Üçüncü ve son olarak ise EfficientNet’in Transfer Learning için diğer ağ mimarilerine kıyasla daha uygun bir model olma durumudur. Bu bağlamda daha kesin bilgi için GHCD11 veri seti üzerinde ağların sıfırdan eğitilerek ve yine ağların fine-tune edilerek elde edilecek sonuçların mevcut sonuçlarımız ile yeniden sentezlenmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Sunulan yeni veri seti üzerinde, öğrenme aktarımı ile birlikte eğitilen ağların başarımının tatmin edici düzeyde olduğu düşünülmektedir. Ağ mimarilerinin yakınsama hızları göz önüne alındığında EfficientNetB0 ve ResNet50 ağlarının eğitim sürecinde daha hızlı yakınsadığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte gerek öğrenme aktarımı uygulanırken öğrenilebilen parametrelerin bloke edilmesi gerekse kullanılan çağ sayısının, 5 çağ ile sınırlı tutulması gibi nedenlerden dolayı, ağların yakınsama başarımları hakkında kesin bir şeyler söylemenin güç olduğu düşünülmektedir. Elde edilen sınıflandırma doğruluğunun sınıf sayısının azlığından olabileceği düşünülmekte ve sınıf sayısının ileriki çalışmalar için artırılması planlanmaktadır. Yine ağ mimarilerinin gerçek performansının daha net değerlendirilebilmesi için çevresel gürültünün olduğu dış ortam görüntüleri ile ağların eğitilmesi planlanmaktadır. Mevcut ağlara alternatif, hızlı yakınsama ve yüksek doğruluk performanslarına sahip yeni bir mimari model tasarlanması planlanmaktadır.

Çıkar Çatışmasının Beyanı

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

Kısaltmalar

CNN: Evrişimsel Sinir Ağı.

Kaynaklar

- [1] E. Ayan, H. Erbay, and F. Varçın, "Crop pest classification with a genetic algorithm-based weighted ensemble of deep convolutional neural networks," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 179, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.compag.2020.105809.
- [2] P. Gullan, P., Cranston, *The insects: an outline of entomology.*, vol. 21, no. 9. 2014.
- [3] L. Zhang, M. Lecoq, A. Latchininsky, and D. Hunter, "Locust and Grasshopper Management," 2018, doi: 10.1146/annurev-ento-011118.
- [4] C. Xie et al., "Multi-level learning features for automatic classification of field crop pests," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 152, no. October 2016, pp. 233–241, 2018, doi: 10.1016/j.compag.2018.07.014.
- [5] M. Martineau, D. Conte, R. Raveaux, I. Arnault, D. Munier, and G. Venturini, "A survey on image-based insect classification," *Pattern Recognit.*, vol. 65, pp. 273–284, 2017, doi: 10.1016/j.patcog.2016.12.020.
- [6] N. Larios et al., "Automated insect identification through concatenated histograms of local appearance features: Feature vector generation and region detection for deformable objects," *Mach. Vis. Appl.*, vol. 19, no. 2, pp. 105–123, 2008, doi: 10.1007/s00138-007-0086-y.
- [7] S. R. Huddar, S. Gowri, K. Keerthana, S. Vasanthi, and S. R. Rupanagudi, "Novel algorithm for segmentation and automatic identification of pests on plants using image processing," 2012 3rd Int. Conf. Comput. Commun. Netw. Technol. ICCCNT 2012, no. July, 2012, doi: 10.1109/ICCCNT.2012.6396012.
- [8] A. Siva Sangari and D. Saraswady, "Analyzing the optimal performance of pest image segmentation using non linear objective assessments," *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 6, no. 6, pp. 2789–2796, 2016, doi: 10.11591/ijece.v6i6.11564.
- [9] J. Zhao, M. Liu, and M. Yao, "Study on image recognition of insect pest of sugarcane cotton aphid based on rough set and fuzzy C-means clustering," 3rd Int. Symp. Intell. Inf. Technol. Appl. IITA 2009, vol. 2, pp. 553–555, 2009, doi: 10.1109/IITA.2009.295.
- [10] P. J. D. Weeks, M. A. O'Neill, K. J. Gaston, and I. D. Gauld, "Species-identification of wasps using principal component associative memories," *Image Vis. Comput.*, vol. 17, no. 12, pp. 861–866, 1999, doi: 10.1016/S0262-8856(98)00161-9.
- [11] M. T. Do, J. M. Harp, and K. C. Norris, "A test of a pattern recognition system for identification of spiders," *Bull. Entomol. Res.*, vol. 89, no. 3, pp. 217–224, 1999, doi: 10.1017/s0007485399000334.
- [12] L. Q. Zhu and Z. Zhang, "Auto-classification of insect images based on color histogram and GLCM," *Proc. - 2010 7th Int. Conf. Fuzzy Syst. Knowl. Discov. FSKD 2010*, vol. 6, no. Fskd, pp. 2589–2593, 2010, doi: 10.1109/FSKD.2010.5569848.
- [13] X. Cheng, Y. Zhang, Y. Chen, Y. Wu, and Y. Yue, "Pest identification via deep residual learning in complex background," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 141, pp. 351–356, 2017, doi: 10.1016/j.compag.2017.08.005.
- [14] H. M. Ünver and E. Ayan, "Skin lesion segmentation in dermoscopic images with combination of yolo and grabcut algorithm," *Diagnostics*, vol. 9, no. 3, 2019, doi: 10.3390/diagnostics9030072.
- [15] Q. Zu, B. Hu, N. Gu, and S. Seng, "Human Centered Computing: First International Conference, HCC 2014 Phnom Penh, Cambodia, November 27-29, 2014 Revised Selected Papers," *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 8944, no. 18, pp. 812–820, 2015, doi: 10.1007/978-3-319-15554-8.
- [16] Z. Q. Zhao, P. Zheng, S. T. Xu, and X. Wu, "Object Detection with Deep Learning: A Review," *IEEE Trans. Neural Networks Learn. Syst.*, vol. 30, no. 11, pp. 3212–3232, 2019, doi: 10.1109/TNNLS.2018.2876865.

- [17] Y. Zhang, J. M. Gorriz, and Z. Dong, “Deep learning in medical image analysis,” *J. Imaging*, vol. 7, no. 4, p. NA, 2021, doi: 10.3390/jimaging7040074.
- [18] N. Şahin, N. Alpaslan, and D. Hanbay, “Robust optimization of SegNet hyperparameters for skin lesion segmentation,” *Multimed. Tools Appl.*, vol. 81, no. 25, pp. 36031–36051, 2022, doi: 10.1007/s11042-021-11032-6.
- [19] D. Xia, P. Chen, B. Wang, J. Zhang, and C. Xie, “Insect detection and classification based on an improved convolutional neural network,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 12, pp. 1–12, 2018, doi: 10.3390/s18124169.
- [20] Z. Liu, J. Gao, G. Yang, H. Zhang, and Y. He, “Localization and Classification of Paddy Field Pests using a Saliency Map and Deep Convolutional Neural Network,” *Sci. Rep.*, vol. 6, no. June 2015, pp. 1–12, 2016, doi: 10.1038/srep20410.
- [21] S. Lim, S. Kim, and D. Kim, “Performance effect analysis for insect classification using convolutional neural network,” *Proc. - 7th IEEE Int. Conf. Control Syst. Comput. Eng. ICCSCE 2017*, vol. 2017-Novem, no. November, pp. 210–215, 2018, doi: 10.1109/ICCSCE.2017.8284406.
- [22] F. Visalli, T. Bonacci, and N. A. Borghese, “Insects Image Classification Through Deep Convolutional Neural Networks,” *Smart Innov. Syst. Technol.*, vol. 184, pp. 217–228, 2021, doi: 10.1007/978-981-15-5093-5_21.
- [23] L. Liu et al., “PestNet: An End-to-End Deep Learning Approach for Large-Scale Multi-Class Pest Detection and Classification,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 45301–45312, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2909522.
- [24] L. Nanni, A. Manfè, G. Maguolo, A. Lumini, and S. Brahmam, “High performing ensemble of convolutional neural networks for insect pest image detection,” *Ecol. Inform.*, vol. 67, 2022, doi: 10.1016/j.ecoinf.2021.101515.
- [25] M. İlçin and Ş. Çelik, “Statistical Evaluation of Damage Status of Important Grasshopper Family in Plants,” *Quest Journals J. Res. Agric. Anim. Sci.*, vol. 8, no. 2, pp. 2321–9459, 2021.
- [26] “2020 | FAO | Food and Agriculture Organization of the United Nations.” [Online]. Available: https://www.fao.org/news/archive/news-by-date/2020/en/?page=3&ipp=10&tx_dynalist_pi1%5Bpar%5D=YToxOntzOjE6IkwiO3M6MToiMCI7fQ%3D%3D. [Accessed: 06-Nov-2022].
- [27] M. İlçin, “Investigation of Orthoptera: Insecta Fauna of Useful, Harmful and Predator Species in the Batman Region (Turkey),” *Sci. Stay. True Here" Biol. Chem. Res.*, vol. 6, pp. 30–40, 2019.
- [28] K. Simonyan and A. Zisserman, “Very deep convolutional networks for large-scale image recognition,” *3rd Int. Conf. Learn. Represent. ICLR 2015 - Conf. Track Proc.*, pp. 1–14, 2015.
- [29] G. A. Shadeed, M. A. Tawfeeq, and S. M. Mahmoud, “Automatic medical images segmentation based on deep learning networks,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 870, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/870/1/012117.
- [30] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, “Deep residual learning for image recognition,” *Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.*, vol. 2016-Decem, pp. 770–778, 2016, doi: 10.1109/CVPR.2016.90.
- [31] G. Huang, Z. Liu, L. Van Der Maaten, and K. Q. Weinberger, “Densely connected convolutional networks,” *Proc. - 30th IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognition, CVPR 2017*, vol. 2017-Janua, pp. 2261–2269, 2017, doi: 10.1109/CVPR.2017.243.
- [32] M. Tan and Q. V. Le, “EfficientNet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks,” *36th Int. Conf. Mach. Learn. ICML 2019*, vol. 2019-June, pp. 10691–10700, 2019.
- [33] A. G. Howard et al., “MobileNets: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision Applications,” 2017.

Ezerek Parlatma Yönteminin Inconel 718 Alaşımının Yüzey Kalitesi Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması

Mahmut ÇELİK^{1*}

¹ Uçak Gövde ve Motor Bakımı Bölümü, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye
^{*}1 mahmutcelik@erciyes.edu.tr

(Geliş/Received: 03/01/2023;

Kabul/Accepted: 02/03/2023)

Öz: Ezerek parlatma yöntemi son yıllarda sıklıkla tercih edilen düşük maliyetli ve etkili bir yüzey iyileştirme yöntemidir. Yöntemde bir yuvarlanma elemanı iş parçası yüzeyine belirli bir kuvvetle bastırılarak yüzey üzerindeki düzensizlikler soğuk deformasyona uğratarak giderilir. Böylece yüzey pürüzlülükleri giderilerek yüzey kalitesi artırılır. Bu çalışmada Inconel 718 alaşımından tornalama yöntemiyle imal edilmiş numuneler ezerek parlatma işlemine tabi tutulmuşlardır. İşlemde baskı kuvveti, ilerleme miktarı ve paso sayısı parametreleri 4'er farklı seviyede değiştirilmiş ve bu parametrelerin yüzey kalitesi üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Taguchi L16 deneysel tasarım yaklaşımı benimsenen çalışmada yüzey pürüzlülüklerin ortalama % 94,29 oranında iyileştirildiği tespit edilmiştir. Öte yandan Sinyal/Gürültü oranı analizinden elde edilen veriler neticesinde yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranı (YPIÖ) üzerinde en etkili parametrenin paso sayısı olduğu ve bunu sırasıyla ilerleme miktarı ve baskı kuvveti parametrelerinin takip ettiği tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Ezerek parlatma, Inconel 718, Yüzey kalitesi

Investigation of the Effects of Roller Burnishing on the Surface Quality of Inconel 718 Alloy

Abstract: The roller burnishing method is a low-cost and effective surface improvement method that has been frequently preferred in recent years. In the method, a rolling element is pressed against the workpiece surface with a certain force, and the irregularities on the surface are removed by cold deformation. Thus, surface roughness is removed and surface quality is increased. In this study, samples manufactured from Inconel 718 alloy by turning method were subjected to burnishing process. In the process, the compression force, feed rate and number of passes parameters were changed at 4 different levels and the effects of these parameters on the surface quality were investigated experimentally. In the study, in which Taguchi L16 experimental design approach was adopted, it was determined that the surface roughness was improved by an average of 94.29%. On the other hand, as a result of the data obtained from the Signal/Noise ratio analysis, it was determined that the most effective parameter on the surface roughness improvement ratio was the number of passes, followed by the feed rate and compression force parameters, respectively.

Key words: Inconel 718, Roller burnishing, Surface quality

1. Giriş

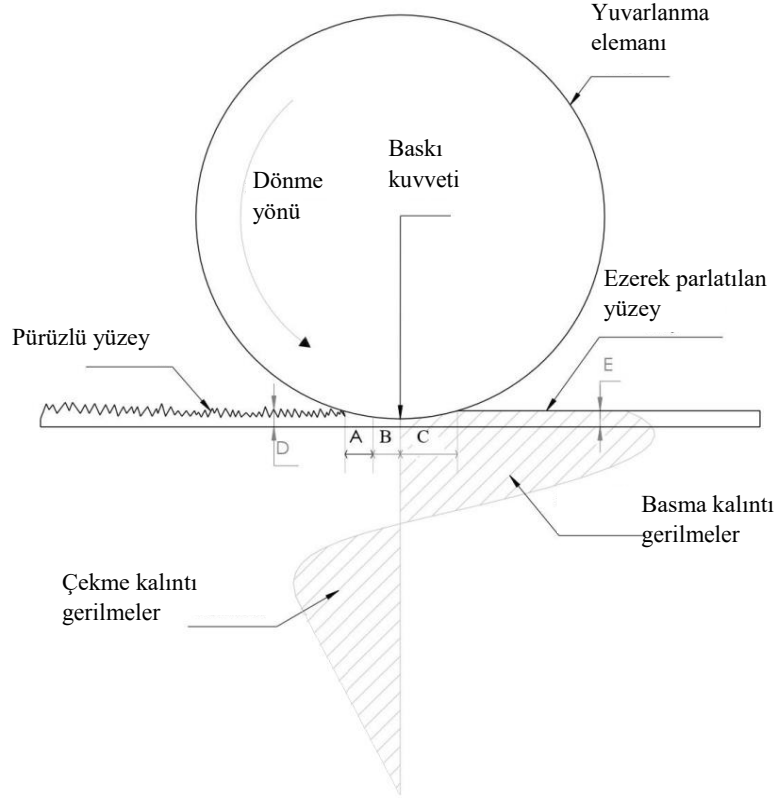
İmalat teknolojilerinde yaşanan gelişmelerle birlikte makine elemanlarından mekanik ve kozmetik beklentiler artmaktadır. Bir makine elemanın seçiminde mukavemet, aşınma dayanımı gibi mekanik özelliklerinin yanı sıra yüzey kalitesi gibi kozmetik özellikler de tercih sebebi olmaktadır [1].

Mekanik açıdan beklentileri karşılayan Inconel 718 alaşımı yüksek ısı dayanımı, yüksek yorulma dayanımı ve aşınma dayanımı gibi özelliklere sahiptir. Sahip olduğu bu özellikler Inconel 718 alaşımının havacılık ve uzay endüstrisinde en çok kullanılan süper alaşımlar arasında yerini almasını sağlamıştır [2,3]. Inconel 718 alaşımı gaz türbinli motorlarda bulunan türbin kanatçıklarında, nükleer sanayisinde kullanılan ekipmanlarda ve sıvı yakıt kullanan roketlerde yoğunlukla kullanılmaktadır. Bu elemanların üretiminde de genellikle talaşlı imalat yöntemleri kullanılmaktadır [4,5]. Inconel 718 alaşımının sahip olduğu üstün özellikler bu alaşımların işlenebilirliği konusunda da bir takım sınırlamaları beraberinde getirmektedir [6]. Talaşlı imalat esnasında ortaya çıkan yüksek ısı iş parçasında sıcak sertlik oluşturmakta ve bu durum kesici takımında deformasyonlara ve yüksek oranda aşınmalara sebep vermektedir [7]. Öte yandan takım ve iş parçası arasında açığa çıkan yüksek ısı kesici takım kenarında talaş birikintisine neden olmakta ve sonuç olarak yüzey kalitesi bozulmaktadır [8-10]. Inconel 718 alaşımının kullanım alanları da göz önüne alındığında mekanik özelliklerin yanı sıra yüzey kalitesi de önem arz

* Sorumlu yazar: mahmutcelik@erciyes.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0003-4272-1319

etmektedir. Bu sebeple talaşlı imalat ile işlenen Inconel 718 alaşımlarında ikincil bir yüzey iyileştirme işlemine ihtiyaç duyulmaktadır.

Termal, termo – mekanik, kimyasal ve mekanik birçok yüzey iyileştirme yöntemi olmasına karşın, Ezerek Parlatma (EP) yöntemi sahip olduğu ekonomiklik ve uygulama kolaylığı gibi avantajlarından dolayı daha tercihli hale gelmiştir. EP yönteminde, sertleştirilmiş çelik veya seramik bir yuvarlanma elemanı yüzeye belirli bir kuvvetle bastırılarak yuvarlanma elemanı ve/veya iş parçasının hareketi neticesinde yüzeylerden talaş kaldırılmadan, yüzeydeki mikro pürüz tepeleri küçük plastik deformasyonlara uğratarak düzleştirilir (Şekil 1).



Şekil 1. Ezerek parlatma işleminin şematik gösterimi [11]

Parlatma işlemi genellikle tormalanmış ve/veya taşlanmış metal parçaların prizmatik, silindirik ve konik iç ve dış yüzeylerine uygulanır [12]. İşlem neticesinde, malzemenin yüzey sertliği artarken, pürüzlülüğü ise önemli derecede azalmaktadır. EP yöntemi, geleneksel hassas tormalama, taşlama ve honlama gibi talaşlı imalat yöntemleriyle kıyaslandığında yaklaşık 15 kat daha ekonomiktir [13]. Ayrıca, yöntemin herhangi bir talaşlı imalat tezgahına çok kolay bir şekilde entegre edilebilecek bir ezme aparatı vasıtasıyla gerçekleştirilebilmesi ve ekstra bir donanıma ihtiyaç duymaması da yöntemin tercih edilmesinde diğer bir unsurdur.

Inconel 718 alaşımının yüzey kalitesini artırmaya yönelik çok sayıda çalışma olmakla birlikte bu çalışmalar genellikle ısıtma işlem ve kaplama teknikleri üzerine yoğunlaşmıştır [14]. Inconel 718 alaşımının EP işlemine tabi tutulduğu sınırlı sayıda çalışmalara ise aşağıda özetlenmiştir.

Shen vd. tarafından yapılan çalışmada Inconel 718 alaşımı ultrasonik destekli EP işlemi ve ısıtma işlemli ultrasonik destekli EP işlemine tabi tutulmuştur. Çalışmada yüzey özellikleri mekanik özelliklerle ilişkilendirilerek değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda ısıtma işlemli EP işleminin daha iyi yüzey özellikleri gösterdiği ve numunelerde daha yüksek akma dayanımı ve daha etkin basma artık gerilme dağılımı olduğu görülmüştür [14].

Casarin ve ark., yaptıkları çalışmada Inconel 718 alaşımının geleneksel EP yöntemi ve iş parçasının ısıtıldığı EP yöntemi ile parlatmışlardır. Yapılan kıyaslama neticesinde oda sıcaklığında yapılan deneylerde daha düşük yüzey pürüzlülükleri elde edilirken ısıtılmış iş parçalarında yapılan deneylerde daha yüksek yüzey sertliği ve basma kalıntı gerilme değerleri olduğu görülmüştür [15].

Sequera ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada ise Inconel 718 alaşımı bilye şeklindeki ezme aparatı vasıtasıyla EP işlemine tabi tutulmuş ve bilye boyutu ve ezme basıncının yüzey özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma sonucunda EP işlemine tabi tutulan numunelerin yüzey kalitesi ve sertliğinde belirli bir basınç değerine kadar artış meydana geldiği tespit edilmiştir [16].

De Lacalle ve ark. tarafından gerçekleştirilen çalışmada 6 mm çapa sahip bir bilye ile frezelenmiş Inconel 718 ve ısıtılmış P20 çeliği farklı ezme basınçlarında EP işlemine tabi tutulmuş ve yüzey özellikleri incelenmiştir. Bütün deneylerde EP işlemi sonucu yüzey pürüzlülük değerlerinin azaldığı ve Inconel 718 alaşımının çeliğe kıyasla daha kolay parlatılabildiği raporlanmıştır. Bu durum ise Inconel 718 alaşımının süneklik özelliğiyle ilişkilendirilmiştir [17].

Yaman ve ark., yaptıkları çalışmada eklemeli imalat yöntemiyle ürettikleri Inconel 718 alaşımının, ham halini, kum püskürtme yöntemi uygulanmış halini ve ısıtılmış halini EP yöntemine tabi tutmuşlardır. Çalışma sonucunda numunelerin yüzey özellikleri ve aşınma dirençleri incelenmiş ve hem yüzey kalitesi hem de aşınma dirençlerinin EP yöntemiyle iyileştiği rapor edilmiştir [18].

Hua ve ark. tarafından yapılan çalışmada Inconel 718 alaşımından imal edilmiş yorulma test numunelerinin yüzeyleri EP işlemine tabi tutulmuş ve EP işleminin yorulma ömrü ve yüzey özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma sonucunda yüzey kalitesinin arttığı, yüzey sertliğinin arttığı ve yorulma dayanımının da arttığı raporlanmıştır [19].

Yapılan çalışmalar incelendiğinde ezme aparatı olarak bazı çalışmalarda silindirik bir makara, bazı çalışmalarda ise bilye kullanıldığı tespit edilmiştir. Bu çalışmada ise tornalama yöntemine tabi tutulmuş Inconel 718 alaşımı disk şeklinde ve sabit bir yarıçapa sahip bir aparat aracılığıyla ikincil bir işlem olarak EP yöntemine tabi tutulmuş ve EP yöntem parametrelerinin iş parçalarının yüzey kaliteleri üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

2. Deneysel Çalışmalar

2.1. Numunelerin hazırlanması

Deneylerde temini ticari olarak sağlanan Inconel 718 alaşımından imal edilmiş 12,6 mm çapında silindirik miller kullanılmıştır. Bu malzemeye ait kimyasal bileşim ve mekanik özellikler sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2’de verilmiştir.

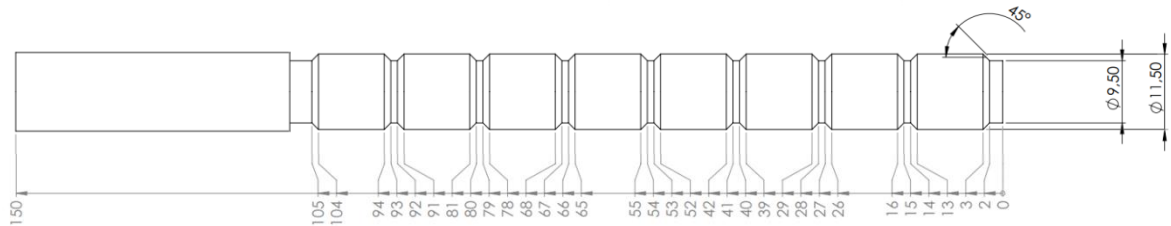
Tablo 1. İş parçası malzemesinin kimyasal bileşimi (Inconel 718) [4]

Element (%)	Ni	Cr	Fe	Mo	Nb	Ti	Diğer
	53,37	18,37	17,80	3,04	5,34	0,98	Balans

Tablo 2. İş parçası malzemesinin mekanik özellikleri (Inconel 718)

Özellik	
Yoğunluk (kg/m ³)	891
Akma Dayanımı (MPa)	1104
Çekme Dayanımı (MPa)	1345
Sertlik (HRC)	42

EP işlemi öncesinde numuneler, bilgisayarlı sayısal denetimli bir torna tezgahında 75 m/dk kesme hızında, 0,2 mm/dev ilerleme oranında ve 0,5 mm talaş derinliğinde sabit şartlarda Sumitomo electric firması tarafından süper alaşımların işlenmesi için özel üretilen 0,4 mm uç radyüsü bulunan TNMG160404N-EG kodlu kesici takımla tornalama işlemine tabi tutulmuş ve Şekil 2’de gösterilen ölçülere getirilerek nihai halini almıştır.



Şekil 2. Numunelere ait teknik detaylar

2.2. Deney parametrelerinin belirlenmesi

EP işleminde yüzey kalitesi üzerinde etkili olan çok sayıda faktör bulunmaktadır. Bu faktörlerin her birinin yüzey kalitesi üzerindeki etkilerini aynı anda belirlemek oldukça güçtür. Literatürde yapılan çalışmalar ve yapılan ön deneyler neticesinde baskı kuvveti, ilerleme miktarı ve paso sayısı faktörlerinin yüzey kalitesi üzerinde etkin parametreler olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle deneysel tasarımda bu 3 temel faktör çeşitli seviyelerde değiştirilerek yüzey kalitesi üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışmada zamandan ve maliyetten tasarruf sağlamak amacıyla tam faktör yerine Taguchi L16 ortogonal dizin deneysel tasarım metodu benimsenmiştir. Tablo 3'te deneysel tasarım içerisinde yer alan faktörler ve seviyeleri görülmektedir. Tablo 4'te ise bu faktörler ve seviyeler neticesinde elde edilen deneysel tasarım görülmektedir.

Tablo 3. Parlatma parametreleri ve faktör seviyeleri

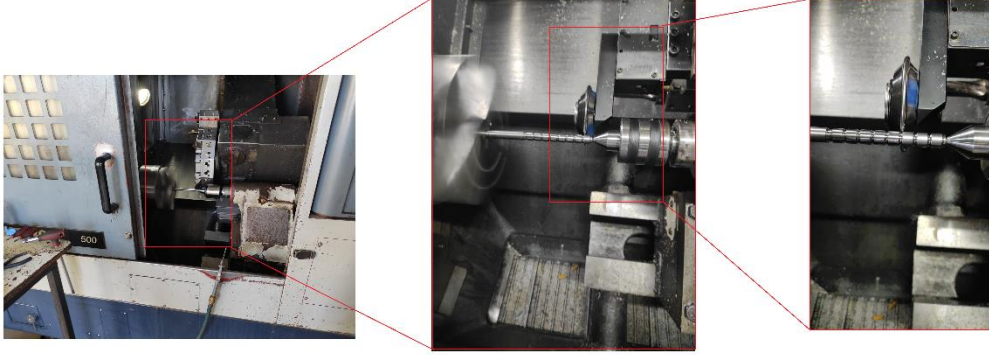
Parlatma Parametresi	Seviyeler			
	1	2	3	4
Baskı Kuvveti (N)	160	240	320	400
İlerleme Miktarı, (mm/dev)	0,02	0,04	0,06	0,08
Paso Sayısı	1	2	3	5
Devir Sayısı (dev/dk)	1800			

Tablo 4. Deney koşulları

Deney No	Baskı Kuvveti	İlerleme Miktarı	Paso Sayısı
1	160	0,02	1
2	240	0,02	2
3	320	0,02	3
4	400	0,02	5
5	240	0,04	1
6	160	0,04	2
7	400	0,04	3
8	320	0,04	5
9	320	0,06	1
10	400	0,06	2
11	160	0,06	3
12	240	0,06	5
13	400	0,08	1
14	300	0,08	2
15	240	0,08	3
16	160	0,08	5

2.3. Deneylerin yapılması

Deneyler ECOCA marka 9 kW güce sahip ve maksimum 4800 dev/dk fener mili devrine sahip bilgisayarlı sayısal denetimli torna tezgahında gerçekleştirilmiştir. Ezme aparatı olarak YAMATO firması tarafından üretilmiş SKUV20 2.5R model numaralı takım kullanılmıştır. Takım içerisinde baskı kuvvetini sağlamak amacıyla 80 N/mm² lik bir yay sabitine sahip yay kullanılmış ve parlatma için gerekli baskı kuvveti bu yayı sıkıştırmak suretiyle ayarlanmıştır. Deneysel düzenek Şekil 3'te görülmektedir.



Şekil 3. Deneysel düzeneğin görüntüsü

2.4. Yüzey pürüzlülük ölçümleri

Tornalama işlemine tabi tutulmuş numunelerin EP işlemi öncesinde ve sonrasında yüzey pürüzlülük değerleri Accretech Handysurf +45 marka portatif yüzey pürüzlülük cihazı yardımıyla 5mm örnekleme uzunluğunda ve 1 mm/s ölçüm hızında numune eksenine paralel olarak 3 farklı yerden ölçülmüş ve ortalamaları ortalama Ra değeri olarak kaydedilmiştir. Öte yandan EP işleminin her bir numune için meydana getirdiği yüzey pürüzlülük iyileşme oranları (YPIÖ) Eş. 1 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\frac{Ra_i - Ra_s}{Ra_i} \times 100 = \% \text{ iyileşme} \quad (1)$$

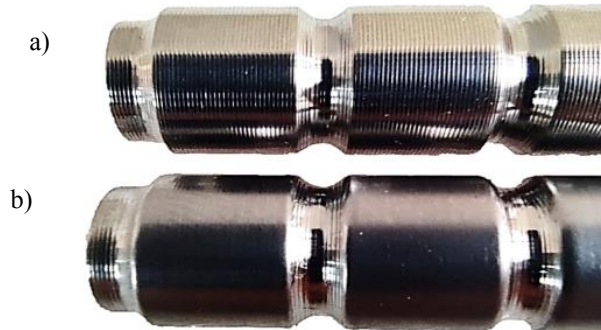
Burada;

Ra_i: Tornalanmış numunenin ortalama yüzey pürüzlülük değerini

Ra_s: EP işlemine tabi tutulmuş numunenin ortalama yüzey pürüzlülük değerini ifade etmektedir.

3. Deneysel Sonuçlar ve Tartışmalar

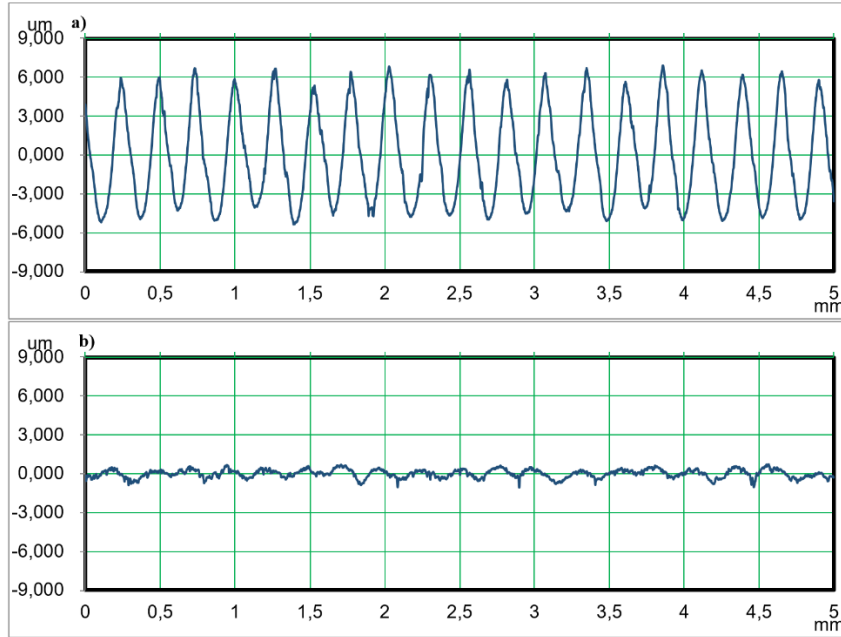
EP işlemi neticesinde elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değerleri ve hesaplanan yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranları Tablo 5'te görülmektedir. Tornalanmış yüzeylerin ortalama Ra değeri 3,324 µm olarak ölçülmüş olup EP işlemine tabi tutulan numunelerin ortalama Ra değeri ise 0,189 µm olarak ölçülmüştür. Bu değerler neticesinde YPIÖ değerleri ortalama % 94,29 olup bu değer uygun koşullarda % 96,09 oranına kadar yükselmektedir. Şekil 4'te tornalanmış ve EP işlemine tabi tutulmuş numunelerin görüntüleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 5 ise tornalanmış ve EP işlemine tabi tutulmuş numunelere ait yüzey pürüzlülük profillerini göstermektedir. Tablo ve şekiller incelendiğinde EP işleminin Inconel 718 alaşımının yüzey kalitesi üzerinde gözle görülür bir iyileştirme yaptığı görülmektedir.



Şekil 4. Numunelere ait görüntüler a) Tornalanmış, b) EP işlemine tabi tutulmuş

Tablo 5. Yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları

Deney No	Baskı Kuvveti	İlerleme Miktarı	Paso Sayısı	Ra _s	YPIÖ
1	160	0,02	1	0,191	% 94,25
2	240	0,02	2	0,154	% 95,37
3	320	0,02	3	0,168	% 94,95
4	400	0,02	5	0,299	% 91,00
5	240	0,04	1	0,257	% 92,27
6	160	0,04	2	0,138	% 95,85
7	400	0,04	3	0,130	% 96,09
8	320	0,04	5	0,167	% 94,98
9	320	0,06	1	0,267	% 91,97
10	400	0,06	2	0,170	% 94,89
11	160	0,06	3	0,258	% 92,24
12	240	0,06	5	0,142	% 95,73
13	400	0,08	1	0,197	% 94,07
14	300	0,08	2	0,164	% 95,07
15	240	0,08	3	0,192	% 94,22
16	160	0,08	5	0,142	% 95,73

**Şekil 5.** Numunelere ait pürüzlülük profilleri a) tormalanmış, b) EP işlemine tabi tutulmuş

3.1. EP parametrelerinin yüzey kalitesi üzerindeki etkileri

Bu bölümde Taguchi yaklaşımını gereği her bir parametrenin Sinyal/Gürültü (S/N) oranları tespit edilerek bu oranlar neticesinde her bir parametrenin YPIÖ üzerindeki etkileri incelenecektir. Sinyal/gürültü oranı, ortalama ile standart sapma arasındaki oran olarak tanımlanmaktadır. S/N değerlerinde 3 temel değerlendirme yöntemi bulunmaktadır [20]. Bu yöntemler;

a) En düşük olan değer en iyidir:

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i:1}^n y_i^2 \right)$$

b) En yüksek olan değer en iyidir:

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i:1}^n \frac{1}{y_i^2} \right)$$

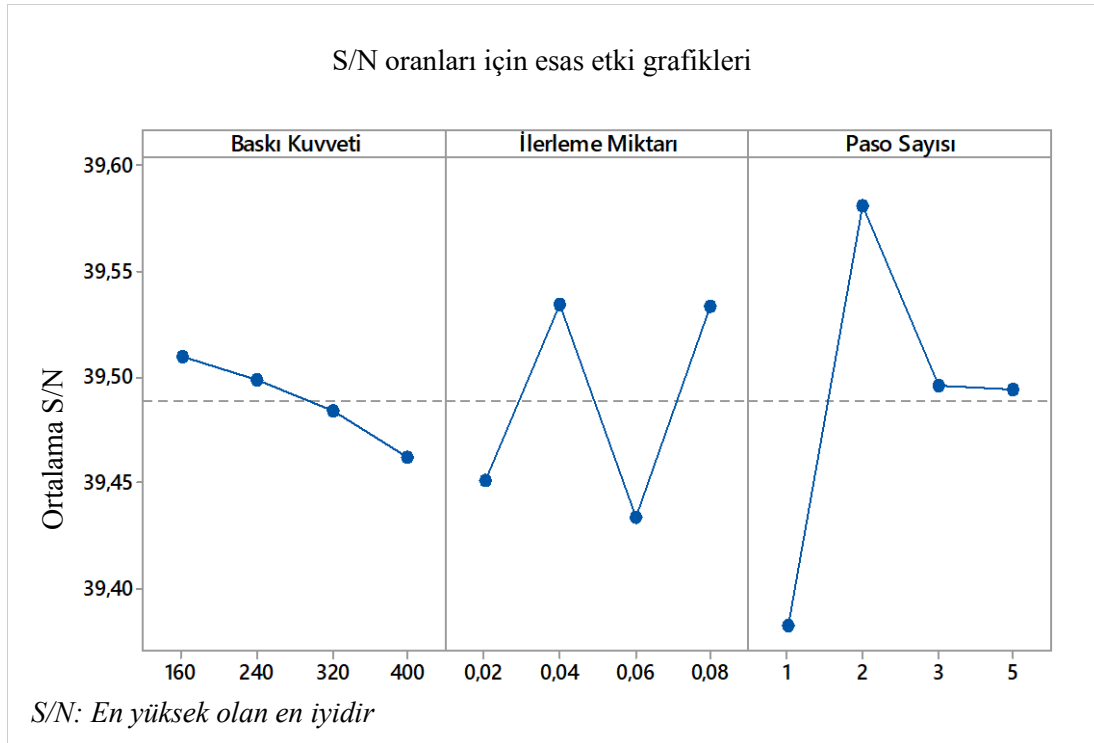
c) Ortalama olan değer en iyidir:

$$S/N = -10 \log \left(\frac{\bar{y}}{s^2 y} \right)$$

şeklindedir.

1. durum yüzey aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve sürtünme gibi sonucun düşük olmasının amaçlandığı durumlarda; 2. durum verim, takım ömrü, gibi sonucun yüksek olmasının istendiği durumlarda; 3. durum ise ürün boyutu, ortam sıcaklığı gibi sonuçların ortalama değerlerde olmasının istendiği durumlarda kullanılır. Her üç durum için de S/N oranının en yüksek olduğu değer en iyi sonucu vermektedir.

Bu çalışmada YPİO oranının yüksek olması istendiği için en yüksek olan değer en iyidir yaklaşımı benimsenmiştir ve S/N değerleri bu doğrultuda hesaplanmıştır. Hesaplamalar Minitab 17 paket programı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Parametrelerin her bir seviyesi için S/N değerleri ise Şekil 6'da görülmektedir. En yüksek S/N değeri YPİO anlamında en iyi sonucu veren seviyeyi belirtmektedir. Yani baskı kuvveti için en iyi seviye 160 N, ilerleme miktarı için 0,04 mm/dev ve paso sayısı için 2 değerleridir. YPİO için elde edilen S/N değerleri toplu halde Tablo 6'da görülmektedir.



Şekil 6. YPİO değerleri için Sinyal/Gürültü oranları

Tablo 6. Yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranları açısından S/N değerleri

Seviye	Baskı Kuvveti	İlerleme Miktarı	Paso Sayısı
1	39,51	39,45	39,38
2	39,50	39,53	39,58
3	39,48	39,43	39,50
4	39,46	39,53	39,49
Δ^*	0,05	0,1	0,2
Etki sırası	3	2	1

* S/N değerlerinin en yüksek ve en düşük değerleri arasındaki fark

Tablo ve şekil incelendiğinde yüzey pürüzlülüğü iyileşme oranları açısından en etkili faktörün paso sayısı olduğu ve bunu sırasıyla ilerleme miktarı ve baskı kuvveti parametrelerinin takip ettiği görülmektedir.

3.1.1. Baskı kuvvetinin YPİO üzerindeki etkileri

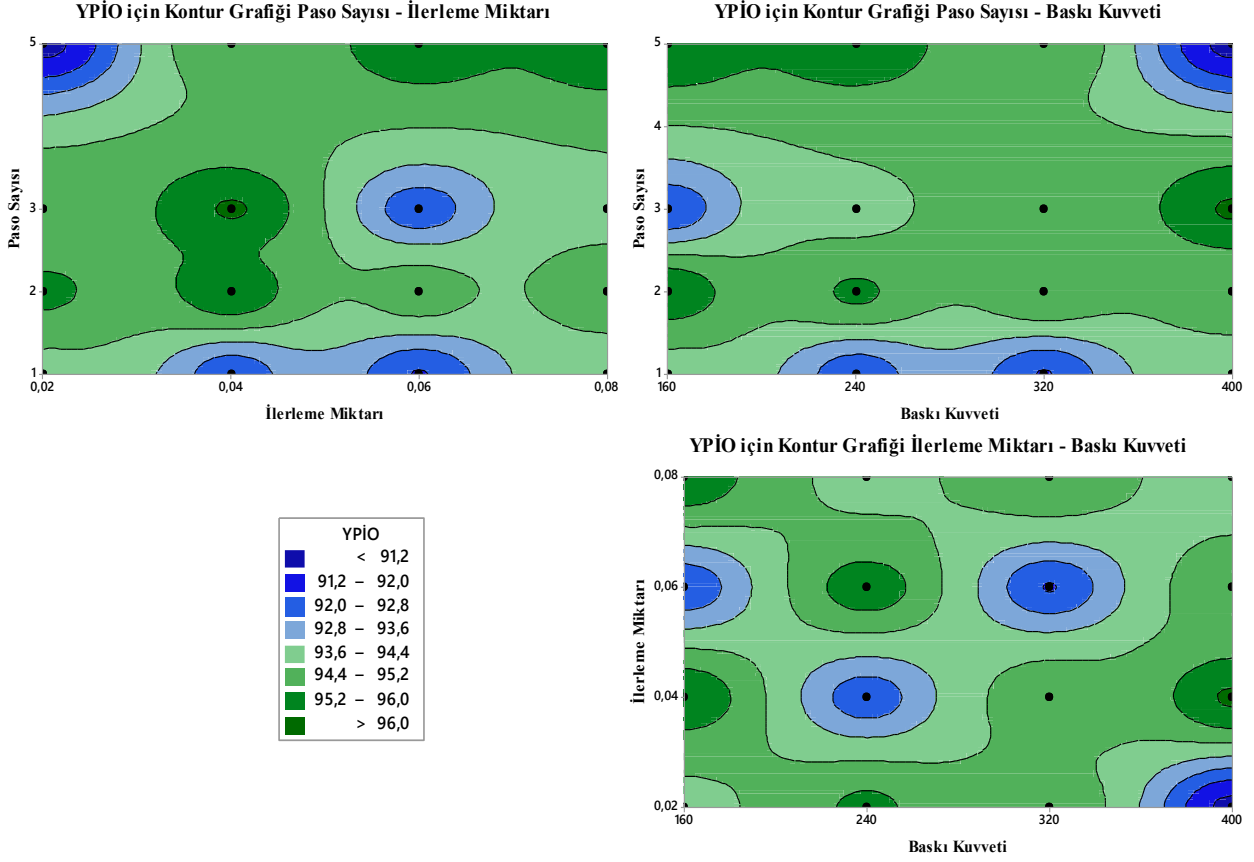
Baskı kuvvetinin YPİO üzerindeki etkisi ilerleme miktarı ve paso sayısına bağlı olarak Şekil 7'de görülmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere baskı kuvvetlerindeki artış özellikle düşük ilerleme miktarında YPİO değerleri üzerinde bir azalmaya yol açmaktadır. Artan kuvvetle birlikte yuvarlanma elemanının iş parçası yüzeyine nüfuz etme derinliği artmakta ve yüksek kuvvetlerde bu durum yüzey üzerinde bir miktar bozulmaya yol açmaktadır [21,22]. Öte yandan artan kuvvet iş parçası yüzeyinde deformasyon sertleşmesine sebep olmakta ve bu da yüzey kalitesini olumsuz etkilemektedir [21,23].

3.1.2. İlerleme miktarının YPİO üzerindeki etkisi

İlerleme miktarının YPİO üzerindeki etkisi paso sayısı ve baskı kuvvetine bağlı olarak Şekil 7'de görülmektedir. Şekil incelendiğinde düşük baskı kuvvetlerinde ve yüksek paso sayılarında ilerleme miktarı parametresinin 4. seviyesi olan 0,08 mm/dev değerinde en iyi YPİO değerinin elde edildiği görülmektedir. Çok düşük ilerleme miktarlarında iş parçası yüzeyinde fazla gerilmiş bir tabaka oluşmaktadır ve bu tabaka neticesinde yüzey kalitesi olumsuz etkilenmektedir. Literatürde yapılan çalışmalar da göstermektedir ki ilerleme miktarındaki artış diğer parametrelere bağlı olarak belirli bir seviyeye kadar YPİO üzerinde olumlu etki yaparken bir noktadan sonra olumsuz etkiye dönüşmektedir [24].

3.1.3. Paso sayısının YPİO üzerindeki etkisi

Paso sayısının YPİO üzerindeki etkisi ilerleme miktarı ve baskı kuvvetine bağlı olarak Şekil 7'de görülmektedir. Şekil incelendiğinde paso sayısının 1 olduğu deneylerde YPİO değerlerinin genel olarak ortalamanın altında kaldığı, özellikle düşük baskı kuvvetlerinde artan paso sayısının YPİO üzerinde olumlu etki yaptığı görülmüştür. Ancak yüksek baskı kuvvetlerinde paso sayısının 5 olduğu deneylerde bu durum tersine dönerek YPİO üzerinde olumsuz etki yaptığı görülmüştür. Bu durum artan baskı kuvvetlerinin daha derine nüfuz eden yuvarlanma elemanının aynı yüzey üzerinden çok sayıda geçerek yüzey üzerinde çok fazla deformasyon sertleşmesi meydana getirmesiyle ilişkilendirilebilir. Bu yüzden yüksek baskı kuvvetinin olduğu durumlarda paso sayısının 2-3 olarak belirlenmesi YPİO açısından olumlu etki yapacaktır. Benzer sonuçlar literatürdeki farklı çalışmalarda da edinilmiştir [24,25].



Şekil 7. İşlem parametrelerinin YPIÖ üzerindeki etkisi

4. Sonuçlar

Bu çalışmada özellikle havacılık ve uzay sanayiinde sıklıkla kullanılan Inconel 718 süper alaşımı tornalama işlemine tabi tutulduktan sonra ezerek parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Deneyler sonrasında tornalanmış ve EP işlemine tabi tutulmuş yüzeylerin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüş ve yüzey pürüzlülük değerlerinde iyileşme oranları hesaplanmış ve işlem parametrelerinin YPIÖ üzerindeki etkileri incelenmiştir. Taguchi kesirli faktöriyel deneysel tasarım yönteminin benimsendiği çalışmadaki 16 deney neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Sinyal/Gürültü oranı analizinden elde edilen veriler neticesinde YPIÖ üzerinde en etkili parametrenin paso sayısı olduğu ve bunu sırasıyla ilerleme miktarı ve baskı kuvveti parametrelerinin takip ettiği tespit edilmiştir.
- Baskı kuvvetindeki artışın özellikle yüksek paso sayısı ve düşük ilerleme miktarlarında YPIÖ üzerinde olumsuz etki yaptığı, ilerleme miktarındaki artışın YPIÖ üzerinde olumlu etki yaparken paso sayısındaki artışın özellikle yüksek baskı kuvvetlerinde olumsuz etki yaptığı tespit edilmiştir.
- YPIÖ değerleri incelendiğinde yüzey pürüzlülük değerlerinin ortalama % 94,29'luk bir iyileşme gösterdiği ve EP yönteminin Inconel 718 süper alaşımının yüzey kalitesini artırmaya yönelik başarılı ve uygulanabilir bir yöntem olduğu tespit edilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir. (Proje No: FKB:2021-11178)

Kaynaklar

- [1] F.Karaca, B. Aksakal. Effect of the TiBN Coating on a HSS Drill When Drilling the MA8M Mg Alloy. *Materials and Technology* 2016; 50; 75-79.
- [2] Taşlıyan A, Acarer M, Şeker U, Gökkaya H, Demir B. The Effect Of Cutting Parameters On Cutting Force During the Processing Of Inconel 718 Super Alloy. *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ* 2007; 22: 1-5.
- [3] Mahesh K, Philip J.T, Joshi S.N, Kuriachen B, Machinability of Inconel 718: A critical review on the impact of cutting temperatures. *Mater. Manuf. Process* 2021; 36; 753-791.
- [4] Aytaç A, Aztekin K, Inconel 718 Alaşımının Seramik Takımla Tornada İşlenebilirliğine Etki Eden Faktörlerin Taguchi Metodu İle Araştırılması. *Sci. J. Turkish Mil. Acad* 2019; 29; 229-246.
- [5] Reddy T.K, Kosaraju S, Nuka R, Experimental study and optimization of turning Inconel 718 using coated and uncoated inserts. *Mater. Today Proc* 2019; 19; 512-516.
- [6] Ezugwu E.O, Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys. *Int. J. Mach. Tools Manuf* 2005; 45; 1353-1367.
- [7] Özek C, Haşçalık A, Çaydaş U, Karaca F, Ünal E, Turning of AISI 304 Austenitic Stainless Steel, *Sigma J. Eng. Nat. Sci* 2006; 2; 117-121.
- [8] Zhou J, Bushlya V, Avdovic P, Stáhl J.E, Study of surface quality in high speed turning of Inconel 718 with uncoated and coated CBN tools. *Int. J. Adv. Manuf. Technol* 2011; 581; 141-151.
- [9] Motorcu A.R, Nikel Esaslı Süperalaşımın ve Titanyum Alaşımının İşlenebilirliği 1. Bölüm: Sinterlenmiş Karbür Takımların Performanslarının Değerlendirilmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg* 2009; 25; 302-330.
- [10] Zeilmann R.P, Fontanive F, Soares R.M, Wear mechanisms during dry and wet turning of Inconel 718 with ceramic tools. *Int. J. Adv. Manuf. Technol* 2017; 92;2705:2714.
- [11] Akkurt A, Ovalı İ, Ezme ve Geleneksel Bitirme İşlemlerinin Al 6061 Alüminyum Alaşımı Parçaların Yüzey Pürüzlülüğü ve Daireselliği Üzerine Etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg* 2009; 15; 371-382.
- [12] Özkan S, Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen parçalarda haddeleme (burnishing) ile yüzeylerin işlenmesi, haddelemenin yüzey pürüzlülüğü ve sertleşmeye etkisinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2006.*
- [13] Luca L, Investigations into the Use of Ball-Burnishing of Hardened Steel Components as a Finishing Process. PhD Thesis, University of Toledo, Toledo, USA, 2002.
- [14] Shen X, Gong X, Wang B, He J, Xu C, Su G, Surface properties enhancement of Inconel 718 alloy by ultrasonic roller burnishing coupled with heat treatment. *Arch. Civ. Mech. Eng* 2021; (21); 1-17.
- [15] Casarin S.J, De Angelo Sanchez L.E, Bianchi E.C, Scalon V.L, Fragelli R.L, De Godoi E.L, Cindra Fonseca M.D.P, Effect of burnishing on Inconel 718 workpiece surface heated by infrared radiation. *Mater. Manuf. Process* 2021; 36; 1853-1864.
- [16] Sequera A, Fu C.H, Guo Y.B, Wei X.T, Surface integrity of Inconel 718 by ball burnishing. *J. Mater. Eng. Perform.* 2014; 23; 3347-3353.
- [17] López De Lacalle L.N, Lamikiz A, Sánchez J.A, Arana J.L, The effect of ball burnishing on heat-treated steel and Inconel 718 milled surfaces. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2006; 329; 958-968.
- [18] Yaman N, Sunay N, Kaya M, Kaynak Y, Enhancing Surface Integrity of Additively Manufactured Inconel 718 by Roller Burnishing Process, *Procedia CIRP.* 2022; 108; 681-686.
- [19] Hua Y, Liu Z, Wang B, Hou X, Surface modification through combination of finish turning with low plasticity burnishing and its effect on fatigue performance for Inconel 718, *Surf. Coatings Technol* 2019; 375; 508-517.
- [20] Özek C, Ünal E, Optimization and Modeling of Angular Deep Drawing Processfor Square Cups, *Mater. Manuf. Processes* 2011; 26; 1117-1125.
- [21] Hassan A.M, The effects of ball- and roller-burnishing on the surface roughness and hardness of some non-ferrous metals, *J. Mater. Process. Technol* 1997; 72; 385-391.
- [22] Yen Y.C, Sartkulvanich P, Altan T, Finite element modeling of roller burnishing process, *CIRP Ann. - Manuf. Technol* 2005; 54; 237-240.
- [23] El-Axir M.H, An investigation into roller burnishing, *Int. J. Mach. Tools Manuf* 2000; 40; 1603-1617.
- [24] Loh N.H, Tam S.C, Effects of ball burnishing parameters on surface finish—A literature survey and discussion, *Precis. Eng* 1988; 10; 215-220.
- [25] Neema M, Pandey P.C, Investigation of the Performance Characteristics of Cold-Worked Machined Surfaces, *Wear* 1980; 60; 157-166.

Çinko İçeren Liç Edilmiş Malahit Cevherinden Çinko İyonlarının D2EHPA Ekstraktantı İle Kazanılmasının İncelenmesi

Mehmet Kayra KARACAHAN^{1*}

¹Kimya ve Kimyasal İşleme Teknolojileri Bölümü, Tunceli MYO, Munzur Üniversitesi, Tunceli

*¹mtanaydin@munzur.edu.tr

(Geliş/Received: 05/01/2023;

Kabul/Accepted: 11/03/2023)

Öz: Bu çalışmada, smithsonit cevherinin sülfürik asit çözeltilerinde liç edilmesinden sonra elde edilen gerçek liç çözeltilisinden Zn²⁺'nin kazanımı solvent ekstraksiyon yöntemi uygulanarak incelenmiştir. Organik faz, D2EHPA ve kerosen kullanılarak hazırlanmıştır. Çözeltinin başlangıç pH'nın, ekstraktan derişiminin, karıştırma süresinin ve karıştırma hızının ekstraksiyon işlemi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ekstraktan derişimi, sulu çözeltinin başlangıç pH'ı, karıştırma hızı ve karıştırma süresindeki artışla ekstraksiyon veriminin arttığı belirlenmiştir. Sulu fazdan organik faza Zn²⁺ transferini seçimli olarak artmasını sağlamak için sulu fazın başlangıç pH'ı, ekstraktan derişimi, karıştırma süresi ve karıştırma hızı için optimum değerler sırasıyla 3.5, 0.1 mol/L, 10 dk ve ve 500 rpm olarak tespit edilmiştir. Denge eğim analiz yöntemi uygulanarak ekstraksiyon işleminin stokiyometrisi ve mekanizması belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Çinko, Smithsonit, Solvent ekstraksiyonu, D2EHPA.

Investigation of Recovery of Zinc Ions from Zinc-Containing Leached Malachite Ore by D2EHPA Extractant

Abstract: In this study, the recovery of Zn²⁺ from the actual leach solution obtained after leaching smithsonite ore in sulfuric acid solutions was investigated by applying the solvent extraction method. The organic phase was prepared using D2EHPA and kerosene. The effects of the initial pH of the solution, extractant concentration, stirring time, and stirring speed on the extraction process were investigated. It was determined that the extraction efficiency increased with the increase in the extractant concentration, the initial pH of the aqueous solution, the stirring speed, and the stirring time. In order to selectively increase the transfer of Zn²⁺ from the aqueous phase to the organic phase, the optimal values for the initial pH of the aqueous phase, extractant concentration, stirring time, and stirring speed were determined as 3.5, 0.1 mol/L, 10 min, and 500 rpm, respectively. The stoichiometry and mechanism of the extraction process were determined by applying the equilibrium slope method.

Key words: Zinc, Smithsonite, solvent extraction, D2EHPA.

1. Giriş

Metaller, endüstriyel gelişmede ve yaşam standartlarının iyileştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu metaller arasında çinko boya, kozmetik, gıda, inşaat, otomobil, ilaç, deterjan, tekstil, deri, elektrikli ekipman veya korozyon koruması için metalik kaplamalarda uygulama bulan ve en yaygın kullanılan metallere biridir. Çinko, çoğunlukla sülfürlü cevherlerinden üretilmektedir, çünkü sülfürlü minerallerin gang minerallerinden ayrılması ve geleneksel flotasyon teknikleri ile konsantre edilmesi daha kolaydır [1]. Sülfürlü cevherlerinden, geleneksel kavurma-liç-elektrokazanma proseslerinin uygulanmasıyla çinko üretimi gerçekleştirilmektedir. Bununla birlikte, çinko sülfürlü cevherler çinko metal üretiminin birincil kaynağıdır ve tükenmesi söz konusudur, bu nedenle smithsonit (ZnCO₃), zinkit (ZnO), willemite (Zn₂SiO₄), hemimorfite (Zn₄Si₂O₄(OH)₂.H₂O) ve hidrozinsit (Zn₅(CO₃)₂(OH)₆) gibi oksitli çinko mineralleri de son yıllarda önemli bir çinko cevheri kaynağı haline gelmiştir. Günümüzde karbonat cevherleri, silikat cevherleri ve ikincil kaynaklar gibi sülfürlü olmayan cevherlerden çinko kazanımı araştırılmaktadır. Çinkoyu kazanmak için yaygın olarak hidrometalurjik prosesler uygulanmaktadır. Metallerin hidrometalurjik ekstraksiyonu genellikle daha az maliyetlidir ve SO₂ ve diğer bazı tehlikeli gazları yaymadığı için çevreye daha az zararlıdır [2]. Liç işlemleri, hidrometalurjik yöntemlerin ilk adımını oluşturur ve metallerin ekonomik bir şekilde ekstraksiyonunda önemli bir rol oynamaktadır [3]. HCl [4], HNO₃ [5], ve H₂SO₄ [6] gibi mineral asitler, liç reaktifleri olarak yaygın olarak kullanılır ve bunlardan en çok H₂SO₄ tercih edilmektedir [3]. Üretim maliyetlerini azaltmak ve çevre kirliliğini önlemek için metal geri dönüşümüne ve sülfürlü olmayan

* Sorumlu yazar: mtanaydin@munzur.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0003-1696-0754

çinko cevherlerinden metalik çinko kazanımı için yeni prosesler araştırılmaktadır [3,7]. 2021'deki tahmini küresel çinko madeni üretimi, hükümetlerin zorunlu kıldığı karantinalar ve küresel COVID-19 pandemisinin başlamasının ardından çinko fiyatlarındaki düşüş nedeniyle bazı ülkelerde maden üretiminin kısıtlandığı 2020 yılına göre, artış göstermiştir. Uluslararası kurşun ve çinko çalışma grubu'na (International Lead and Zinc Study Group) göre, 2021'de tahmini küresel rafine çinko üretiminin bir miktar artarak 14.13 milyon tona, metal tüketiminin ise %6 artarak 14.09 milyon tona yükseleceği tahmin edilmektedir [8].

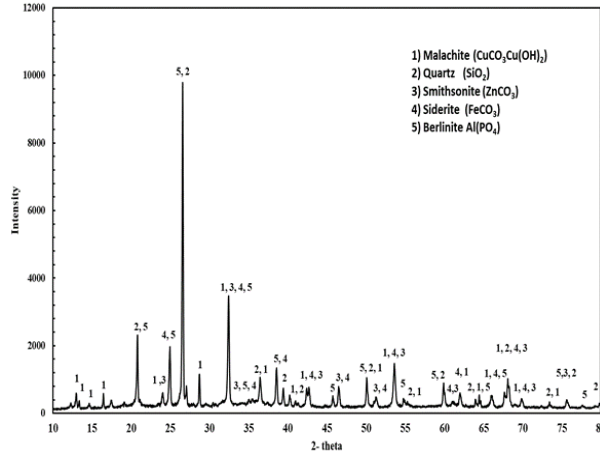
Hem birincil hem de ikincil çinko kaynaklarının işlenmesi için uygulanan proseslerin geliştirilmesi, sülfatlı ortamdan çinkonun elektrokazanımı, eser miktardaki safsızlıkların varlığına karşı son derece hassastır ve yüksek oranda saflaştırılmış bir elektrolit gerektirmektedir [9]. Elektrolitin saflığı, hem yüksek dereceli bir katot çinko tortusu elde edilmesini, hem de çinko üretim maliyetini ve tüketilen enerji miktarını önemli ölçüde azaltmaktadır. Elektroliz için beslenen çinko sülfat çözeltisinin saflığı, katot çinkonun saflığı ve yapısı buna bağlı olduğundan, akım kullanım katsayısı, güç tüketimi, tankların voltajı ve çinko maliyet fiyatını belirleyen diğer parametreler olarak bilinmektedir [10]. Bu nedenle saflığı artırılmış bir çinko elektrolit çözeltisi hazırlamak için bu safsızlıkların giderilmesi gerekmektedir. Hidrometalurjik proseslerden biri olan solvent ekstraksiyon yöntemi uygulanarak bu safsızlıklar uzaklaştırılabilir. Solvent ekstraksiyonu, hidrometalurjide en önemli ayırma ve saflaştırma işlemlerinden biri olmuştur. Özellikle fosfor bazlı ticari bir ekstraktant olan di(2-etilhekzil) fosforik asit'in (D2EHPA), geniş bir ekstraksiyon yeteneğinin yanı sıra demir, bakır, gümüş, kadmiyum, kobalt gibi metal iyonlarını ayırma ve saflaştırma işlemleri için özel bir önemi olduğu kanıtlanmıştır. Farklı asidik çözeltilerden nikel, manganez, magnezyum, kalsiyum, sodyum, potasyum, arsenik ve antimon gibi değerlerinde ayrılmasında kullanılmıştır [11].

Bu çalışmada, çinko içeren malahit cevherinin sülfürik asit ile liç edilmesinden elde edilmiş sulu çözeltiden çinko iyonlarının solvent ekstraksiyonu ile kazanımı incelenmiştir. Solvent ekstraksiyon verimine etki eden pH, ekstraktant konsantrasyonu, karıştırma hızı ve karıştırma süresi gibi parametrelerin etkileri araştırılmış ve optimum değerlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

Solvent ekstraksiyon deneyleri, malahit cevherinin sülfürik asit çözeltilerinde liç edildikten sonra hazırlanan stok liç çözeltisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan cevher örneği Türkiye'nin Tunceli ili Ovacık bölgesinden temin edilmiştir. Mineral kırılıp, öğütülmüş ve farklı partikül boyutlarına sahip numuneler elde etmek için standard eleklerden geçirilmiştir. Liç deneyleri için ortalama boyutu 115, 137, 164, 214 ve 335 µm olan partiküller elde edilmiştir. Cevher numunesinin mineralojik analizi X-ışını-difraktometre (XRD), (Rigaku-RadB-DMX-II model, TX) kullanılarak yapılmıştır. Malahit mineralinin XRD analiz sonucu Şekil 1'de gösterilmiştir. XRD analizinin sonucu, numunenin kuvars (SiO₂), smithsonit (ZnCO₃), malahit (CuCO₃Cu(OH)₂), siderit (FeCO₃) ve berlinit Al(PO₄) içerdiği tespit edilmiştir. Numunenin X-ışınları floresans spektrometresi (XRF) (Rigaku ZSX Primus II model XRF) ile yapılabimsyasal analiz sonucu Tablo 1'de verilmiştir. Cevherin kızdırma kaybı 800°C'de %10.25 olarak belirlenmiştir.

Stok liç çözeltisinin hazırlanması için belirlenen optimum liç koşulları sırasıyla sülfürik asit konsantrasyonu, sıcaklık, karıştırma hızı, katı/sıvı oranı, ortalama partikül boyutu ve reaksiyon süresi 0,05 M, 20°C, 400 rpm, 2 g/500 mL, 115 µm ve 90 dakika olduğu belirlenmiştir. Liç deneyleri, mekanik karıştırıcı, termostat ve geri soğutucu ile donatılmış 1 L'lik ceketli cam reaktörde gerçekleştirilmiştir. Aynı koşullarda birkaç liç deneyi yapılmış ve elde edilen çözeltiler bir kaptaki stoklanmıştır. Bu stok çözelti, solvent ekstraksiyon deneylerinde kullanılmıştır. Stok liç çözeltisinin 160 mg/L bakır iyonları, 205 mg/L çinko iyonları ve 45 mg/L demir iyonları içerdiği belirlenmiştir. Bakır, çinko ve demir gibi çözünmüş metal türlerinin miktarı, titrant olarak EDTA çözeltisi kullanılarak kompleksometrik olarak hesaplanmıştır. Puffer tablet, 5-sülfosalisilik asit, mureksit sırasıyla çinko, demir ve bakır iyonlarının tayininde indikatör olarak kullanılmıştır [12]



Şekil 1. Çalışmada kullanılan cevhere ait XRD spektrumu

Tablo 1. Çalışmada kullanılan malahit mineralinin XRF analizi

Bileşenler	SiO ₂	ZnO	CuO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Kızdırma kaybı	Diğer oksitler
%	45.62	21.27	6.3	12.05	3.42	10.25	1.09

2.1. Solvent ekstraksiyon deneyleri

Stok liç çözeltisinden çinko iyonlarını ayırmak için solvent ekstraksiyon yöntemi uygulanmıştır. Solvent ekstraksiyon deneylerinde kullanılan organik faz, farklı derişimlerde ekstraktan (D2EHPA) içeren kerosen içerisinde karıştırılarak hazırlanmıştır. Kerosen, seyreltici/taşıyıcı olarak kullanılmıştır. Çinko iyonları içeren sulu fazın başlangıç pH'ı, sülfürik asit ve sodyum karbonat çözeltileri ilave edilerek ayarlanmıştır. Solvent ekstraksiyon deneyleri, manyetik bir karıştırıcı üzerine yerleştirilmiş 150 mL'lik ceketli cam reaktörde gerçekleştirilmiştir. 25 mL/25 mL organik ve sulu çözelti oranı cam reaktöre ilave edildikten sonra belirli karıştırma hızında karıştırılmıştır. Ekstraktant olarak kullanılan D2EHPA'ya (Sigma-Aldrich, %97) herhangi bir saflaştırma işlemi uygulanmamıştır. Seyreltici olarak kullanılan Kerosen Petrol Ofisinden satın alınmış ve herhangi bir işlem uygulanmamıştır. D2EHPA'nın 1 molar stok çözeltisi 1 L'lik bir balon jodede kerosen kullanılarak hazırlanmış ve stok olarak saklanmıştır. Farklı D2EHPA derişimleri için bu stok çözelti kullanılmıştır.

Ekstrakte edilen metal fraksiyonları Eşitlik (1) ile hesaplanmıştır. Burada M, çinko, demir ve bakır gibi türleri temsil etmektedir.

$$\text{Ekstrakte edilen metal verimliliği} = \frac{\text{Sulu fazdaki başlangıç metal miktarı} - \text{Sulu fazda kalan metal miktarı}}{\text{Sulu fazdaki başlangıç metal miktarı}} * 100 \quad (1)$$

Sulu fazdan organik faza metal iyonunun taşınım eğiliminin değerini ölçen metal iyonunun dağılım katsayısı aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$D_M = \frac{\text{Organik fazdaki metal iyonu miktarı}}{\text{Sulu fazdaki metal iyonu miktarı}} \quad (2)$$

Ayrıca, aşağıdaki formül kullanılarak Cu ve Fe'den Zn için seçimlilik faktörü aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır. M çözelti içerisinde yer alan herhangi bir metali temsil etmektedir.

$$\beta_{Zn} = \frac{D_{Zn}}{D_M} \quad (3)$$

Burada D_{Zn} çinkonun dağılım katsayısıdır.

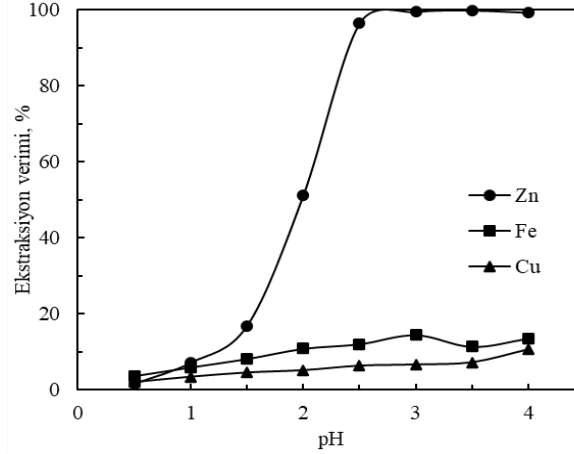
3. Deneysel Bulgular ve Tartışma

Liç reaktifi olarak kullanılan ve kuvvetli bir asit olan sülfürik asit (H_2SO_4) suda çözündüğünde tamamen iyonlaşır. Bazı karaktere sahip olan malahit cevheri sulu çözeltideki H_3O^+ iyonu ile reaksiyon vererek çözünür ve cevherdeki çinko, demir ve bakır katı fazdan çözelti ortamına geçer. Cevherdeki smithsonit minerali ile sülfürik asit arasındaki reaksiyon Eşitlik (4)'de, D2EHPA ile yapılan çinko ekstraksiyonu temsili olarak Eşitlik (5)'teki yazılabilir.

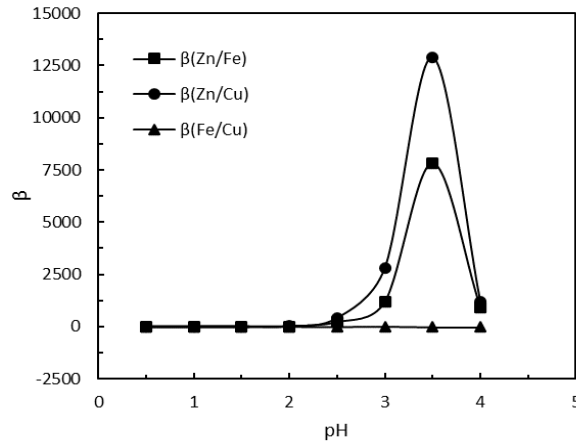


3.1. Başlangıç pH değerinin D2EHPA ile çinko, demir ve bakır iyonlarının ekstraksiyonları üzerine etkisi

Liç çözeltisinin başlangıç pH'ının metal iyonları ekstraksiyonu üzerindeki etkisi pH 0.5-4 aralığında incelenmiştir. Sulu fazın metal iyonlarının ekstraksiyonunda bazı başlangıç pH değerlerinin etkisiyle elde edilen ekstraksiyon verimleri ve seçimlilik faktörü değerlerinin sonuçları Şekil 2 ve 3'te grafiklerde verilmiştir. Bu deneylerde karıştırma süresi, karıştırma hızı, organik faz/sulu faz oranı (O/S), D2EHPA ekstraktant konsantrasyonu, dinlendirme süresi ve sıcaklık sırasıyla 10 dk, 500 rpm, 25/25 mL/mL, 0.1 mol/L, 10 dk, 20°C'de sabit tutulmuştur.



Şekil 2. Farklı pH değerlerinde D2EHPA ekstraktantı ile çinko, bakır ve demir ekstraksiyon kesirindeki değişimleri.



Şekil 3. Farklı pH değerlerinde çinko, demir ve bakır değerleri için seçimlilik faktörleri.

Şekil 2'de, pH aralığı 0.5-4 olduğunda çinko ve demir ekstraksiyon verimleri verilmiştir. pH 0.5-4 aralığında çinko iyonları için sırasıyla %1.4 - %99.3, demir iyonları için sırasıyla %3.6 - %13.5 ve bakır için sırasıyla %2 - %10.6 arasında elde edilmiştir. pH 1.5 değerinde %16.7 çinko ekstrakte edilirken pH:3.5 değerinde %99.9 çinko ekstraksiyonu gerçekleşmiştir. Şekil 2'den pH değerinin artmasıyla çinko ve bakır ekstraksiyon veriminin arttığı tespit edilmiştir.

D2EHPA molekülleri, aromatik seyrelticilerde monomerler olarak ve alifatik olanlarda çözündüklerinde dimerler olarak baskındır [13]. Alifatik seyrelticiler, daha düşük toksisiteleri nedeniyle ekstraksiyon işlemlerinde tercih edilir. Çinko kompleks oluşumunun ekstraksiyon aşaması için farklı mekanizmalar önerilmektedir [14], ilk olarak heterojen bir kimyasal reaksiyon mekanizması aşağıdaki gibi verilmiştir. Burada D2EHPA, RH terimi ile gösterilmiştir.



Adsorptif reaksiyon ile Eşitlik (8) yazılabilir.



Ve ikinci olarak sulu fazda meydana gelen bir homojen reaksiyon ile Eşitlik (9) yazılabilir.



Eşitlik (9)'dan sonra adsorpsiyon ile Eşitlik (10) yazılabilir.



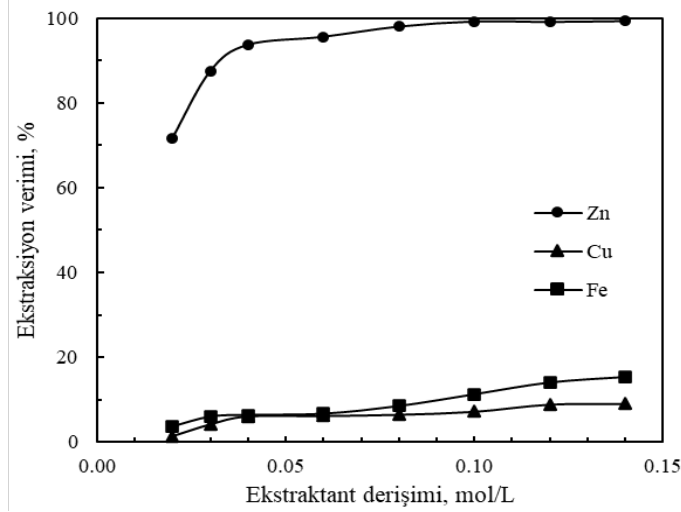
Çinko iyonları ve monomerler arasındaki heterojen reaksiyonun neden olduğu çinko kompleksi oluşumu (Eşitlik (7)) monomer adsorpsiyonunun önemi nedeniyle kuvvetli asit çözeltilerinde baskın iken, katyon değiştiricinin anyonik tortusunun neden olduğu kompleks oluşumu (Eşitlik (8)) artan pH ile daha önemlidir. Çinko iyonlarının konsantrasyonu azaldıkça, bazik çözeltilerin ekstraksiyonu sırasında reaksiyon bölgesi sulu faza geçer. Reaksiyon sadece sulu fazda gerçekleşirse, o zaman Eşitlik (10)'daki gibi homojen bir reaksiyona sahip bir reaktif sınır tabakası vardır ve uzaysal boyutu reaktanların transferine bağlıdır. Bu sınır tabakası içinde, bir reaktanın bileşiminin yitirilmesi tamamlanmamışsa, Eşitlik (8)'teki heterojen reaksiyon ayrıca arayüzeyde meydana gelir [14].

Ayrıca Şekil 3'den çinkonun bakır ve demire göre seçimlilik faktörlerinin farklı pH değerlerinde değiştiği görülmektedir. Çinkoya göre demir için en yüksek seçimlilik faktörü pH 3.5 değerinde belirlenmiştir. Seçimli bir çinko kazanımı sağlamak için bundan sonraki çalışmalarda pH değeri 3.5 olarak ayarlanmıştır. Martins ve arkadaşlarının yapmış olduğu bir çalışmada [15] bakır, nikel ve klorür üzerinden çinkoyu seçimli olarak ekstrakte etmek için pH 4 değeri optimum koşul iken, demire göre çinko seçiciliğinin düşük olduğu görülmüştür; florür içermeyen çinko seçiciliği, yüksek seviyede kirletici ekstraksiyonu nedeniyle pH 5'te düştüğü belirlenmiştir. Çinko, mangan ve kadmiyum içeren klorürlü bir ortamda D2EHPA ile yapılan solvent ekstraksiyon işleminde çinkodan kadmiyum ayrımı mangan ayrımından daha fazla olduğu, seçimlilik faktörü hesaplamaları ile ayrıca her bir pH değeri için kadmiyumdan çinko seçimlilik faktörünün mangandan çinko ayırmasından daha büyük olduğu Jafari ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada tespit edilmiştir [16].

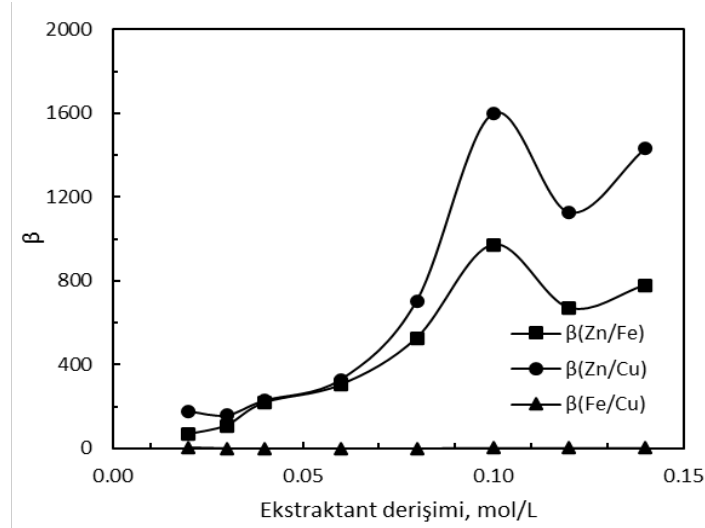
3.2. Ekstraktan konsantrasyonunun ekstraksiyon üzerine etkisi

Organik fazdaki D2EHPA derişiminin ekstraksiyon işlemi üzerindeki etkisini gözlemlemek için deneyler, 0.02-0.14 mol/L aralığında farklı derişimlerde ekstraktan kullanılarak yapılmıştır. Bu deneylerden elde edilen bulgular Şekil 4'te verilmiştir. Organik fazda D2EHPA derişiminin artmasıyla Zn^{2+} ekstraksiyon yüzdesinin arttığı görülmüştür. Organik fazdaki ekstraktant derişimi 0.02'den 0.14'e yükseldiğinde Zn^{2+} 'nın ekstraksiyon veriminin %71.6'dan %99.3'e yükseldiği belirlenmiştir. D2EHPA'nın derişimi arttıkça, organik fazdaki ekstraktan maddenin miktarı artar. Böylece, şelatlama maddesi ile Zn^{2+} arasındaki metal-organik kompleksi oluşturmak için bağlayıcı veya aktif merkezin miktarı artar. D2EHPA derişiminin çinko için bakır ve demirden daha iyi bir seçiciliğe sahip

olduğu Şekil 5’de verilen grafikte gösterilmiştir. Şekil 5’ten görüldüğü üzere 0.1 mol/L’lik D2EHPA derişiminde çinkonun bakıra göre seçimlilik faktörü 1598 iken, bu değer demire göre 973 olarak belirlenmiştir. Seçimlilik faktörünün en yüksek bulunduğu 0.1 mol/L’lik derişim uygun değer olarak seçilmiş ve diğer deneyler D2EHPA derişimi 0.1 mol/L olarak alınmıştır.



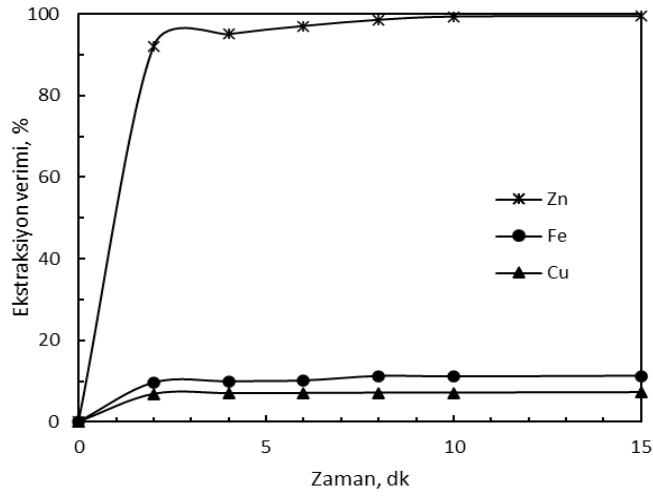
Şekil 4. Ekstraktan derişiminin D2EHPA ile çinkonun ekstraksiyonuna etkisi



Şekil 5. Çeşitli ekstraktan derişimlerinde çinko, demir ve bakır değerleri için seçimlilik faktörleri.

3.3. Karıştırma süresinin ekstraksiyon üzerine etkisi

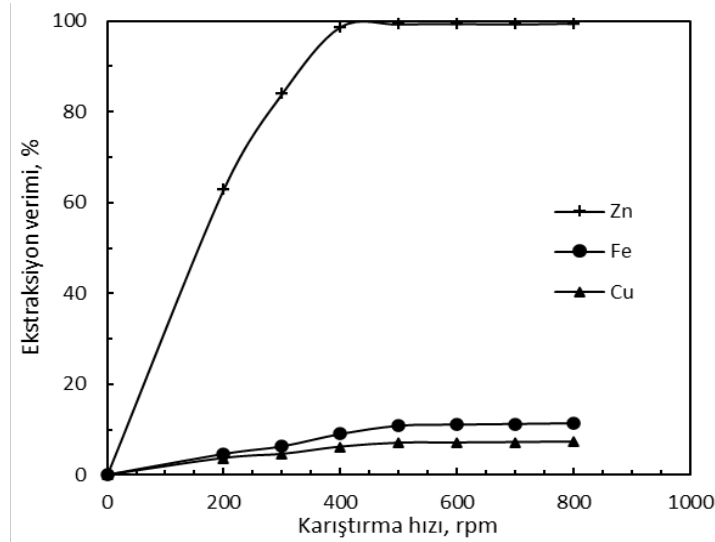
Karıştırma süresinin ekstraksiyon verimi üzerindeki etkisini görmek için deneyler 2-15 dk zaman aralığında gerçekleştirilmiştir. Karıştırma süresi için elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 6’da verilmiştir. Bu sonuçlardan, Zn^{2+} ’nın ekstraksiyon yüzdesi, karıştırma süresinde bir artışla artmaktadır 2 dakikalık karıştırma süresinde sulu çözeltildeki %92 Zn^{2+} ekstrakte edilirken 10 dakikalık karıştırma süresinde %99.3 Zn^{2+} ekstrakte edilmiştir. Karıştırma süresi arttıkça iki fazın temas süresi uzar ve dolayısıyla organik faza aktarılan Zn^{2+} miktarı artmakta ve 10 dakikalık bir karıştırma süresinin yeterli olduğu görülmüştür.



Şekil 6. Karıştırma süresinin D2EHPA ile bazı metallerin ekstraksiyonu üzerine etkisi

3.4. Karıştırma hızının ekstraksiyon üzerindeki etkisi

Solvent ekstraksiyon işleminde, organik ve sulu fazlar birbiriyle karışmadığından, iki faz arasındaki kütle transferini kolaylaştırmak için kuvvetli bir karıştırma işlemi uygulanmalıdır. Böylece sulu fazdan organik faza ekstraksiyon verimi konvektif kütle transferi vasıtasıyla artırılabilir. Karıştırma hızının çinko ekstraksiyonu üzerindeki etkisi 200-800 rpm aralığında incelenmiştir. Şekil 7'de verilen sonuçlar, karıştırma hızı 200'den 500 rpm'ye yükseldiğinde sulu fazdan organik faza Zn^{2+} ekstraksiyon yüzdesinin önemli ölçüde arttığını gösterir. 200 rpm karıştırma hızında, liç çözeltisindeki %63 Zn^{2+} organik faza aktarılırken, 500 rpm karıştırma hızında %99.3 Zn^{2+} ekstrakte edilmiştir. Şekil 7'den Zn^{2+} 'nın neredeyse tamamının ekstrakte edilmesinden dolayı 500 rpm'nin üzerindeki karıştırma hızının artmasının, ekstraksiyon kapsamında büyük bir değişiklik sağlamadığı görülmektedir.



Şekil 7. Karıştırma hızının ekstraksiyon üzerine etkisi

Martins ve ark. yaptığı bir çalışmada pirinç külünün H_2SO_4 ile liç edilmesinden elde edilen çözeltinin 28.6 g/L Zn, 1.5 g/L Cu, 433.4 mg/L Fe, 451.7 mg/L Ca, 7.3 mg/L ve diğer bileşenlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu çözelti D2EHPA ile solvent ekstraksiyon işlemine uygulanmıştır. Sulu faz/Organik faz oranı 1, D2EHPA %30 (v/v), pH 3.5 değerinde yaklaşık %94 Zn(II) ve %21 Cu(II) iyonlarının ekstrakte edildiği tespit edilmiştir. pH 2 değerinde 10 dakikalık bir karıştırma süresi sonunda %71 Zn ve %9 Cu iyonlarının D2EHPA %30 (v/v), sulu faz/organik faz oranı 1) ile ekstrakte edildiği belirlenmiştir [15].

Mehdiabad madeninden çinko oksit cevheri H₂SO₄ çözeltisi ile liç edilmiştir. Elde edilen liç çözeltisi D2EHPA ekstraktantı ile çinko iyonları ekstrakte edilmiştir. Çinko kazanım miktarı optimum koşullarda %52.66, demir ve manganez kazanımı %66.52 ve %2.63 olarak bulunmuştur. D2EHPA, pH 2.5 değerinde hem çinko hem de demiri ekstrakte etmiştir. Ancak sıyırma işleminde demir organik fazda kaldığı için bu sorun çözülmüştür. Ekstraksiyon izotermi, 0.2-5, başlangıç pH'ı 2.5 ve %30 (v/v) D2EHPA konsantrasyonunda farklı organik faz: sulu çözelti oranlarında nötralize edilmiş çözelti ve organik fazın bir kombinasyonu ile belirlenmiştir. D2EHPA seçicilik sırasının Fe(III) < Zn(II) < Ca(II) < Al(III) < Mn(II) < Cd(II) ~ Cu(II) < Mg(II) < Co(II) < Ni(II) şeklinde olduğu bildirilmiştir [17].

3.5. Stokiyometri ve Ekstraksiyon İşlem Mekanizmasının Belirlenmesi

Organik fazda oluşan metal-organik kompleksin stokiyometrisi denge-eğimi yöntemi ile belirlenebilir [18,19] Eğim analiz yöntemi uygulanır ve dağılım oranına başvurulur. Eşitlik (5)'teki ekstraksiyon reaksiyonu için denge sabiti (K_e), Eşitlik (11)'daki gibi yazılabilir.

$$K_e = \frac{[R_nZn]_{(org)}[H^+]^n}{[Zn^{2+}]_{(aq)}[RH]^n} \quad (11)$$

Dağılım oranı Eşitlik (12) ile tanımlanabilir.

$$D = \frac{[R_nZn]_{(org)}}{[Zn^{2+}]_{(aq)}} = \frac{[Zn^{2+}]_{(org)}}{[Zn^{2+}]_{(aq)}} \quad (12)$$

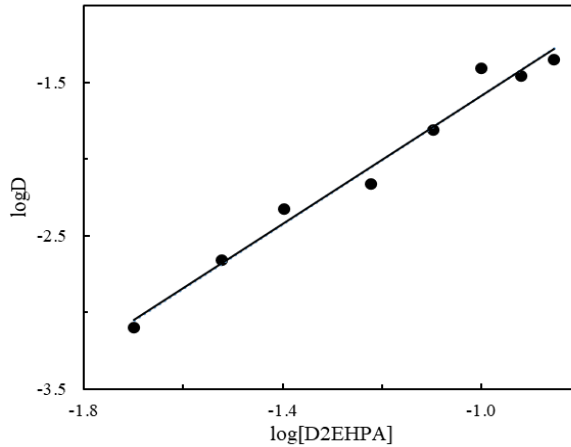
Burada [Zn²⁺]_(org) veya [R_nZn]_(org) organik faza aktarılan Zn²⁺ konsantrasyonudur ve [Zn²⁺]_(aq) sulu fazda kalan Zn²⁺ konsantrasyonudur. Eşitlik (11) ve Eşitlik (12) birleştirilip yeniden düzenlenerek, Eşitlik (13) elde edilir.

$$D = K_e \frac{[RH]^n}{[H^+]_{aq}^n} \quad (13)$$

Eşitlik (13)'in her iki tarafının logaritması alınır ve yeniden düzenlenirse Eşitlik (14) elde edilir.

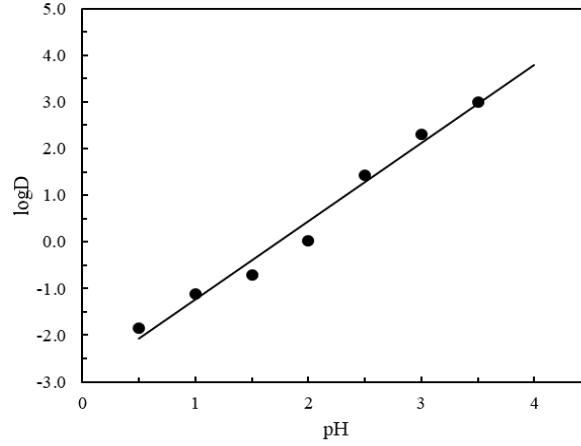
$$\log D = \log K_e + n \log [RH]_{(org)} - \log [H^+]^n \quad (14)$$

Böylece, ekstraksiyon reaksiyonunun stokiyometrisini belirlemek için gerekli eğim-analiz yöntemi Eşitlik 9'da gösterilmiştir. Sabit bir pH değerinde, logD'ye karşı log[RH]_(org) grafiği çizildiğinde, düz çizginin eğimi metal-organik kompleks oluşumuna katılan RH molekülü sayısını verir. logD ile log[RH]_(org) arasındaki ilişkiyi gösteren bir grafik Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. logD'ye karşı log[D2EHPA] grafiği

Bu şekilde, eğimi 2.10 (≈ 2) olan düz bir çizginin oluştuğu görülebilir. Eğimin bu değeri, iki ekstraktant molekülü ve bir Zn^{2+} 'nın organik fazda bir kompleks molekül ($R_2Zn_{(org)}$) oluşturmak üzere birleştiğini göstermektedir. Buna ek olarak, Şekil 9'da sabit bir ekstraktan derişiminde logD'ye karşı pH grafiği gösterilmiştir. Şekil 9'dan logD ile pH arasında eğimi yaklaşık 2 olan bir doğrunun elde edildiği görülmüştür. Bu sonuç, ekstraksiyon işlemi sırasında ekstraktandan iki H^+ iyonunun salındığını göstermektedir.



Şekil 9. logD'ye karşı pH grafiği

Diğer araştırmacılar tarafından D2EHPA ile Zn(II) ekstraksiyonundan da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ekstraksiyon sırasında bir mol Zn(II) başına iki mol H^+ 'nın serbest kaldığını göstermektedir [20, 21].

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, smithsonit cevherinin sülfürik asit çözeltilerinde liç edilmesinden sonra elde edilen gerçek liç çözeltisinden Zn^{2+} iyonlarını kazanmak için solvent ekstraksiyon işlemi uygulanmıştır. Organik fazı hazırlamak için ekstraktan ve seyreltici olarak sırasıyla D2EHPA ve kerosen kullanılmıştır. Ekstraksiyon işleminde, sulu çözeltilinin başlangıç pH'ının, ekstraktan konsantrasyonunun, karıştırma süresinin ve karıştırma hızının ekstraksiyon verimi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ekstraktan konsantrasyonu, sulu çözeltilinin başlangıç pH'ı, karıştırma hızı ve karıştırma süresindeki artışla çinko ekstraksiyon veriminin arttığı gözlenmiştir. Deneysel bulgulara denge-eğimi yöntemi uygulanarak ekstraksiyon işleminin stokiyometrisi ve mekanizması belirlenmiştir. Bu analiz sonucunda belirlenen stokiyometrik katsayılar, organik fazda iki D2EHPA molekülünün ve bir Zn^{2+} iyonunun birleşerek bir kompleks molekül oluşturduğunu göstermektedir. Çinko içeren bu çözeltilinin saflaştırılması, bu prosesin endüstride teknolojik, ekonomik ve çevresel avantajlar açısından önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Bu proses, çinkonun elektrolizi gibi gelecekteki prosesler için dikkatle kontrol edilmesi gereken çok sayıda proses parametresine bağlıdır. Uygun teknik kontrol, çözeltilinin kalitesi, reaktiflerin eklenmesi ve sürecin hızı, süresi ve sıcaklığı dahil olmak üzere tüm proses parametrelerini uygun şekilde kontrol ederek endüstriyel uygulamada bu prosesi tüm adımlarında daha verimli hale getirebilir. Sülfatlı bu çözelti yine solvent ekstraksiyonu yöntemi ile çözeltide bulunan Cu gibi değerli metalleri verimli bir şekilde ayırarak ekonomik faydaları en üst düzeye çıkarabilir.

Kaynaklar

- [1] Ejtemaei M, Gharabaghi M, Irannajad M. A review of zinc oxide mineral beneficiation using flotation method. *Adv Colloid Interface Sci* 2014;206:68–78. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2013.02.003>.
- [2] Wu DD, Wen SM, Yang J, Deng JS. Investigation of dissolution kinetics of zinc from smithsonite in 5-sulphosalicylic acid solution. *Can Metall Q* 2015;54:51–7. <https://doi.org/10.1179/1879139514Y.0000000150>.
- [3] Ghasemi SMS, Azizi A. Investigation of leaching kinetics of zinc from a low-grade ore in organic and inorganic acids. *J Min Environ* 2017;8:579–91. <https://doi.org/10.22044/jme.2016.767>.

- [4] Dhawan N, Safarzadeh MS, Birinci M. Kinetics of hydrochloric acid leaching of smithsonite. *Russ J Non-Ferrous Met* 2011;52:209–16. <https://doi.org/10.3103/S1067821211030059>.
- [5] Tanaydın MK, Bakıcı Tanaydın Z, Demirkıran N. Determination of Optimum Process Conditions by Central Composite Design Method and Examination of Leaching Kinetics of Smithsonite Ore Using Nitric Acid Solution. *J Sustain Metall* 2021;7:178–91. <https://doi.org/10.1007/s40831-020-00333-z>.
- [6] Azizi A, Nozhati RA, Sillanpää M. Solvent Extraction of Copper and Zinc from Sulfate Leach Solution Derived from a Porcelain Stone Tailings Sample with Chemorex CP-150 and D2EHPA. *J Sustain Metall* 2020;6:250–8. <https://doi.org/10.1007/s40831-020-00271-w>.
- [7] Larba R, Boukerche I, Alane N, Habbache N, Djerad S, Tifouti L. Citric acid as an alternative lixiviant for zinc oxide dissolution. *Hydrometallurgy* 2013;134–135:117–23. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.02.002>.
- [8] USGS. Mineral Commodity Summaries 2022. 2022.
- [9] Cole PM, Sole KC. Zinc solvent extraction in the process industries. *Miner Process Extr Metall Rev* 2003;24:91–137. <https://doi.org/10.1080/08827500306897>.
- [10] Rizaj M, Deva N. Purification phases of zinc sulphate solution obtained from neutral leaching process of zinc calcine. *Selcuk Univ J Eng ,Science Technol* 2019;7:22–9. <https://doi.org/10.15317/Scitech.2019.179>.
- [11] Begum DA, Alauddin M, Islam MF, Rahman MS. Solvent extraction of Zn(II) from aqueous sulphate media by Di(2-Ethylhexyl) phosphoric acid in kerosene. *Pak J Sci Ind Res* 2009;52:173–9.
- [12] Gülensoy, H. Kompleksometrinin Esasları ve Kompleksometrik Titrasyonlar, İstanbul Üniv. Yayınları, İstanbul, 1977.
- [13] Morais, B. S., & Mansur, M. B. (2004). Characterisation of the reactive test system ZnSO₄/D2EHPA in n-heptane. *Hydrometallurgy*, 74(1-2), 11-18.
- [14] Raatz, S., & Klapper, P. Using interfacial tension measurements to analyze the mechanism of zinc extraction with D2EHPA. *Hydrometallurgy*, 2013, 134, 19-25.
- [15] Martins JM, Guimarães AS, Dutra AJB, Mansur MB. Hydrometallurgical separation of zinc and copper from waste brass ashes using solvent extraction with D2EHPA. *J Mater Res Technol* 2020;9:2319–30. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.063>.
- [16] Jafari H, Abdollahi H, Gharabaghi M, Balesini AA. Solvent extraction of zinc from synthetic Zn-Cd-Mn chloride solution using D2EHPA: Optimization and thermodynamic studies. *Sep Purif Technol* 2018;197:210–9. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.01.020>.
- [17] Soltani, F., Darabi, H., Aram, R., & Ghadiri, M. Leaching and solvent extraction purification of zinc from Mehdiabad complex oxide ore. *Scientific Reports*, 2021, 11(1), 1566
- [18] Demirkıran N, Tanaydın MK. Recovery of Cu(II) by Acorga M5640 After Leaching of Malachite Ore in Perchloric Acid Solutions. *J Sustain Metall* 2021;7:495–505. <https://doi.org/10.1007/s40831-021-00356-0>.
- [19] Tanaydın MK, Demirkıran N. Kinetic models for the extraction of copper by Acorga M5640 after leaching of malachite ore in perchloric acid solutions and the stripping of copper from loaded organic phase. *Brazilian J Chem Eng* 2020;37:399–414. <https://doi.org/10.1007/s43153-020-00032-y>.
- [20] Bart, H. J., Marr, R., Scheks, J., & Koncar, M. Modelling of solvent extraction equilibria of Zn (II) from sulfate solutions with bis-(2-ethylhexyl)-phosphoric acid. *Hydrometallurgy*, 1992, 31(1-2), 13-28.
- [21] Svendsen, H. F., Schei, G., & Osman, M. Kinetics of extraction of zinc by di (2-ethylhexyl) phosphoric acid in cumene. *Hydrometallurgy*, 1990, 25(2), 197-212.

Önerilen Derin Öğrenme ve Makine Öğrenmesi Tabanlı Hibrit Model ile Çevresel Atıkların Sınıflandırılması

Elif Nur YILDIZ¹, Harun BİNGÖL^{2*}, Muhammed YILDIRIM³

^{1,2} Yazılım Mühendisliği, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Malatya, Türkiye

³ Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Malatya, Türkiye

¹elify6523@gmail.com, ²harun.bingol@ozal.edu.tr, ³muhammed.yildirim@ozal.edu.tr

(Geliş/Received: 07/01/2023;

Kabul/Accepted: 25/02/2023)

Öz: Çevre kirliliği sorunu, son zamanlarda artış gösterip hem insanlığa hem de çevreye tehdit oluşturmaktadır. Dünya genelinde çarpık kentleşme, sanayileşme ve insanların sorumsuz davranışları sonucu büyük bir atık problemi ortaya çıkmaktadır. Bu problem hayat standartlarımızı kısıtlayıp, daha sağlıklı bir ortamda yaşam sürmemize neden olmaktadır. Atıklar genellikle çöp olarak bilindiğinden geri kazanılmaya çalışılmadan ortamdaki uzaklaştırılır ve bu durumda da atığın geri dönüşüme gitmeden doğada kendi kendine çözünme süresi uzun yıllar almaktadır. Atıkların ömrünü uzatma ve ayrıştırılması ile hem çevre kirliliği azalır hemde geri dönüşüme katkı sağlayarak dünya daha yaşanılabilir bir hale gelir. Derin öğrenme modelleri ve makine öğrenme yöntemleri kullanılarak yapılan bu çalışmada çevremizi daha yaşanılabilir hale getiren ve geri dönüşüme yardımcı olan atık ayrıştırma veri seti kullanılarak sınıflandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada yapay zeka teknikleri ile atık ayrıştırma tespitinde AlexNet, GoogLeNet, ResNet50, DenseNet201, ShuffleNet, SqueezeNet mimarileri ile sonuçlar elde edilmiştir. Sonraki aşama da derin mimarilerden elde edilen özellik haritaları destek vektör makineleri (DVM), k-en yakın komşu (KNN) ve karar ağaçlarında (KA) sınıflandırılmıştır. Mimarilerin elde ettikleri sonuçlar karşılaştırılarak bu problem için en iyi mimari seçilmiştir. Deneyler sonucunda önermiş olduğumuz hibrit model %85.94 doğruluk değeri elde etmiştir.

Anahtar kelimeler: Atık sınıflandırma, yapay zekâ, derin öğrenme, ESA, DVM.

Classification of Environmental Waste with Proposed Deep Learning and Machine Learning Based Hybrid Model

Abstract: The problem of environmental pollution has increased recently and poses a threat to both humanity and the environment. A big waste problem arises as a result of unplanned urbanization, industrialization, and irresponsible behavior of people around the world. This problem restricts our living standards and causes us to live in an unhealthy environment. Since wastes are generally known as garbage, they are removed from the environment without trying to be recovered. In this case, the self-dissolution time of the waste in nature takes many years without recycling. By prolonging the life of waste and separating it, environmental pollution is reduced and the world becomes more livable by contributing to recycling. In this study, which was carried out using deep learning models and machine learning methods, the classification process was carried out using the waste separation data set, which makes our environment more livable and helps recycling. In this study, results were obtained with AlexNet, GoogLeNet, GoogLeNet, ResNet50, DenseNet201, ShuffleNet, and SqueezeNet architectures in the detection of waste separation with artificial intelligence techniques. In the next step, feature maps obtained from deep architectures are classified in support vector machines, k-nearest neighbor, and decision trees. By comparing the results of the architectures, the best architecture was selected for this problem. As a result of the experiments, the hybrid model we proposed achieved an accuracy value of 85.94%.

Key words: Garbage classification, artificial intelligence, deep learning, CNN, SVM.

1. Giriş

Yaşam alanımız içinde çevre, hayat standartları için önemli bir faktördür. Çevrenin temiz ve ferah olması yaşam kalitemizi arttırdığı gibi insanların hayat enerjisini de arttırmaktadır. Son zamanlarda çevreye verilen zarar ile çevre kirliliği önemli bir sorun haline gelip canlıları tehlikeye sokmaktadır [1]. Dünya genelinde ormanların kesilip yerine dev binaların yapılması, sanayileşmenin hızla artmasıyla birlikte fabrika atıklarının çoğalması ve insanların bilinçsizce çevreye her türlü atığı rasgele atma alışkanlığı hem günümüzde hem de gelecekte ciddi çevresel problemlere yol açmaktadır. Bu atıklar; hava kirliliğine, bitkilerin zarar görmesine, deniz ve göllerdeki

* Sorumlu yazar: harun.bingol@ozal.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0003-1580-1372, ² 0000-0001-5071-4616, ³ 0000-0003-1866-4721

bilinçsizce atılan atıklar sonucu su kirliliğine, istenmeyen kokulara, küresel ısınma gibi önemli sorunlara yol açmaktadırlar [2]. Atıklar doğadaki canlıların yaşamını tehdit eden, yaşam sürelerini kısıtlayan, doğadan alınan verimi azaltan önemli etkidir. Atıklar rastgele ortaya atılıp, bilinçsizce hareket edildiğinde geri dönüşüme gitmeden çöp olarak adlandırıldığı için doğada çözünme süresi uzun yıllar almaktadır. Bugünün şartlarında önemli bir sorun haline gelen bu problem için geri dönüşüme elverişli olanlar farklı renk ve isimlerde ayrıştırılarak kategorisine göre içine atılır ve böylece ayrıştırılması kolaylaşarak ikincil madde haline getirilip tekrar üretime geçmektedir. Atıkların ayrışmasından sonraki süreç olan geri dönüşüm ile artık atıklar yeniden üretime geçip hem çevreye olan zararı azaltır hem de atık olan bir üründen tekrar verim almamızı sağlamaktadır. Çevredeki insanların bilinçlenip geri dönüşüme gereken özeni gösterdikten sonra doğal kaynakların tükenmesi önlenir. Toprak verimi ve canlıların yaşam kalitesi artar ve temiz bir çevreye ulaşılmış olunur. Atıkları başka şekilde değerlendirmek için yapılan bazı çalışmalardan biri de sıfır atık projesi olup, bu proje ile atıkların fayda sağlayacak başka bir ürüne dönüştürerek atıklardan elde edilen bu zararı en aza indirmek hedeflenmiştir. Sıfır atık ile amaç duyarlı tüketici modelini oluşturup bu bilinci insanlara aşlamak, aynı zamanda hem israfın önlenmesi hem ekonomik kazanç sağlanması hem de çevreyi korumak olmuştur. Çevreye zarar veren bu sorun ile baş etmek için atık ayrıştırma sonucu geri dönüşüm ya da sıfır atık projesi önemli rol oynamaktadır. Derin öğrenme özellikle görüntü işleme alanında bitkisel hastalıkların sınıflandırılmasından, insan ve hayvan hastalıklarının teşhis ve sınıflandırılmasına kadar birçok alanda etkili bir şekilde kullanılmaktadır [3-5]. Yapılan bu çalışma da 6 sınıflı bir atık veri seti kullanılmıştır. Bu veri setinde karton, bardak, metal, kâğıt, plastik ve çöp atıklarının ayrıştırılması için görüntüler bulunmaktadır. Çalışmanın ilk aşamasında farklı derin öğrenme mimarileri kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir. İkinci aşamada ise derin mimarilerden elde edilen özellik haritaları makine öğrenme yöntemleri olan DVM, KNN ve karar ağaçları sınıflandırıcılarında sınıflandırılıp, bu sınıflandırıcılardan doğruluk değerleri ve karmaşıklık matrisleri elde edilmiştir. Derin öğrenme mimarileri kullanılarak elde edilen özellik haritası sınıflandırıcılarda sınıflandırıldıktan sonra DVM sınıflandırıcısında elde edilen değerler diğer sınıflandırıcılardan daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

Çalışmanın geri kalanı şu şekilde organize edilmiştir. İkinci bölümde çöplerin sınıflandırılması ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar incelenmiştir. Veri seti, kullanılan derin mimariler ve önerilen hibrit metod üçüncü bölümde açıklanmıştır. Dördüncü bölümde deneysel sonuçlar verilmiştir. Beşinci bölümde ise sonuçlar sunulmuştur.

2. İlgili çalışmalar

Atık problemi her geçen gün daha ciddi bir problem haline gelmektedir. Bundan dolayı literatürde atıkların sınıflandırılması ile ilgili yapılmış çalışmalar bulunmaktadır.

Rabano ve arkadaşları yaptıkları çalışma da, MobileNet ile sıradan çöpleri kategorilere göre sınıflandıran bir model oluşturmak için cam, kâğıt, karton, plastik, metal ve diğer çöpler kullanılmıştır. Eğitim için “.jpg” uzantılı 2527 adet çöp görselinden oluşan bir veri seti kullanılmıştır. TensorFlow for Poets git deposu, MobileNet modelini 500 adımda yeniden eğitmek için bir çalışma dizini olarak klonlamıştır. Önerilen modelin nihai test doğruluğu %87.2 olmuştur [6].

Kang ve arkadaşları yaptıkları çalışma da çöp sınıflandırma konusunun; çevrenin korunması, kaynakların geri dönüşümü ve sosyal geçim için her zaman önemli bir konu olduğu görüşünü savunmuşlardır. Ön uç çöp toplama verimliliğini artırmak için, derin öğrenmeye dayalı otomatik bir çöp sınıflandırma sistemi önerilmiştir. İlk olarak, donanım yapısı ve mobil uygulama dahil olmak üzere çöp kutusunun genel sistemi tasarlanmıştır. İkinci olarak, önerilen çöp sınıflandırma algoritması ResNet-34 algoritmasına dayanmaktadır. Son olarak, önerilen sınıflandırma algoritmasının üstünlüğü, oluşturulan çöp verileri ile doğrulanmıştır. Önerilen algoritmanın sınıflandırma doğruluğu %1,01 artırılmıştır [7].

Meng ve Chu geri dönüşümün zaten tüm ülkeler için önemli bir çalışma olduğunu belirtmişlerdir. Geri dönüşüm için gerekli olan işler arasında çöp sınıflandırılması, uygun maliyetli geri dönüşümü sağlamak için en temel adımdır. Bu yazıda, görüntülerdeki tek bir çöp nesneyi tanımlamaya ve onu geri dönüşüm kategorilerinden birinde sınıflandırmaya çalışılmıştır. Birkaç yaklaşımı inceleyip daha sonra kapsamlı bir değerlendirme sağlanmıştır. Kullanılan modeller arasında HOG özellik çıkarma yöntemi, destek vektör makineleri (DVM), basit evrimsel sinir ağı (ESA) ve artık bloklara sahip ESA yer almaktadır. Değerlendirme sonuçlarına göre artık blokları olan veya olmayan basit ESA ağlarının, umut verici performanslar gösterdiği sonucuna varılmıştır. Derin öğrenme teknikleri sayesinde, hedef veri seti için çöp sınıflandırma sorunu etkin bir şekilde çözülebilmektedir [8].

Özkaya ve Seyfi yaptıkları bu çalışmada, görüntü sistemi ile çöpün geri dönüşümünü sağlamak için çöpe atılan çöp türlerini tespit eden bir derin öğrenme uygulaması geliştirilmeyi amaçlamışlardır. Farklı çöp türleri üzerinde birkaç sınıftan oluşan görüntü verileri ile eğitim ve test yapmışlardır. Eğitim ve test sırasında kullanılan

veri seti, çöp görüntülerden alınan orijinal verilerden oluştuğu belirtilmiştir. Derin öğrenme yapıları için kullanılan veri setinde 6 farklı sınıfa sahip toplam 2527 adet görüntü bulunmaktadır. Veri setindeki bu görüntülerin yarısı eğitim sürecinde, kalan kısmı ise test işlemi için kullanılmıştır. Ayrıca, daha yüksek doğrulukla daha kısa eğitim ve test süreçleri elde etmek için transfer öğrenimi kullanılmıştır. AlexNet, VGG16, GoogLeNet ve ResNet yapılan çalışmada kullanılan başlıca mimarilerdir. Sınıflandırıcıların performansını test etmek için, Softmax ve DVM olarak iki farklı sınıflandırıcı kullanılmaktadır. GoogLeNet+DVM ile %97.86 ile en yüksek doğrulukta 6 farklı tip çöp sınıflandırılmıştır [9].

Chen ve arkadaşları yaptıkları bu çalışma da, çöp sınıflandırma teknolojisi yalnızca atıkların zararsız bir şekilde işlenmesi ve kaynakların geri kazanılması için önemli bir temel değil, aynı zamanda sosyal gelişimin kaçınılmaz eğilimi olduğu görüşünü savunmaktadır. Mevcut çöp sınıflandırma yöntemleri, çöp toplama aşamasında manuel sınıflandırmaya dayanmaktadır. Araştırmacılar tutarlılık, kararlılık ve sıhhi koşullarda tatmin edici sonuçlara ulaşmanın zor olduğunu belirtmişlerdir. Bu nedenle bu çalışma, evsel çöpleri tanıyabilen ve geri dönüştürebilen derin öğrenmeye dayalı bir çöp sınıflandırma sistemi sunmaktadır. Yapılan çalışmada düşük doğruluk ve zayıf gerçek zamanlı performans sorunlarına odaklanarak, hafif bir çöp sınıflandırma modeli GCNet (Çöp Sınıflandırma Ağı) önerilmiştir. Deneysel sonuçlar, GCNet'in kendi kendine oluşturulan veri kümesindeki ortalama doğruluğunun %97.9 olduğunu göstermektedir [10].

Mittal ve arkadaşları yaptıkları çalışma da, temiz bir ortamın sürdürülmesinin, gelişmekte olan ülkelerde vazgeçilmez olduğu kadar oldukça da zor bir iş olduğunu belirtmişlerdir. Vatandaşlara mahallelerini takip etmeye ve raporlamaya teşvik etmek amaçlanmıştır. Kullanıcı tarafından tıklanan coğrafi etiketli bir görüntüde çöp bölgelerini algılayan ve kabaca bölümlere ayıran SpotGarbage adlı akıllı telefon uygulaması sunulmuştur. Yapılan çalışmada görüntülerdeki çöpi algılamak için tamamen evrişimli ağları kullanılmıştır. Çalışmada önerilen model, GINI veri kümesi üzerinde eğitilip, ortalama %87,69 doğruluk değerini elde ettiği belirtilmiştir [11].

Zhihong ve arkadaşları çöpleri otomatik olarak sıralayan robotik bir kavrama sistemini önerdiklerini belirtmişlerdir. Önermiş oldukları bu sistemde, sıralanan nesnelere otomatik olarak yakalamak için karmaşık arka planda hedef nesnelere tanımlanmasını ve konumlandırılmasını sağladığı ifade edilmiştir. Hedef nesnenin doğru bir şekilde tespitini sağlamak amacıyla, nesne tanıma ve poz tahmini için Bölge Önerisi Oluşturma (RPN) ve VGG-16 modelini uygulandığı belirtilmektedir. Çöpteki şişelerin ayıklanması çalışmasına ilişkin sonuçlar, önerilen sistemin çöpleri verimli bir şekilde ayıklayabildiğini göstermektedir [12].

Sidhart ve arkadaşları ESA mimarilerini kullanarak kategorilerden (plastik, kâğıt, karton, metaller) oluşan etiketlenmiş bir görüntü veri seti ile atıkların sınıflandırılması amacıyla bir model geliştirdiklerini belirtmişlerdir. Görüntüler kendi kendine öğrenen bir sinir ağı yardımıyla özelliklerine göre sınıflandırıldığı ifade edilmektedir. Yapılan çalışmada önerilen yöntemle %76'lık bir test doğruluğu elde edildiği belirtilmiştir [13].

3. Materyal ve Yöntem

Garbage Classification veri seti 6 sınıflı olup, test sonuçları Matlab ortamında alınmıştır. Modellerin eğitim boyunca epoch değeri 5, batchsize değeri 16 alınarak eğitim tamamlanmıştır. Veri setinin her sınıfındaki görüntülerin %80'i eğitim ve %20'si test için kullanılmaktadır. Modeli eğitmek için seçilen her mimarinin girdi boyutları belirlenir ve girdi boyutlarına göre eğitime başlanmış olunur. Eğitimin sonucunda doğruluk değerleri ve karmaşıklık matrisleri elde edilmektedir. Önerilen modelde ise DenseNet201 mimarisi taban olarak kullanılmış ve veri setindeki görüntülerin özellik haritaları elde edilmiştir. Elde edilen özellik haritaları DVM, KNN ve KA sınıflandırıcılarında sınıflandırılmıştır. Bu veri setindeki görüntüleri sınıflandırmak için kullanılan mimariler AlexNet, GoogLeNet, ResNet50, DenseNet201, ShuffleNet ve SqueezeNet olmuştur.

3.1. Veri seti

Yapılan çalışmada atıkları ayırtmak için kullanılan veri seti Garbage Classification veri setidir. Veri setine Kaggle web sitesinden erişilmiştir. Bu veri seti halka açık bir veri setidir [14]. Bu veri seti 6 sınıflı olup, 2527 görüntüye sahiptir. Veri setinde ayırtma yapmak için kullanılan atıklar Cardboard, Glass, Metal, Paper, Plastic ve Trash olmuştur. Her bir sınıfa ait rasgele görüntü örnekleri Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Veri setinde yer alan sınıflara ait örnek görüntüler

3.2. ESA mimarileri

Bu çalışmada kullanılan ESA mimarileri; AlexNet, GoogLeNet, DenseNet201, ResNet50, ShuffleNet ve SqueezeNet olmuştur. Bu mimariler eğitildikten sonra her mimari için farklı doğruluk değerleri hesaplanır ve karmaşıklık matrisleri elde edilir.

AlexNet: Ilya Sutskever, Alex Krizhevsky ve Geoffrey Hinton tarafından sunulmuştur. AlexNet'in ilk katmanı, giriş görüntüsünü filtrelemek için kullanılır. Giriş görüntüsünün genişliği (W), yüksekliği (H) ve derinliği (D) olmalıdır, AlexNet mimarisinin girdi boyutu $227 \times 227 \times 3$ 'tür. İkinci evrişimli katmanın havuzlanmış ve normalleştirilmiş çıktısı, her biri 3×3 boyutunda 384 çekirdek ile üçüncü katmana bağlanır. Dördüncü evrişim katmanı için 3×3 boyutunda 384 çekirdek vardır ve bunlar 2 GPU'ya bölünerek her bir GPU yükü $3 \times 3 \times 192$ olacaktır. Beşinci evrişimli katman, her biri 3×3 boyutunda 256 çekirdeğe sahiptir ve bunlar 2 GPU'ya bölünecek, böylece her bir GPU yükü $3 \times 3 \times 128$ olacaktır. Üçüncü, dördüncü ve beşinci evrişim katmanlarının herhangi bir normalleştirme ve havuzlama katmanı olmadan oluşturulduğuna dikkat edilmelidir. Bu üç konvolüsyonel katmanın çıktısı, her katmanın 4096 nöron içerdiği tam bağlı 2 katmana girdi olarak iletilir [15].

GoogLeNet: %6.66 hata oranı ile 2014 yılında ILSVRC Imagenet yarışmasının kazanan modelidir. GoogLeNet ardışık bir yapıda katmanları sıralamaktan uzaklaşmıştır. GoogLeNet ağıın bellek maliyetini azaltmak ve ağıın ezberleme olasılığını düşürmek için çok sayıda ardışık katmanları üst üste ekleyip filtreler kullanmak yerine birbirine paralel bağlı başlangıç modülleri kullanmıştır. GoogLeNet'te 1×1 , 3×3 , 5×5 evrişim filtreleri sonra inception modülünde bu filtreler toplanarak bir sonraki katmana giriş olarak verilmektedir. Bu modül sayesinde bir nesneye ait hem genel hem de spesifik özellikler çıkartılmış olunur [16,17]. GoogLeNet mimarisinin girdi boyutu $224 \times 224 \times 3$ olarak verilmektedir.

DenseNet201: Bu mimari Huang ve arkadaşları tarafından bilgi aktarımının sağlanması için oluşturulan bir mimaridir. Bu mimaride her katman için önceki katmanların çıktıları giriş değeri olmaktadır. Densenet ağ mimarisi kaybolan gradyan problemini önemli ölçüde düşürmektedir. Densenet bu işlemi gerçekleştirebilmek için model azaltılmış parametre sayısına sahiptir [18]. DenseNet201 de 7×7 evrişim filtresi ve ardından ilk katman olarak 3×3 MaxPool, arada 3 ortalama havuz katmanı olan 196 evrişimsel katman ve 1 çıkıştan oluşan toplam 201 katmana sahiptir [19,20]. DenseNet201 mimarisine girdi boyutu $224 \times 224 \times 3$ olarak verilmektedir.

ResNet50: 2015 yılında He vd. tarafından geliştirilen bir modeldir. ResNet modeli 2015 yılında yapılan ILSVRC ImageNet yarışmasının kazananıdır. ResNet modelini kendisinden önceki modellerden ayıran farklardan en önemlisi daha derin bir yapıya sahip olmasıdır. ILSVRC 2015 yılında yapılan yarışmada %3.6 hata oranı ile birinci olmuş bir yapıdır. Toplu normalleştirmeyi ilk kullanan algoritmalarındandır. Ağ, $224 \times 224 \times 3$ boyutunda girdi görüntüleri gerektirir. 26 Milyon parametreye sahip olan bu model 152 katmandan oluşmaktadır [21].

ShuffleNet: Bu mimari, 2×2 kaydırmalı ShuffleNet birimi, birinci evrişimli katmanın çıktı özellik haritasını alır. Bu ShuffleNet birimi üç evrişimli işlem içerir, yani iki 1×1 noktasal grup evrişimi ve 3×3 derin kıvrımlardır. İlk noktasal grup evrişimini BN, relu aktivasyon fonksiyonu, kanal takip eder. Karıştırma işlemi, verimli ve basit olduğu için Relu aktivasyonu kullanılır [22]. $224 \times 224 \times 3$ boyutlu girdisi olup, 172 katmandan oluşmaktadır.

SqueezeNet: SqueezeNet'i tasarlamak için ESA bazında çeşitli stratejiler kullanılır. İlk olarak 3×3 filtreleri 1×1 filtrelerle değiştirilir, sonra giriş kanallarının sayısını 3×3 filtrelere düşürülür, son olarak ise ağıın sonlarında alt örnekleme yapılır ve böylece evrişim katmanları büyük aktivasyon haritalarına sahip olur. SqueezeNet, esas olarak yalnızca 1×1 filtrelili sıkımlı evrişim katmanları olan yangın modüllerinden oluşur. Bu katmanlardan daha

sonra 1x1 ve 3x3 evrişim filtrelerinin bir karışımına sahip olan bir genişletme katmanı ile beslenir [23]. 68 katmandan oluşan bu mimari kendisine gelen görüntüleri 227×227×3 boyutunda kabul etmektedir.

3.3. Makine öğrenme yöntemleri

Literatürde sıklıkla kullanılan ve yüksek doğruluk değerine ulaşan sınıflandırıcılar arasında DVM, KNN ve KA yer almaktadır.

Destek Vektör Makineleri (DVM): DVM birçok önemli ilkeyi bünyesinde barındırır ve doğrudan sınıflandırma problemini çözer. DVM iki ana fikir üzerinde yoğunlaşarak ilerlemektedir. İlk olarak, çekirdek fonksiyonları, sorunu orijinal girdi uzayından, farklı sınıflara ait eğitim örneklerinin doğrusal olarak ayrılmasının mümkün olduğu, özellik uzayı adı verilen oldukça boyutlu bir probleme dönüştürmek için kullanılır. İkinci olarak, en iyi ayırıcı hiper düzlemi bulmak için maksimum marj kavramını tanıtır [24,25].

K En Yakın Komşu (KNN): Basit uygulaması ve seçkin performansı nedeniyle veri madenciliği ve makine öğrenimi uygulamalarında sınıflandırıcı olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Sınıflandırma görevlerinin yanı sıra, kNN yöntemleri ayrıca regresyon ve kayıp veri ataması için de sıklıkla kullanılmaktadır [26].

Karar Ağaçları (KA): Karar ağaçları algoritması, veri madenciliği teknikleri içinde önemli bir sınıflandırma yöntemidir. Karar ağacı, kök düğümü, dalları ve yaprak düğümleri olan ağaç yapısında sınıflandırma ve regresyon modelleri oluşturur [27].

4. Deneysel Sonuçlar

Yapılan bu çalışmada literatürde kabul gören ESA mimarileri ve farklı sınıflandırıcılar kullanılarak sonuçlar alınıp, karmaşıklık matris elde edilmiştir. Elde edilen karmaşıklık matrisi ile performans değerlendirme kriterleri olan Sensitivity, Accuracy, Precision, Specifty, F-score, FDR, FNR ve FPR değerlerine ulaşılmıştır. Karmaşıklık matrisinde 1. Cardboard, 2. Glass, 3. Metal, 4. Paper, 5. Plastic ve 6. Trash olarak adlandırılmaktadır.

4.1. Önceden eğitilmiş ESA mimarilerinde elde edilen sonuçlar

Yapılan çalışmada kullanılan ESA mimarileri AlexNet, GoogLeNet, ResNet50, DenseNet201, ShuffleNet ve SqueezeNet olmuştur. Bu mimariler Matlab ortamında çalıştırılıp, epoch 5 ve batchsize değeri 16 alınarak, görüntülerin %80'i eğitime %20'si teste ayrılmıştır. Verilen parametreler doğrultusunda modelin eğitime işlemi tamamlanmıştır. Tablo 1'de görüldüğü üzere ESA mimarilerinden alınan doğruluk değerleri verilmiştir.

Tablo 1. ESA mimarilerinden elde edilen doğruluk değerleri

AlexNet	GoogLeNet	ResNet50	DenseNet201	ShuffleNet	SqueezeNet
%80.59	%80.0	%81,58	%85.94	%76.24	%76.83

ESA tabanlı modeller eğitildikten sonra en iyi sonuç veren mimari %85.94 doğruluk oranı ile DenseNet201 olmuştur. En düşük sonucu veren mimari ise %76.24 doğruluk oranı ile ShuffleNet olmuştur. ESA mimarileri ile modeller eğitildikten sonra elde edilen karmaşıklık matrisleri Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. ESA mimarilerine ait karmaşıklık matrisleri

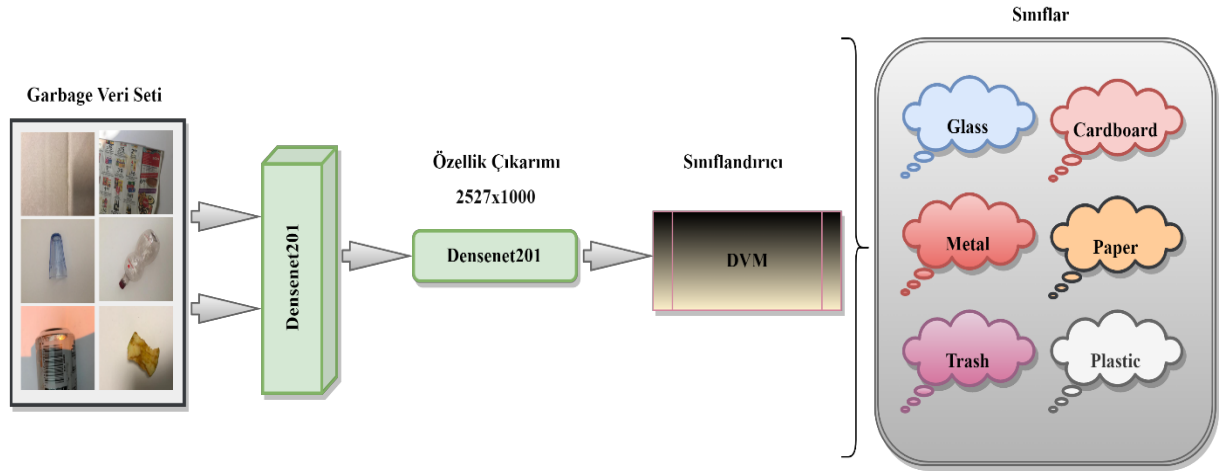
AlexNet							GoogLeNet						
1	73	2		6			1	78			3		
2		86	8		5	1	2		77	13	1	9	
3		10	69	1	1	1	3	1	4	70	3	4	
4	4	4	1	103	1	6	4	6	1	1	103	1	7
5	2	15	5	9	61	4	5	1	8	6	13	64	4
6	1	1	1	7	2	15	6	1	1	2	10	1	12
	1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6
ResNet50							DenseNet201						
1	75		1	5			1	78	1		2		
2		86	6		8		2		91	3		5	1
3		2	73		6	1	3		3	78			1
4	5	1	1	106		6	4	3		1	110		5
5	1	10	8	11	60	6	5	2	9	3	10	62	10
6	3	1	3	7	1	12	6	1		3	8		15
	1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6
ShuffleNet							SqueezeNet						
1	72			6	3		1	77			3	1	
2		83	6	2	9		2	1	77	13	1	8	
3		7	66	2	4	3	3	1	6	72	2		1
4	4	3	1	105	2	4	4	7	2	3	102		5
5	3	14	7	10	51	11	5	3	20	13	9	48	3
6	5		5	9		8	6	1		4	9	1	12
	1	2	3	4	5	6		1	2	3	4	5	6

Tablo 2 incelendiğinde derin mimariler için de elde edilen en iyi doğruluk oranı %85.94 ile DenseNet201 mimarisinde olmuştur. Kullanılan veri setinde toplam görüntü sayısı 2537'dir. Bu görüntü sayısının %20'si test için kullanılmıştır. Test için ayrılan görüntü sayısı 505 olmuştur. DenseNet201 modeli, 434 görüntüyü doğru bir şekilde sınıflandırırken, 71 görüntüyü yanlış sınıflandırmıştır. Cardboard sınıfı için toplam görüntü sayısı 403 olup, 81 görüntüsü test için kullanılmıştır. DenseNet201 modeli, bu sınıfın 78 görüntüsünü doğru sınıflandırırken, 1 tanesini glass, 2 tanesini de paper sınıfı olarak tahmin etmiştir. Glass sınıfı için toplam görüntü sayısı 501 olup, 100 görüntüsü test için kullanılmıştır. DenseNet201 modeli, bu sınıfın 91 görüntüsünü doğru sınıflandırırken, 3 tanesini metal, 5 tanesini plastic, 1 tanesini de trash sınıfı olarak tahmin etmiştir. Metal sınıfı için toplam görüntü sayısı 410 olup, 82 görüntüsü test için kullanılmıştır. DenseNet201 modeli, bu sınıfın 78 görüntüsünü doğru sınıflandırırken, 3 tanesini glass, 1 tanesini de trash sınıfı olarak tahmin etmiştir. Paper sınıfı için toplam görüntü sayısı 594 olup, 119 görüntüsü test için kullanılmıştır. DenseNet201 modeli, bu sınıfın 110 görüntüsünü doğru sınıflandırırken, 3 tanesini cardboard, 1 tanesini metal, 5 tanesini de trash sınıfı olarak tahmin etmiştir. Plastic sınıfı için toplam görüntü sayısı 482 olup, 96 görüntüsü test için kullanılmıştır. DenseNet201 modeli, bu sınıfın 62 görüntüsünü doğru sınıflandırırken, 2 tanesini cardboard, 9 tanesini glass, 3 tanesini metal, 10 tanesini paper,

10 tanesini de trash sınıfı olarak tahmin etmiştir. Trash sınıfı için toplam görüntü sayısı 137 olup, 27 görüntüsü test için kullanılmıştır. DenseNet201 modeli, bu sınıfın 15 görüntüsünü doğru sınıflandırırken, 1 tanesini cardboard, 3 tanesini metal, 8 tanesini paper sınıfı olarak tahmin etmiştir. Çalışmada kullanılan modeller arasında en düşük doğruluk değeri %76.24 ile ShuffleNet mimarisinde elde edilmiştir.

4.2. Önerilen modelde elde edilen sonuçlar

Önerilen modelde DenseNet201 mimarisi taban olarak kullanılmış ve ilgili veri setinde ki görüntülerin özellik haritaları elde edilmiştir. Elde edilen özellik haritaları DVM, KNN ve karar ağaçlarında sınıflandırılmıştır. DenseNet201DenseNet201 mimarisi taban olarak kullanılıp özellik haritaları elde edildiğinde en yüksek doğruluk değeri DVM sınıflandırıcısında elde edilmiştir. Önerilen modelde yer alan temel adımlar Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Önerilen hibrit model

Farklı ESA mimarileri kullanılarak elde edilen özellik haritaları farklı sınıflandırıcılarda sınıflandırıldığında elde edilen doğru değerleri Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. ESA Mimarileri, Sınıflandırıcı Sonuçları

ESA Mimarileri	KA	DVM	KNN
AlexNet	57.10%	80.20%	75.00%
GoogLeNet	60.50%	84.50%	78.20%
DenseNet201	66.90%	89.70%	83.40%
ResNet50	67.70%	89.60%	82.60%
ShuffleNet	61.30%	85.60%	78.90%
SqueezeNet	59.50%	85.40%	77.00%

Tablo 3'te gösterildiği gibi en yüksek doğruluk değeri, DenseNet201 mimarisi ile DVM sınıflandırıcısının birlikte oluşturmuş oldukları hibrit modelden elde edilmiştir. Bu mimarinin karmaşıklık matrisi Tablo 4'te sunulmuştur. DenseNet201 mimarisi kullanılarak elde edilen özellik haritası üç farklı sınıflandırıcıda sınıflandırıldığında en yüksek değeri %89.70 ile DVM sınıflandırıcısında elde ederken, en düşük değeri ise 66.90 ile KA sınıflandırıcısında elde etmiştir. 6 farklı ESA mimarisi taban olarak kullanılıp özellik haritası elde edildikten sonra, sınıflandırma aşamasında en başarılı sınıflandırıcının DVM olduğu görülmektedir.

Tablo 4. DenseNet201+DVM
DenseNet201+ DVM (89.70%)

1	365		2	32	4	
2		455	22	3	19	2
3		15	378	10	5	2
4	12	1	9	557	6	9
5	1	23	14	9	423	12
6	3	3	10	18	14	89
	1	2	3	4	5	6

Önerilen model 2527 görüntüden, 2267 görüntüyü doğru tahmin ederken, 260 görüntüyü ise yanlış tahmin etmiştir. Önerilen model için performans kriter sonuçları Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Performans Kriterleri

	Acc.(%)	Spç.(%)	Sens.(%)	Pre.(%)	F1(%)	FDR(%)	FPR(%)	FNR(%)
Cardboard	97.82	98.12	95.54	90.57	92.99	0.09	0.01	0.04
Glass	96.52	97.86	91.54	90.81	91.18	0.09	0.02	0.08
Metal	96.48	98.41	86.89	92.19	89.46	0.07	0.01	0.13
Paper	95.69	98.05	88.55	93.77	91.08	0.06	0.01	0.11
Plastic	95.77	98.01	94.41	89.80	92.05	0.10	0.01	0.05
Trash	97.11	98.01	94.41	89.80	92.05	0.10	0.01	0.05

Modellerin başarısını sadece doğruluk ile ölçmek doğru olmadığından dolayı önerilen modelin başarısı farklı performans kriterleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Tablo 5 incelendiğinde DenseNet201+DVM ile elde edilen performans kriterleri incelenmiştir ve en yüksek doğruluk %97.82 ile Cardboard sınıfında olmuştur. Yapılan çalışma da önerilen modelin atık ayrıştırma veri setinde başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

5. Sonuçlar

Çevre kirliliği doğaya hasar veren ve günümüzde yaşantımız için büyük tehdit yaratan unsurdur. Yaşam standartlarımızı kısıtlayan bu sorun çevreye bilinçsizce atılan atıkların çöp olarak tanımlanması ve doğada çözümlenmek için beklenilmesi sonucu oluşmuştur. Bu sorun atıkların kategorilerine göre sınıflandırılması ile çözülebilecek yöntemlerden biridir. Ayrıştırılan bu atıklar geri dönüşüme giderek tekrar üretime geçmektedir. Geri dönüşüm için yapılan bu kolaylık hem çevrenin daha yaşanılabilir bir yer haline gelmesine hem de çevre bilinci oluşturmaya yardımcı olmaktadır. Derin öğrenme son yıllarda görüntü işleme ve sınıflandırmada sağlık, endüstri, ilaç, havacılık, meteoroloji gibi birçok bilim dalında ki uygulamalarda oldukça başarılı sonuçlar üretmektedir. Yapılan çalışma da 6 derin mimari ve farklı sınıflandırıcılar ile sonuçlar alınmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında yüksek doğruluk değeri %89.70 ile önerilen modelde elde edilmiştir.

Kaynaklar

- [1] Kaypak, Ş. (2014). Çevre Sorunlarının Çözümünde Küresel Çevre Politikaları. Muğla Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, (31), 17-34. Goldberg D.E., Holland J.H. : Genetic algorithms and machine learning. Mach Learn, 3:95–9, 1988.
- [2] Özbuğutu, E., Karahan, S., & Tan, Ç. (2014). Çevre Eğitimi ve Alternatif Yöntemler–Literatür Taraması/Environmental Education and Its Alternative Methods–A Literature Review. Mustafa Kemal Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 11(25), 393-408.
- [3] Bayram, H. Y., Bingöl, H., & Alatas, B. (2022). Hybrid Deep Model for Automated Detection of Tomato Leaf Diseases. Traitement du Signal, 39(5), 1781-1787.
- [4] Eroğlu, O., & Yildirim, M. (2022). Automatic detection of eardrum otoendoscopic images in patients with otitis media using hybrid-based deep models. International Journal of Imaging Systems and Technology, 32(3), 717-727.

- [5] Yildirim, K., Yildirim, M., Eryesil, H., Talo, M., Yildirim, O., Karabatak, M., ... & Acharya, U. R. (2022). Deep learning-based PI-RADS score estimation to detect prostate cancer using multiparametric magnetic resonance imaging. *Computers and Electrical Engineering*, 102, 108275.
- [6] Rabano, S. L., Cabatuan, M. K., Sybingco, E., Dadios, E. P., & Calilung, E. J. (2018, November). Common garbage classification using mobilenet. In *2018 IEEE 10th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM)* (pp. 1-4). IEEE.
- [7] Kang, Z., Yang, J., Li, G., & Zhang, Z. (2020). An automatic garbage classification system based on deep learning. *IEEE Access*, 8, 140019-140029.
- [8] Meng, S., & Chu, W. T. (2020, February). A study of garbage classification with convolutional neural networks. In *2020 Indo-Taiwan 2nd International Conference on Computing, Analytics and Networks (Indo-Taiwan ICAN)* (pp. 152-157). IEEE.
- [9] Ozkaya, U., & Seyfi, L. (2019). Fine-tuning models comparisons on garbage classification for recyclability. *arXiv preprint arXiv:1908.04393*.
- [10] Chen, Z., Yang, J., Chen, L., & Jiao, H. (2022). Garbage classification system based on improved ShuffleNet v2. *Resources, Conservation and Recycling*, 178, 106090.
- [11] Mittal, G., Yagnik, K. B., Garg, M., & Krishnan, N. C. (2016, September). Spotgarbage: smartphone app to detect garbage using deep learning. In *Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing* (pp. 940-945).
- [12] Zhihong, C., Hebin, Z., Yanbo, W., Binyan, L., & Yu, L. (2017, July). A vision-based robotic grasping system using deep learning for garbage sorting. In *2017 36th Chinese control conference (CCC)* (pp. 11223-11226). IEEE.
- [13] Sidharth, R., Rohit, P., Vishagan, S., Karthika, R., & Ganesan, M. (2020, June). Deep learning based smart garbage classifier for effective waste management. In *2020 5th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)* (pp. 1086-1089). IEEE.
- [14] URL1: [url:https://www.kaggle.com/datasets/asdasdasdasdas/garbage-classification](https://www.kaggle.com/datasets/asdasdasdasdas/garbage-classification), Erişim tarihi: 05/01/2023.
- [15] Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2017). Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *Communications of the ACM*, 60(6), 84-90.
- [16] Szegedy, C., Liu, W., Jia, Y., Sermanet, P., Reed, S., Anguelov, D., ... & Rabinovich, A. (2015). Going deeper with convolutions. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 1-9).
- [17] Cengil, E., Çınar, A., & Yıldırım, M. (2022). A hybrid approach for efficient multi-classification of white blood cells based on transfer learning techniques and traditional machine learning methods. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 34(6), e6756.
- [18] Çetiner, H. Yaprak Hastalıklarının Sınıflandırılabilmesi İçin Önceden Eğitilmiş Ağ Tabanlı Derin Ağ Modeli. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(15), 442-456.
- [19] Eroglu, Y., Yildirim, K., Çınar, A., & Yildirim, M. (2021). Diagnosis and grading of vesicoureteral reflux on voiding cystourethrography images in children using a deep hybrid model. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 210, 106369.
- [20] Bingol, H. (2022). Classification of OME with Eardrum Otoendoscopic Images Using Hybrid-Based Deep Models, NCA, and Gaussian Method. *Traitement du Signal*, 39(4).
- [21] 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).
- [22] Zhang, X., Zhou, X., Lin, M., & Sun, J. (2018). ShuffleNet: An extremely efficient convolutional neural network for mobile devices. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 6848-6856).
- [23] Iandola, F. N., Han, S., Moskewicz, M. W., Ashraf, K., Dally, W. J., & Keutzer, K. (2016). SqueezeNet: AlexNet-level accuracy with 50x fewer parameters and < 0.5 MB model size. *arXiv preprint arXiv:1602.07360*.
- [24] Chorowski, J., Wang, J., & Zurada, J. M. (2014). Review and performance comparison of SVM-and ELM-based classifiers. *Neurocomputing*, 128, 507-516.
- [25] Bingol, H. (2022). NCA-based hybrid convolutional neural network model for classification of cervical cancer on gaussian-enhanced pap-smear images. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 32(6), 1978-1989.
- [26] Zhang, S., Li, X., Zong, M., Zhu, X., & Cheng, D. (2017). Learning k for knn classification. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST)*, 8(3), 1-19.
- [27] Gacar, B. K., & Kocakoç, İ. D. (2020). Regression analyses or decision trees?. *Manisa Celal Bayar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 18(4), 251-260.

Investigation of the Effects of Incorrect Installation of Air Conditioning Systems on Electricity Consumption Cost

Ruveyda ERGEN^{1*}, ²Mert GÜRTÜRK

^{1,2} Department of Energy Systems Engineering, Technology Faculty, Fırat University, 23100 Elazığ, Turkey

^{1*}ruveydaergen@gmail.com, ²m.gurturk@gmail.com

(Geliş/Received: 13/01/2023;

Kabul/Accepted: 11/03/2023)

Abstract: Changes in air temperatures with the effect of global warming are seen with increasing temperatures especially in summer months. Due to temperature increases, the use of air conditioners is increasing in order to provide the desired comfort conditions. As a result of the researches, it was determined that the air inlets were closed as a result of incorrect installation or use of the condenser unit of the air conditioning systems and the electricity consumption increased because the desired amount of air passage could not be achieved. Within the scope of this study, the authors examined the cost of electricity consumed by the air conditioning system in case of incorrect installation or use for 12 different countries. As a result of the analysis made for Turkey, the cost of electricity consumption as a result of incorrect installation practices of the air conditioning system caused an annual cost of approximately 56-62.78 \$ more than the electricity consumption cost of the reference system.

Keywords: Air Conditioning Systems, Electricity Consumption, Global Warming, Incorrect Installation.

Klima Sistemlerinin Yanlış Montajının Elektrik Tüketim Maliyetine Olan Etkilerinin İncelenmesi

Öz: Küresel ısınmanın etkisiyle hava sıcaklıklarında meydana gelen değişiklikler özellikle yaz aylarında artan sıcaklıklarla kendini göstermektedir. Sıcaklık artışları nedeniyle istenilen konfor şartlarının sağlanması için klima kullanımı artış göstermektedir. Yapılan araştırmalar sonucunda klima sistemlerinin yoğunlaştırıcı ünitesinin yanlış kurulum veya kullanımı sonucunda hava girişlerinin kapatıldığı ve istenilen miktarda hava geçişi sağlanamadığı için elektrik tüketiminin arttığı tespit edilmiştir. Bu çalışma kapsamında yazarlar klima sisteminin yanlış montaj veya kullanım durumlarında tükettiği elektriğin maliyetini 12 farklı ülke için incelemişlerdir. Türkiye için yapılan analiz sonucunda klima sisteminin yanlış montaj uygulamaları sonucunda elektrik tüketim maliyetinin, referans sistem elektrik tüketim maliyetinden yıllık yaklaşık 56-62.78 \$ daha fazla maliyete sahip olduğu bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Elektrik Tüketimi, Klima Sistemleri, Küresel Isınma, Yanlış Montaj.

1. Introduction

The use of air conditioners is increasing to reduce the effect of increasing air temperatures with the impact of global warming and provide comfortable conditions in summer. However, the increased use of air conditioners has some disadvantages besides providing comfortable conditions. In this study, the authors examined the changes in electricity consumption cost as a result of not mounting the air conditioning systems in accordance with the instructions given by the manufacturers and incorrectly montage of the condenser units. It is said that the use of air conditioning systems or electric fans used to provide comfortable conditions in the summer months constitutes 10% of all global electricity consumption. According to the International Energy Agency (IEA), air conditioning systems are expected to triple global electricity demand by 2050 and will be the main driver of global electricity demand. According to the IEA, the global stock of air conditioners in buildings is projected to grow from 1.6 billion to 5.6 billion by 2050. [1]. In a study in the literature, two different air conditioning systems were examined. Variable flow refrigerant (VRF) systems have recently been widely preferred in terms of comfort, energy efficiency, ease of installation and operation. In that system, a single outdoor unit can be connected to more than one indoor unit, providing savings in energy usage by heating and cooling. Another application used in the air conditioning system is the fan coil system. It is a heating and cooling application in which energy is carried by water. For these two air conditioning systems, types of equipment were selected for the two systems according to

* Sorumlu Yazar: ruveydaergen@gmail.com. Yazarların ORCID numaraları: ¹0000-0001-7909-7770, ²0000-0003-0380-5704

the calculated heat loads of a street store. The initial investment, operating costs and energy analyzes of the two systems were compared according to the selected equipment. Analysis results show that the variable flow refrigerant system has 24.6% more advantages in investment costs, 32.5% in operating costs and 33.7% more in energy consumption [2]. For a building in Adana, two different air conditioning systems, fixed airflow and variable airflow air conditioning systems, were compared by calculating the initial investment and operating costs. The present value cost method and life cycle cost analysis were used and comparisons were made for different situations. In those cases, the use of the building in two different ways as a school and office center, two different operating scenarios for the air conditioning system and finally two different economic systems have been considered. It has been found that the present value cost of the variable airflow air conditioning system for all evaluated cases is lower in all cases than the constant airflow system at the end of its life [3]. In a study conducted by the researchers, a comparison of the same capacity multi-split air conditioning system, which can be an alternative to the mono-split air conditioning system used in a commercial building operating 24 hours a day, was made. It is aimed to make the right choice by comparing the electricity consumption data, which is the most important point of the initial investment and operating costs, with the lifetime cost analysis method for two different systems. According to the results obtained, it has been determined that multi-split air conditioners are more advantageous in operating costs due to their lower energy consumption compared to mono-split air conditioners. It has been determined that the payback period is less than one year in case of use all year. The initial investment costs of multi-split air conditioners vary. Before purchasing devices, good market research should be done [4]. The air conditioning systems are used in hospitals, shopping malls, industrial production centers, food production facilities etc. When the lifetime costs of air conditioning systems used in places are examined, it is seen that the electrical energy consumed by the fans takes the first place at the rate of 50%. In a study in the literature, it was emphasized that if the energy required for the operation of the fans is met from a renewable and clean energy source such as wind energy, the lifetime costs and the environmental effects of the system become more advantageous [5]. In a study by Söğüt et al., the energy and cost advantages of solar and wind-assisted fans in commercial buildings were modeled and calculated considering their regional uses. According to the analysis, in case of using wind-assisted fans, an average of 13365 kWh/year and approximately 83176 TL/year energy and financial savings can be achieved for 3-4 m/s wind speeds in Turkey average [6]. In one of the studies in the literature, it was seen that technological and strategic studies were focused on achieving better energy efficiency. One of the main reasons for this is that HVAC (Heating-Ventilating and Air Conditioning) systems constitute 50% of the electricity consumption of buildings. In that study, innovative developments in the electricity-consuming parts of the cooling system components were included and the effects of the studies on electricity consumption were examined. At the same time, in the automation and control of these systems, strategies that will increase the operating efficiency of the system and reduce electricity consumption costs have been studied [7]. Considering the energy performance of air conditioning systems, a compilation study was conducted with a statistical approach. In that study, when the data taken from many data centers and the studies were examined, it was seen that most of the systems did not work at sufficient efficiency values. The electricity consumption rate of those systems is 38% [8]. In its compilation studies on cooling and heating systems, it examines topics such as the latest technologies, innovative ideas, cost and energy-saving methods, and classification according to energy use. Energy savings come to the fore in those reviews [9–12]. With the electrical energy produced by placing photovoltaic panels on the roofs of the Pulman wagons, the electricity consumption originating from the cooling system in the train, especially between May and September, was tried to be met with the energy produced. As a result of the calculations, the amount of electrical energy produced from PV panels in the period when the air conditioner is actively used in order to meet the cooling load of 22 kW was calculated as 9.690 kWh, and the amount of electrical energy produced throughout the year, including the other months, was calculated as 17.005 kWh. It has been observed that the ratio of the energy produced between May and September to meet the energy consumed by air conditioning systems is between 41 – 53%. They calculated that if PV panels are applied to the roofs of 139 Pulman wagons that are actively used in Turkey, 1,346,910 kWh of electrical energy will be produced in the months of May-September when the air conditioner is actively used, and 2,363,695 kWh of electricity will be produced annually [13].

It is seen that many studies have been carried out on the costs arising from the use of air conditioners. Optimization of air conditioning systems, improved automation systems, models made according to climate parameters, and R&D studies on system components have calculated the costs related to the electricity consumption of these systems. There is no study in the literature examining the effects of air conditioning systems on costs if they are not installed correctly. In this study, the effects of incorrect installation of the outside unit (condenser) of the air conditioning system on the usage costs as a result of unnecessary electricity consumption were investigated. In this research, analyses were carried out considering the capital cities of 12 countries.

2. Research Methodology

Training and information on the montage of air conditioning systems are given to dealers and technical service employees by air conditioner manufacturers. According to the training provided by the air conditioner manufacturers, the appropriate conditions for the montage of the condenser unit are as follows. It is stated that 30 cm space should be left for the air inlet from the back and left side of the condenser unit, 60 cm from the right side and 200 cm from the front surface air outlet area. Despite all this information and training, it has been observed that the information shared by the air conditioner manufacturer companies by the technical service and dealers is not taken into account when mounting the air conditioner system. Technical service, dealers or air conditioner manufacturers are not the only ones responsible for the wrong applications in the assembly in question. It is also seen that the users force the technical personnel to make the wrong installation. Photographs of incorrect installation of the condenser section of air conditioning systems are shown in Fig. (1).

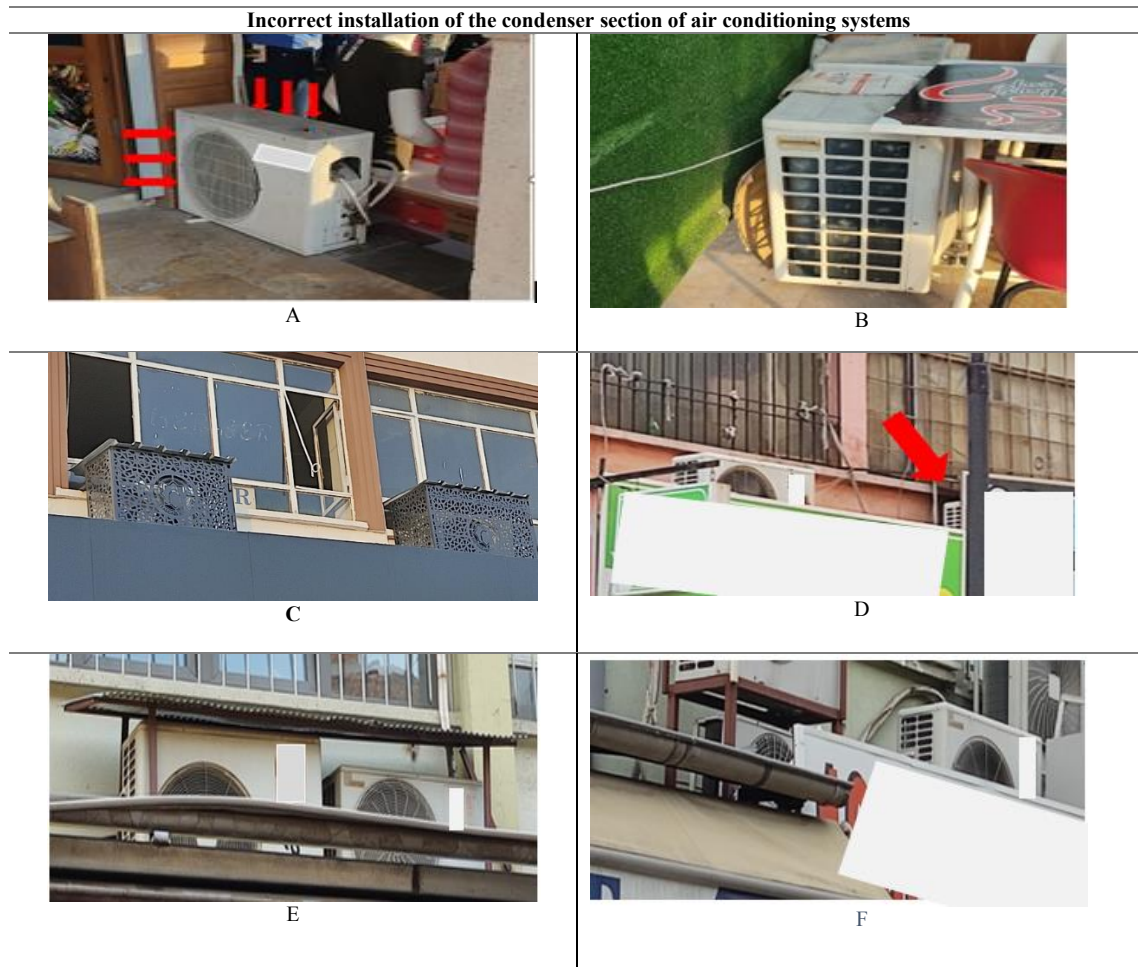


Figure 1. Incorrect montage conditions

In the photo shown in Figure 1-A, the condenser unit is installed adjacent to the wall of the building. This prevents air inflow from the side surface of the condenser. At the same time, there is not enough space for air inlet from the back surface. When the assembly of the condenser seen in Figure 1-B is examined, it is seen that the air inlet from the back side and the discharge of air from the front side are prevented. In Figure 1-C, the condenser units are closed in order to protect them from factors such as snow and rain and to provide an aesthetic appearance outside the building, but the air inlets are blocked. Since the condenser units are behind the billboards in Figures 1-D and F, evacuation of air from the front surface is prevented. In addition, there is not enough space for air inlet from the back surface. Figure 1-E Condenser units are installed close to each other and the air inlet is prevented

from the side of the unit on the left. At the same time, air inlet is blocked due to the porch being built to protect it from the effects of snow and rainwater.

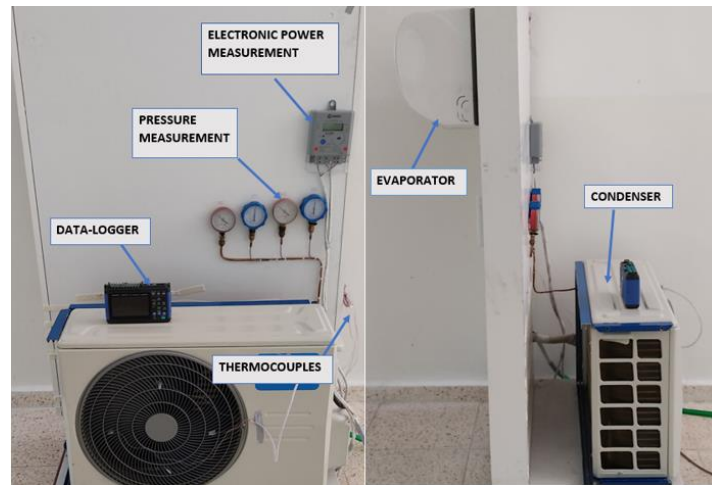


Figure 2. Experimental setup

In this study, the authors designed the experimental set in Fig. 2 to experimentally examine the effect of incorrect installation practices of the condenser unit of the air conditioning system on the electricity consumption cost. While the experiment set was being set up, support was obtained from the technical service of the related air conditioner manufacturer. In the experimental set, a split-type air conditioning system with 12000 BTU/h cooling capacity and using R32 as a refrigerant was preferred. The experiments consist of two stages. In the first stage, the indoor unit of the air conditioning system, which was installed in accordance with the installation procedure of the authorized service, was operated at fan speeds of 20%, 40%, 60% and 100%, and the electricity consumption values were determined and taken as reference values. In the second stage, especially the wrong assembly conditions of the condenser unit were created and experiments were carried out. The side and back air inlets of the condenser unit are gradually closed. The said stages are formed by closing 25-50-75% and 100% of the air inlet area. The back surface air inlet of the condenser unit was closed by 25%, the side surface air inlet was closed 25-50-75% and 100%, respectively, and each experiment was repeated for 4 different fan speeds. Experiments were repeated for all stages until the back surface was completely covered. During the experiments, the set value of the air conditioner was kept constant (16 °C). The ambient temperature was taken as 27 °C and the experiments were carried out in the laboratory in summer. By comparing the reference values with the data obtained as a result of preventing the air inlets of the condenser, the effect of incorrect montage on the electricity consumption cost was determined.

The Eq. (1) was used while calculating the cost analysis.

$$\text{Cost Analysis (\$/year)} = \text{AEC (kWh/year)} \times \text{ECP (\$/kWh)} \quad (1)$$

The AEC (Annual Energy Consumption) value in Eq. (1) gives the annual electricity consumption value of the air conditioning system. Electric consumption prices (ECP) value shows the unit electricity consumption price, see Table (1).

In Table (1), annual average electricity consumption values and unit electricity consumption prices as a result of air conditioning usage for 12 countries are given. AEC values were calculated by considering the air conditioner usage times of 12 countries for all experiments. The important value for cost analysis is the amount of electricity consumed by the air conditioning system. This value varies according to the climatic conditions in the location where the air conditioning system is used. For air conditioning systems used for cooling purposes, a certain value should be acted upon. The Spanish government has stated that air conditioning should be used at ambient temperatures above 27°C (Spanish Government to Allow Flexibility on Air-Conditioning, but Rules out U-Turn on Decree, n.d.). By taking this value as a reference, the authors examined the environmental temperature values by considering the capitals of 12 different countries around the world as locations. For the data received from NASA POWER, the hourly average of the temperature values above 27 °C for 12 countries between 2019, 2020

and 2021 was taken and this value was determined as the air conditioner usage time for the countries in question. (NASA, n.d.). Another factor affecting the cost analysis is the electricity consumption price. This value differs for each country. In this study, unit electricity consumption prices for 12 countries in March 2022 were taken into consideration in dollar terms and cost analyzes were carried out in this way [14].

Table.1. AEC and ECP values

Country	Average AEC (kWh/year)	Electric consumption price \$/kWh [14]
Canada	231.38	0.117
China	1259.61	0.076
England	64.14	0.332
France	207.43	0.190
Germany	336.11	0.455
India	4940.21	0.074
Japan	1047.71	0.227
Mexico	178.62	0.089
Spain	1109.82	0.333
Sweden	68.20	0.280
Turkey	694.55	0.069
United States of America	1091.15	0.162

3. Results and Discussions

Within the scope of cost analysis, considering the capitals of 12 countries, the effects of air conditioning usage on electricity consumption costs were examined with the assumption that similar wrong installations were made in these countries. It is seen that the AEC value due to the electricity consumption of air conditioning systems increases in countries where the ambient temperature of the country where the air conditioner is used is above 27 °C. The main reason for the increase in the AEC value is that the heat energy taken from the indoor unit (evaporator) cannot be discharged to the environment as a result of blocking the air inlet sections of the outdoor unit in incorrect installation situations, in the cooling cycle. Since the heat energy cannot be discharged to the environment, the heat taken from the indoor unit is stored in the systems. In these systems working with inverters, compressor power increases because the heat in the system cannot be discharged to the environment. This situation increases the electricity consumption values of the air conditioning system and causes an increase in the electricity cost of the system. Fig. (3) shows the values obtained for Turkey.

The x-axis in the graphs shows the closure rates of the air inlet sections of the Back (B) and Side (S) condenser. F indicates the fan power capacity of the evaporator unit. Ankara, the capital of Turkey, experiences four seasons due to its geographical location. The average number of hours for temperatures above 27 °C for 3 years has been calculated for Ankara. According to the data obtained, it is revealed that there is an average of 570 hours of air conditioning use per year. For Turkey, based on March 2022, the unit electricity consumption price in dollar terms has been determined as 0.069 \$/kWh. Cost calculations were made in line with these data. It is seen that the air inlet of the condenser is not blocked and the electricity consumption cost values, which are considered as reference values, vary between 38.54 and 40.15 \$/year. According to the wrong installation scenario of the condenser, it is observed that the cost of electricity consumption increases as a result of the gradual closing of the air inlet. It is seen that the cost of electricity consumption increases up to 56-62.78 \$/year due to the closure of the air inlet as a result of incorrect installation. This shows that at the same fan speed but in the wrong installation application, the electricity consumption cost increased by approximately 56%. Fig. (4) presents the values obtained for Japan.

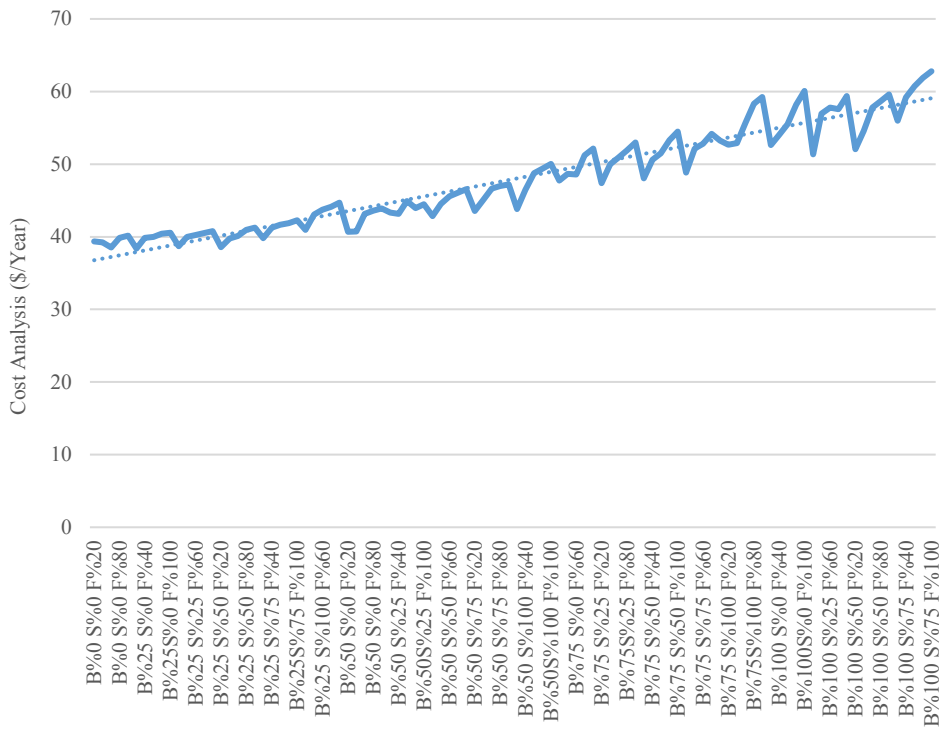


Figure 3. Effect of Wrong Montage on Electricity Consumption (Ankara)

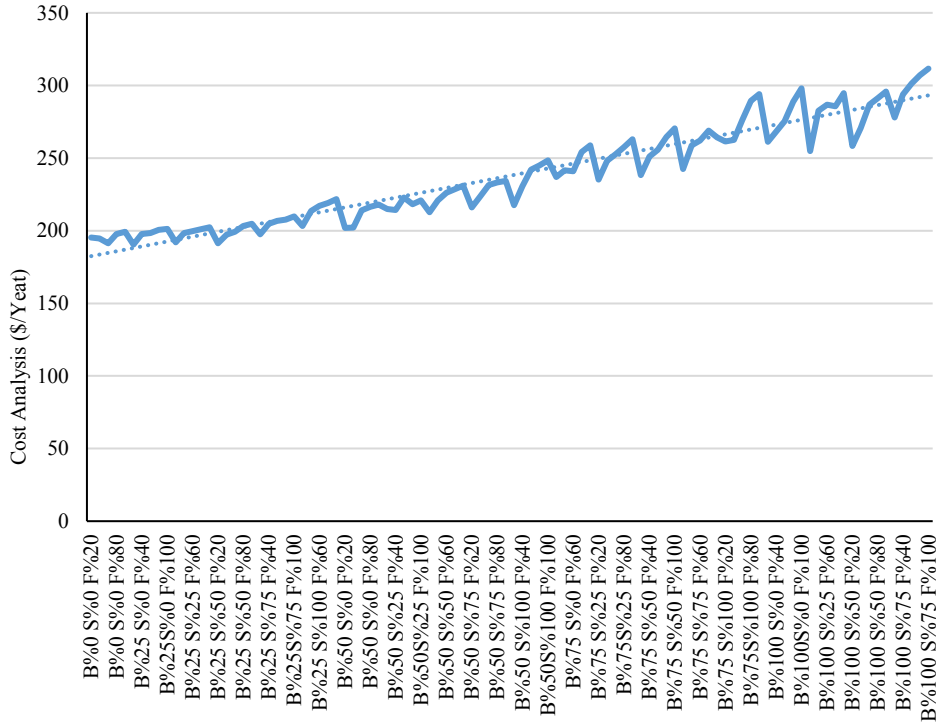


Figure 4. Effect of Wrong Montage on Electricity Consumption (Tokyo)

Japan is a country where air conditioning usage is intense. According to the home-saving measures published by the Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan, it has been said that approximately 30% of the domestic electricity consumption of the Japanese people is due to the use of air conditioners [15]. For Tokyo, the capital city of Japan, three-year temperatures above 27 °C were found to be an average of 860 hours. For Tokyo, an average of 860 hours of air conditioning usage per year is taken into account. The unit electricity consumption price for Japan in March 2022 was determined as 0.227 \$/kWh. It is seen that the air inlet of the condenser is not blocked and the electricity consumption values considered as reference values vary between 191.29 and 199.27 \$/year. As a result of the gradual closure of the air inlet of the condenser, it is seen that the electricity cost is up to 277.92 – 311.60 \$/year. In Fig. (5), the values obtained for China can be examined.

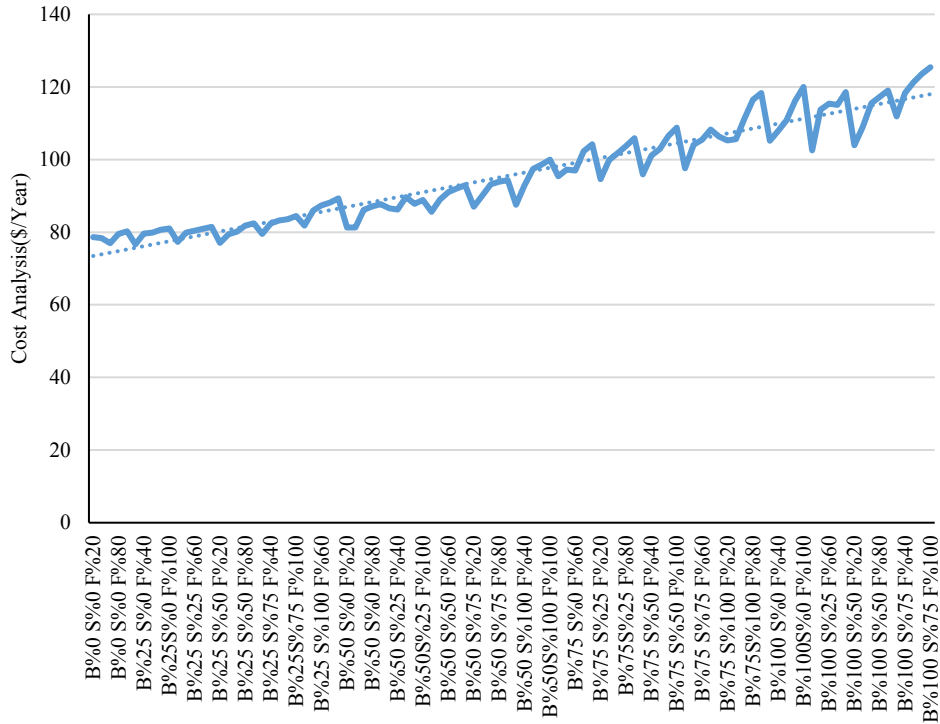


Figure 5. Effect of Wrong Montage on Electricity Consumption (Beijing)

An average of 1034 hours of air conditioning usage per year is calculated for Beijing, the capital of China. The unit electricity consumption cost for China in March 2022 has been determined as \$0.076/kWh. It is said that a 1% increase that may occur in the Chinese economy increases electricity consumption by 0.79% on average [16]. Considering that the Chinese economy has increased today and the use of air conditioners will increase with the changing climatic conditions, it can be predicted that electricity consumption values will increase more as a result of incorrect installation practices. Reference values for cost analysis vary between 76.99-80.20 \$/year. As a result of the gradual closure of the air inlet of the condenser, it was observed that the cost value due to electricity consumption increased to 111.86-125.42 \$/year values. Fig. (6) shows the values obtained for India.

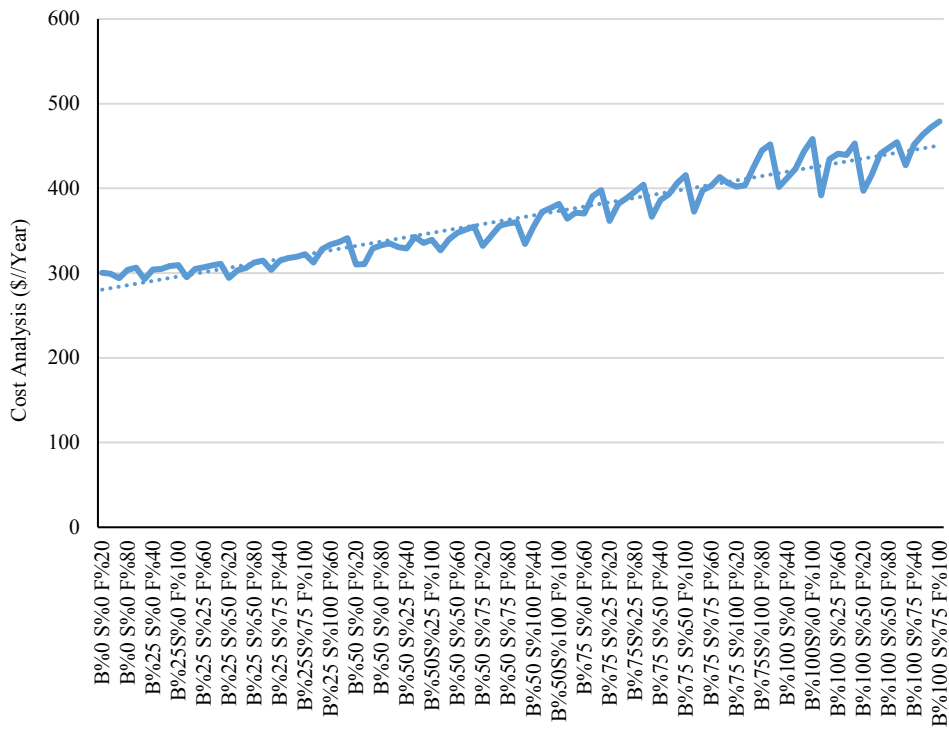


Figure 6. Effect of Wrong Montage on Electricity Consumption (New Delhi)

India's capital city, New Delhi, has the highest air conditioning usage time among 12 countries. The main reason for this is that it has a hot climate as a location. India's total air conditioner usage time is 4056 hours. In this case, it causes a lot of electricity consumption. With the effect of global warming, it is estimated that the electricity consumption due to the use of air conditioners in India will increase from 10% to 50% by 2050[17]. The unit electricity consumption cost for India has been determined as 0.074 \$/kWh. Reference values for cost analysis vary between 294.03-306.30 \$/year. According to the wrong installation scenario of the condenser, the electricity consumption cost increased to \$427.20-478.87/year. Fig. (7) presents the values obtained for Spain.

The total air conditioner usage time for Spain is 913 hours. The unit electricity consumption price of Spain is taken as 0.333 \$/kWh. Reference values for cost analysis vary between 297.25-309.64 \$/year. According to the wrong installation scenario of the condenser, it was calculated that the electricity consumption cost increased to 431.87-484.20 \$/year by preventing the air inlet. Fig. (8) shows the values obtained for France.

France has a low value in terms of hourly average air conditioning usage. In addition to the climate conditions, the French government prohibits the operation of air conditioning if the air temperature is below 26 °C [18]. This decision supports the reference ambient temperature value used by the authors for the analyses. The annual average air conditioning time is determined as 170 hours and the unit electricity consumption cost is determined as 0.190 \$/kWh. Reference values for cost analysis vary between 31.69-33.02 \$/year. According to the wrong installation scenario of the condenser, the electricity consumption cost increased to 46.05-51.63 \$/year values by preventing the air inlet. Fig. (9) shows the values obtained for Germany.

When the average of the three-year temperature values for Berlin is taken, 276 hours of air conditioning usage per year emerges. For Germany, the unit electricity consumption cost for March 2022 is taken as 0.455 \$/kWh. It is seen that the air inlet of the condenser is not blocked and the cost analysis values considered as reference values vary between 123-128.13 \$/year. It is seen that the cost of electricity consumption increases up to 178.71-200.36 \$/year due to the closure of the air inlet as a result of incorrect installation. Fig. (10) shows the values obtained for England.

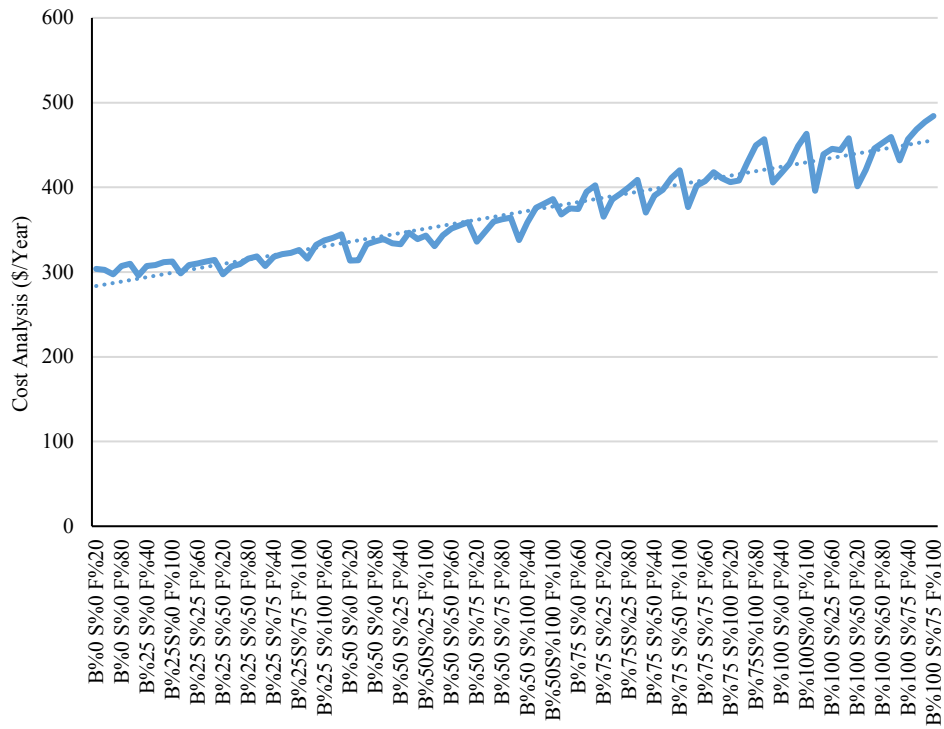


Figure 7. Effect of Wrong Montage on Electricity Consumption (Madrid)

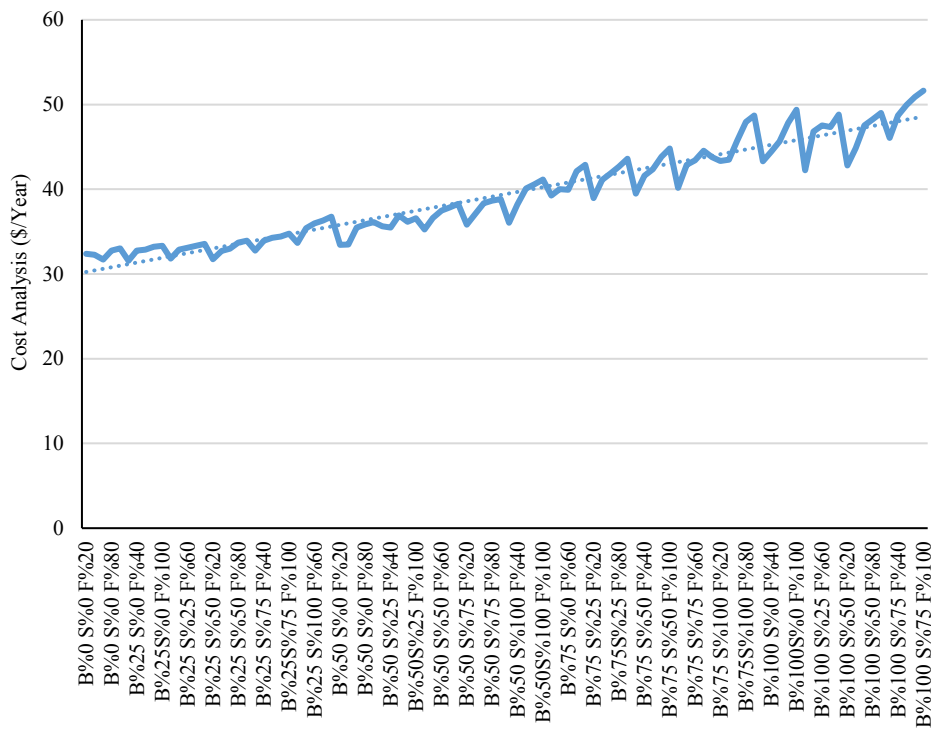


Figure 8. Effect of Wrong Montage on Electricity Consumption (Paris)

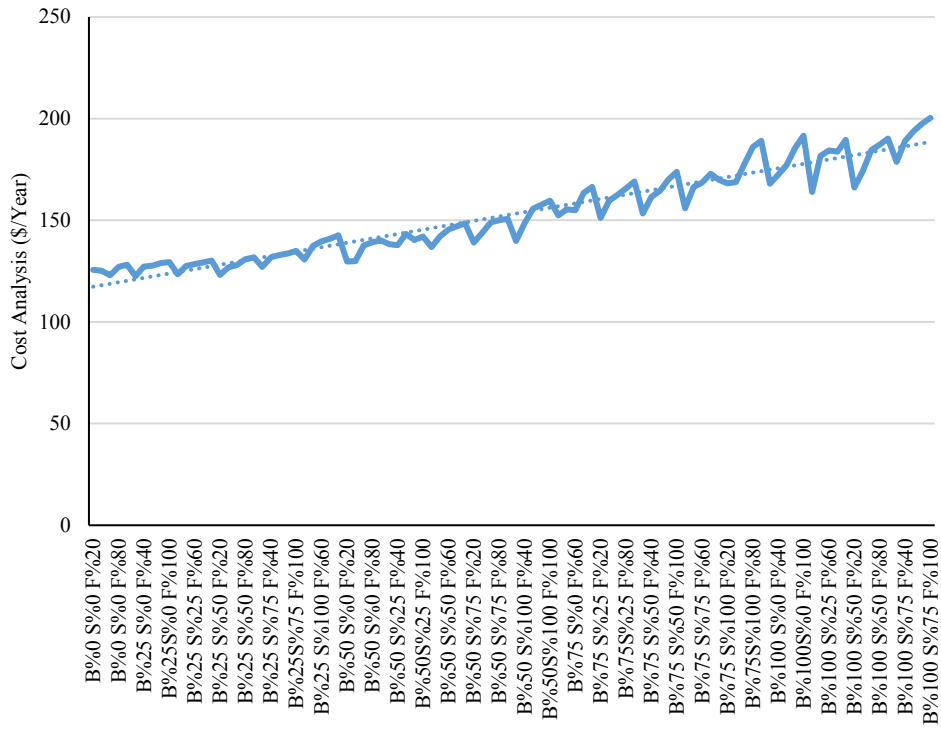


Figure 9. Effect of Wrong Montage on Electricity Consumption (Berlin)

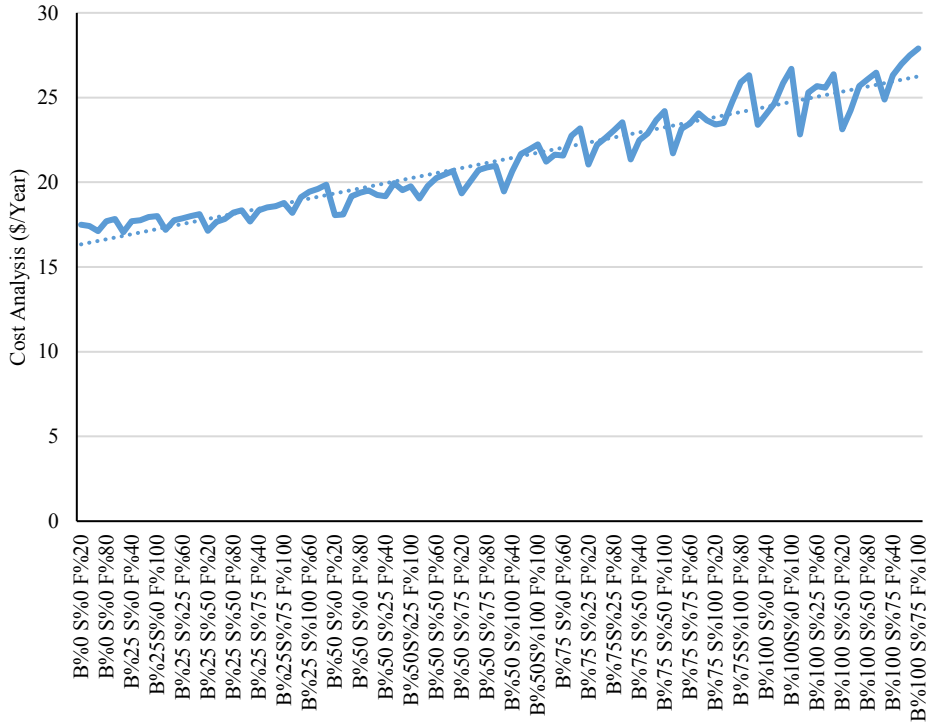


Figure 10. Effect of Wrong Montage on Electricity Consumption (London)

For London, an average of 52 hours of air conditioning usage per year is taken into account. The unit electricity consumption price of England was taken as 0.332 \$/kWh and the cost analysis was made accordingly. It is seen that the air inlet of the condenser is not blocked and the cost analysis values considered as reference values vary between 17.12-17.84 \$/year. As a result of the gradual closure of the air inlet of the condenser, it is seen that the electricity consumption cost increases up to 24.88-27.89 \$/year. Although England has the lowest air conditioner usage time among 12 countries, the effect of incorrect installation on electricity consumption costs is clearly seen. Fig. (11) presents the values obtained for Sweden.

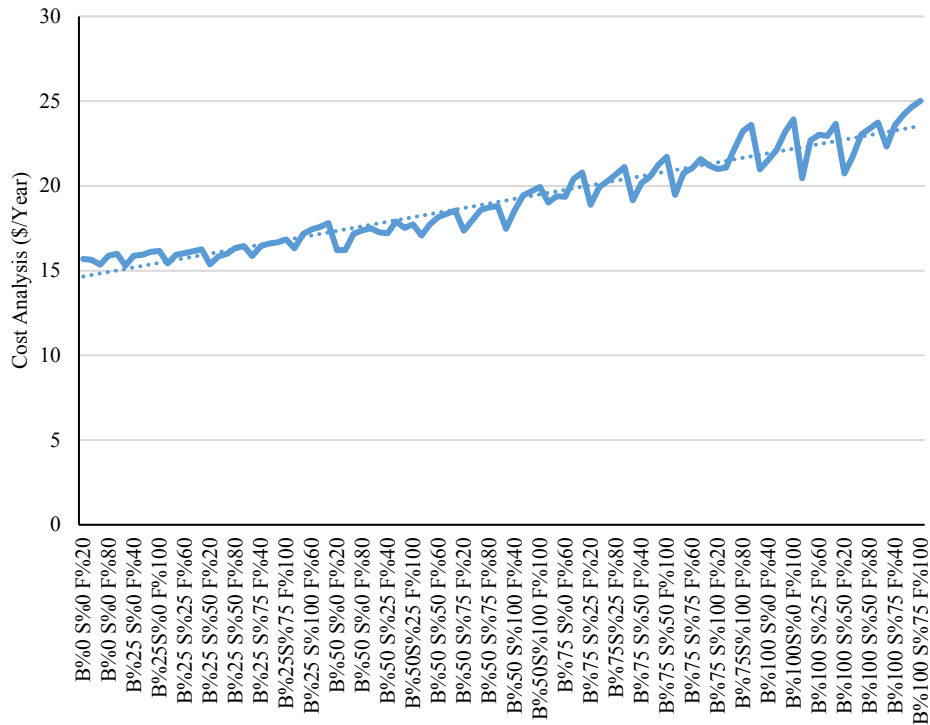


Figure 11. Effect of Wrong Montage on Electricity Consumption (Stockholm)

An average of 56 hours of air conditioning usage per year is calculated for Stockholm. For Sweden, the unit electricity consumption cost for March 2022 is taken as 0.280 \$/kWh. It is seen that the reference values for cost analysis vary between 15.35-15.99 \$/year. As a result of the gradual closure of the air inlet of the condenser, it is seen that the electricity consumption cost increased to 22.31-25.01 \$/year. Fig. (12) presents the values obtained for the United States.

With global warming, it is expected that the rate of air conditioning usage in the USA will increase by 59% in homes and 17% in commercial areas by 2050. It has been said that air conditioners account for 12% of energy bills in homes in the United States. [19]. The total air conditioner usage time in the USA is 896 hours, and the electricity consumption cost is taken as 0.162 \$/ kWh. It is seen that the reference values for cost analysis vary between 142.17-148.10 \$/year. According to the wrong installation scenario of the condenser, the electricity consumption cost increases up to 206.54-231.59 \$/year. Fig. (13) shows the values obtained for Canada.

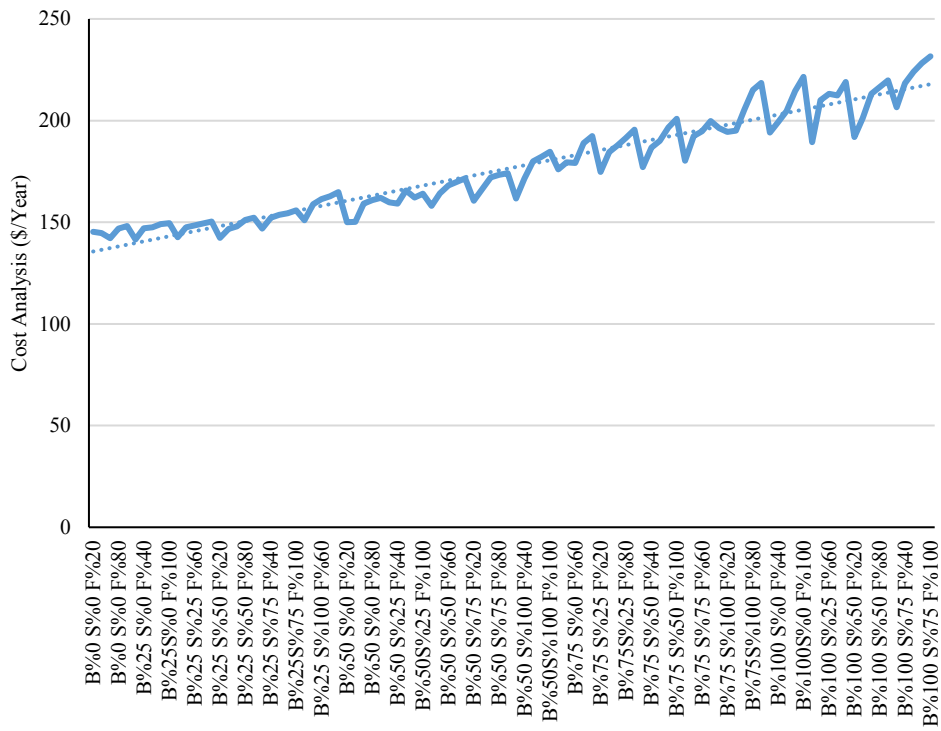


Figure 12. Effect of Wrong Montage on Electricity Consumption (Washington DC)

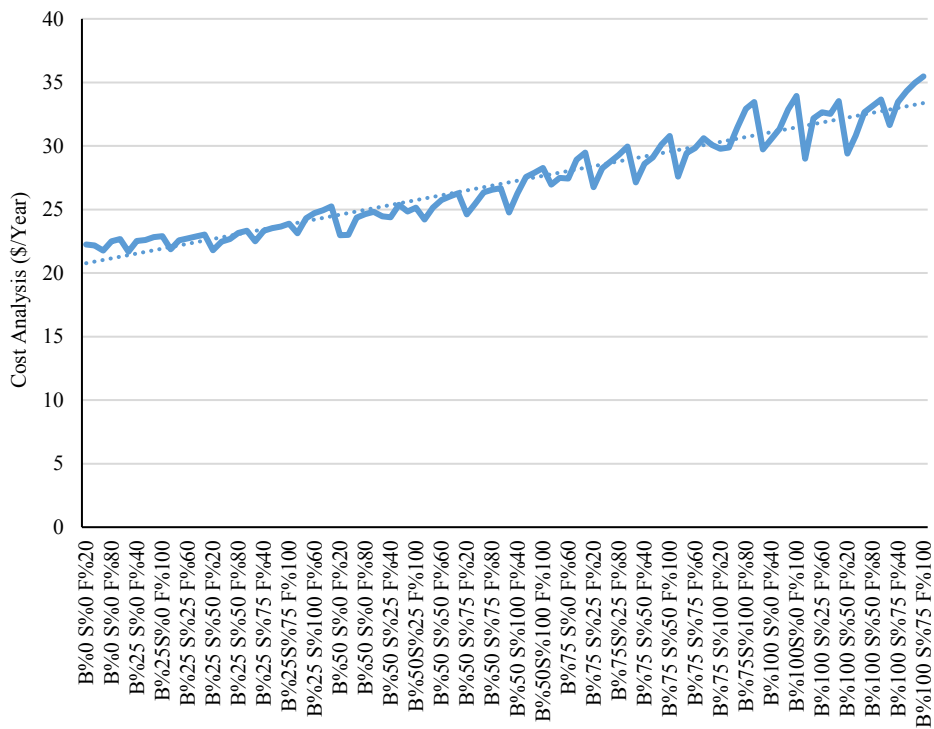


Figure 13. Effect of Wrong Montage on Electricity Consumption (Ottawa)

In the Canadian climate, summers are mild and winters are cold and harsh. However, with the effect of climate change, heat waves have been seen in the summer months in recent years. As a result, it can be predicted that there will be an increase in the use of air conditioners and the associated electricity consumption in the coming years. The total air conditioner usage time for Canada is 190 hours and the unit electricity consumption cost is determined as 0.117 \$/kWh. It is seen that the reference values for cost analysis vary between 21.77-22.68 \$/year. According to the wrong installation scenario of the condenser, as a result of preventing the air inlet, the cost of electricity consumption rises to the values of 31.63-35.46 \$/year. The values obtained for Mexico can be seen in Fig. (14).

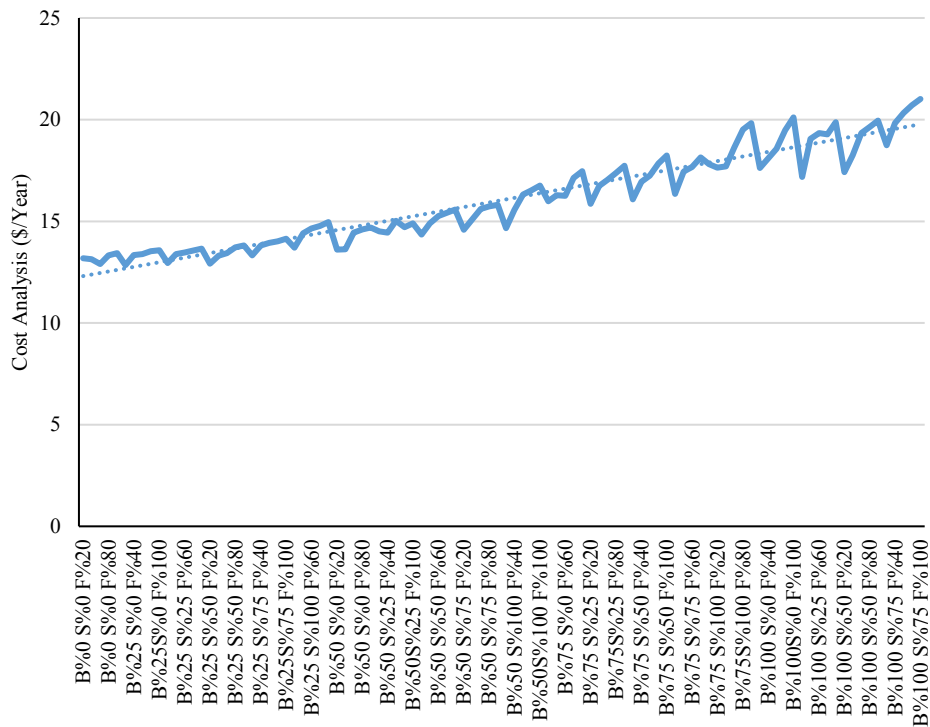


Figure 14. Effect of Wrong Montage on Electricity Consumption (Mexico City)

The average annual air conditioning usage time for Mexico has been determined as 148 hours. The unit electricity consumption cost to be used in the cost analysis has been taken as 0.089 \$/kWh. It is seen that the reference values for cost analysis vary between 12.90-13.44 \$/year. According to the wrong installation scenario of the condenser, the electricity consumption cost varies between 18.74-21.01 \$/year because of preventing the air inlet.

4. Conclusion

Many studies have been made and will continue to be done on increasing temperatures with global warming, widespread use of air conditioners and increasing energy prices around the world. Within the scope of this study, it was determined that the condenser unit of the air conditioning systems was installed incorrectly or the air inlets were blocked. The effect of these incorrect installation situations on the electricity consumption cost has been discussed for 12 different countries. The results obtained as a result of the analysis can be summarized as follows.

- Inadequate air inlet as a result of incorrect installation of the condenser unit of the air conditioning systems increases the electricity consumption of the air conditioning system, which leads to an increase in the electricity cost of the system.
- Assuming that the mistakes made during the installation will remain the same throughout the lifetime, it can be predicted that the electricity consumption costs will increase because of the changing climatic conditions and the increasing air conditioner usage times.
- Due to high unit electricity prices in countries with low air conditioner usage periods due to climatic conditions, increases in electricity consumption costs have been observed as a result of incorrect installation of the

condenser. For example, due to the fact that England has the third highest unit electricity price among 12 countries, although the air conditioner usage time is short due to climatic conditions when the values obtained according to the 100% fan speed of the reference and incorrect installation scenario are examined, it is observed that the electricity consumption cost has increased by approximately 56%.

- As a result of incorrect installation practices of air conditioning systems in Turkey, it has been observed that annual electricity bills are approximately 56-62.78 \$. The results show that the cost of incorrect installation of the condenser increases the costs associated with electricity consumption, between 49% and 51% in all countries considered in this study.

- When the graphs obtained for 12 different countries are examined, it has been observed that the annual electricity consumption cost has increased significantly due to the closure of the air inlets as a result of incorrect installation of the condenser unit.

Acknowledgements

This study was produced from the master thesis titled "Investigation of the possible effects of incorrect montage of AC systems on the performance values of the system". Authors thank to Fırat University Project Support Unit with the project number TEKF.22.07. The historical temperature data used in this study were obtained from the NASA Langley Research Center (LaRC) POWER Project funded through the NASA Earth Science/Applied Science Program.

We undertake that in the article we submitted for publication, no study requiring ethics committee approval, was conducted.

There is no conflict of interest between the authors.

References

- [1] International Energy Agency, (2018). <https://www.iea.org/news/air-conditioning-use-emerges-as-one-of-the-key-drivers-of-global-electricity-demand-growth>.
- [2] A. TURAN, A. ONAT, VRF ve FAN COIL SİSTEMLERİNİN ENERJİ TÜKETİMİ VE MALİYETLERİ AÇISINDAN KARŞILAŞTIRILMASI, *Int. J. Adv. Eng. Pure Sci.* 32 (2020) 309–319. <https://doi.org/10.7240/jeps.663461>.
- [3] M.A. Aktacir, O. Büyükalaca, T. Yılmaz, Life-cycle cost analysis for constant-air-volume and variable-air-volume air-conditioning systems, *Appl. Energy.* 83 (2006) 606–627. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2005.06.002>.
- [4] E. KARA, M.A. AKTACİR, M. KUŞ, Mono ve Multi Split Klima sistemlerinin Ömür Boyu Maliyet Analizi, *Harran Üniversitesi Mühendislik Derg.* 8733 (2021) 0–3. <https://doi.org/10.46578/humder.941169>.
- [5] S. Canbazoğlu, A. Erdoğan, Klima Santrali Fanları için Rüzgâr Enerjisi Destekli Hibrit Bir Tahrik Sistemi Tasarımı Design of Hybrid Drive System Aided Wind Energy for Air Handling Unit ' s Fans, 3 (2015) 31–47.
- [6] G.Z. SÖĞÜT, A.H.G. , T.Hikmet KARAKOÇ, Ticari Binalarda Güneş ve Rüzgar Destekli Havalandırma Fanlarının Enerji ve Maliyet Etkinliğinin İncelenmesi, 4 (2014) 32–39.
- [7] K.J. Chua, S.K. Chou, W.M. Yang, J. Yan, Achieving better energy-efficient air conditioning - A review of technologies and strategies, *Appl. Energy.* 104 (2013) 87–104. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.037>.
- [8] J. Ni, X. Bai, A review of air conditioning energy performance in data centers, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 67 (2017) 625–640. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.050>.
- [9] Z. Ma, H. Ren, W. Lin, A review of heating, ventilation and air conditioning technologies and innovations used in solar-powered net zero energy Solar Decathlon houses, *J. Clean. Prod.* 240 (2019) 118158. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118158>.
- [10] T.M.I. Mahlia, R. Saidur, A review on test procedure, energy efficiency standards and energy labels for room air conditioners and refrigerator-freezers, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14 (2010) 1888–1900. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.037>.
- [11] Z. Qi, Advances on air conditioning and heat pump system in electric vehicles - A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 38 (2014) 754–764. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.038>.
- [12] Y. Yu, S. You, H. Zhang, T. Ye, Y. Wang, S. Wei, A review on available energy saving strategies for heating, ventilation and air conditioning in underground metro stations, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 141 (2021) 110788. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110788>.
- [13] E. ARSLAN, TVS PULMAN YOLCU VAGON KLİMA SİSTEMLERİNDE FV PANEL KULLANIMI VE ENERJİ

- VERİMLİLİĞİ, (2019).
- [14] Globalprices, Electricity_prices, (n.d.) https://tr.globalpetrolprices.com/electricity_pric.
- [15] Ministry of Economy Trade and Industry, Ministry of Economy Trade and Industry, n.d. https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/index.html#general-section.
- [16] B. İsmiç, Gelişmekte olan ülkelerde elektrik tüketimi, ekonomik büyüme ve nüfus ilişkisi, Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilim. Fakültesi Derg. 5 (2015) 259–274.
- [17] SOĞUTMANIN GELECEĞİ ENERJİ VERİMLİ KLİMALAR İÇİN FIRSATLAR, (2018) 1–5.
- [18] REPUBLIQUE FRANÇAISE, Code de l' énergie, (2022) 2022.
- [19] Climate Central, Hotter Climate, More Cooling Demand, (n.d.). <https://www.climatecentral.org/climate-matters/2020-cooling-degree-days>.

Gauss Süreç Regresyonu ve Destek Vektör Makineleri Kullanılarak Değerlendirilen Kendiliğinden Yerleşen Beton Davranışının Deneysel Veri İle Doğrulaması

Merve AÇIKGENÇ ULAŞ^{1*}

¹ Fırat Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Elazığ, Türkiye
¹ merveacikgenc@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 24/01/2023;

Kabul/Accepted: 28/02/2023)

Öz: İnşaat Mühendisliği alanında yapı malzemelerinin özellikle betonun karışım tasarımını anlamak ve bazı özelliklerini tahmin edebilmek için makine öğrenmesi metotları sıkça kullanılmaya başlanmıştır. Bu bağlamda oldukça faydalı olan makine öğrenmesi metotları sayısız denilebilecek çeşitliliktedir. Bu çalışmada makine öğrenmesi metotlarından Gauss Süreç Regresyonu (GSR) ve Destek Vektör Makineleri (DVM), Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB)'nin basınç dayanımını tahmin etmek için tercih edilmiştir. Çalışmanın amacı, farklı makine öğrenmesi metotlarının beton performansını tahmin etmekteki başarılarının ispat edilmesi ve böylece bu metotların özellikle beton karışım tasarımı alanında kullanımının artırılmasıdır. Bu amaçla, KYB bileşimini ve özelliklerini içeren deneysel veri seti ile GSR ve DVM modelleri geliştirilmiştir. Geliştirilen modellerin performansları hem birbirleri ile hem de bu alanda başarısını literatürdeki birçok çalışma ile ispat etmiş olan başka bir makine öğrenmesi metodu, Yapay Sinir Ağı ile karşılaştırılmıştır. Sonuçta, deneysel veri ile eğitilen ve doğrulanan GSR ve DVM modellerinin KYB'nin basınç dayanım performansını tahmin etmekte başarılı oldukları ortaya çıkmıştır. Çalışma sonuçlarına göre GSR bu problemdeki en başarılı metot olmuştur. GSR için deneysel veri ile modelin çıkışı arasındaki korelasyon katsayıları eğitim aşamasında 0.9888 ve test aşamasında 0.8648 olarak hesaplanmıştır.

Anahtar kelimeler: Destek Vektör Makineleri, Gauss Süreç Regresyonu, Yapay Sinir Ağları, Kendiliğinden Yerleşen Beton, Makine Öğrenmesi.

Evaluation of Self-Compacting Concrete Behavior by Using Gaussian Process Regression and Support Vector Machines via Experimental Data Validation

Abstract: In the field of Civil Engineering, machine learning methods have been used frequently in order to understand the mixture design and to predict some properties of building materials, especially concrete. Machine learning methods, which are very useful in this context, can be said to be innumerable. In this study, Gaussian Process Regression (GPR) and Support Vector Machines (SVM), which are two types of machine learning methods, were preferred to estimate the compressive strength of Self Compacting Concrete (SCC). The aim of the study is to prove the success of different machine learning methods in predicting concrete performance and thus to redound the usage of the methods, especially for concrete mix design. For this purpose, GPR and SVM models were developed with the experimental data set containing the SCC mix composition and properties. The performances of the developed models were compared both with each other and with another machine learning method, Artificial Neural Network, which has proven its success with numerous studies in the literature. As a result, it was revealed that the GPR and SVM models, trained and validated with an experimental dataset, were successful in predicting the compressive strength of SCC. In addition, GSR has been the most successful method in this problem. The correlation coefficients between the experimental data and the output of the GSR model were calculated as 0.9888 in the training state and 0.8648 in the testing state.

Key words: Support Vector Machines, Gaussian Process Regression, Artificial Neural Network, Self-Compacting Concrete, Machine Learning.

1. Giriş

Makine öğrenmesi yöntemleri, genellikle insan deneyiminin ve zekasının problem çözme yeteneğinin taklitleri olarak bilinirler. Bu yöntemler karmaşık sorunları, hızlı ve doğru çözüme yeteneğine sahiptir. Karmaşık verilerin analizi ve tahmin yürütme gibi çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar. Gerçek hayattan gelen veri setlerinin kullanılması yoluyla, makine öğrenmesi yöntemleri doğruluklarını ve performanslarını sürekli olarak geliştirebilir [1]. Veri setleri ile ilgili olan mühendislik problemleri için genellikle regresyon analizi kullanılarak, iki veya daha çok değişken arasındaki ilişki bulunabilir ve bu ilişki kullanarak sonuç üzerine tahminler yürütülebilir. Makine öğrenmesi yöntemleri ise mühendislik problemleri için regresyon analizine alternatif bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır [2]. Matematiksel modeller ile çözülemeyecek boyutta karmaşık veri setlerinin değerlendirilmesinde makine öğrenmesi yöntemleri daha kullanışlıdır. Literatürde eğri uydurma veya diğer yöntemlerle çözüm için bir denklem elde edilmesi, sonucun sınırlı bir çözüm uzayında kalmasına neden olmaktadır. Ancak sınırlı verilerle, makine öğrenmesi yöntemleri sayesinde daha geniş bir alanda

* Sorumlu yazar: merveacikgenc@firat.edu.tr. Yazarın ORCID Numarası: ¹ 0000-0001-8986-7791

yüksek doğrulukta sonuçlar elde etmek mümkündür [3], [4]. Ayrıca makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak herhangi bir hesaplama yapmadan giriş değerleri verilerek sonuçlara çok hızlı bir şekilde ulaşılabilmektedir. Böylece karmaşık matematiksel modelleri çözmeye çalışmak yerine zaman, işçilik, maliyet gibi birçok parametreden kazanç elde etmek için de makine öğrenmesi yöntemleri tercih edilebilir [1], [5], [6].

İnşaat mühendisliği alanında ise makine öğrenmesi yöntemlerinin sıkça kullanıldığı problemlerden biri de beton karışım tasarımıdır. Geleneksel beton karışım tasarımı hesabında yaklaşık matematiksel hesaplamalara ek olarak, hedef işlenebilirlik ve dayanım özelliklerine sahip betonun üretilmesi için bir takım deneysel ispatlara da ihtiyaç vardır. Karışım tasarımı hesabı sonuçlarına göre üretilen betonun gerekli işlenebilirlik ve dayanım özelliklerine uygun olmaması halinde ise hesabın yenilenmesinden yeni beton karışımının üretilip testlere tabi tutulmasına kadar bütün süreç baştan başlatılır. İstenilen özelliklere sahip beton elde edilene kadar tasarım süreci devam eder [7]. Bu durum, üretim süresini uzattığı gibi, üretilen deneme-yanılma karışımları ile maliyet ve işçilik kaybına da yol açmaktadır. Burada, hedef özelliklerin belirlenmesi ve deneme-yanılma karışımlarının sonuçlarına göre bileşenlerin nasıl değişeceği kararları mühendis veya teknisyene aittir. Mühendis veya teknisyenin bilgi ve tecrübesi doğrultusunda sürecin seyri olumlu şekilde değişebilir [1], [5], [6].

Makine öğrenmesi yöntemlerinin devreye girmesi ile hakkında kesin bir matematiksel hesap bulunmayan beton karışım tasarımı kullanıcı için destekleyici olabilir. Hatta makine öğrenmesi ile oluşturulan modele geleneksel beton karışım tasarımında ele alınmayan girdiler bile eklenebilir. Bu şekilde ihtiyaç duyulan parametreler, makine öğrenmesi tarafından önceden tahmin edilerek beton üretim süreci daha verimli hale getirilebilir. Makine öğrenmesi sayesinde üretim aşamasında deneme-yanılma karışımlarının sayısı azaltılabilirse, tasarım süreci kısalar, işçilik ve maliyet düşer [5].

Bu bağlamda, literatürde en çok karşılaşılan makine öğrenmesi yöntemi Yapay Sinir Ağları (YSA)'dır. Birçok farklı beton türünde, beton bileşenlerinden işlenebilirlik testlerinin sonuçlarını ya da basınç dayanımını tahmin eden YSA modelleri bu alanda oldukça başarılıdır [8]–[16]. Ek olarak, hedef dayanım ve/veya işlenebilirlik özelliklerinin girişlere dahil edildiği ve beton bileşiminin tahmin edildiği başarılı YSA modelleri de literatürde mevcuttur [5], [6], [17].

Bu çalışmada, iki farklı makine öğrenmesi yöntemi kullanılmıştır: Gauss Süreç Regresyonu (GSR) ve Destek Vektör Makineleri (DVM). GSR ve DVM modellerinin başarıları hem birbirleri ile hem de aynı problem üstünde çalıştırılan YSA modeli ile karşılaştırılmıştır. GSR ve DVM, literatürde YSA kadar sık karşılaşılan makine öğrenmesi yöntemlerinden olmasalar da, beton özelliklerinin tahmini konusunda bazı çalışmalarda kullanılmışlardır. Örneğin beton bileşimi, beton kür koşulları ve beton yoğunluğundan beton basınç dayanımını tahmin edebilen başarılı DVM modeli geliştirilmiştir [18]. Ayrıca Ling vd. (2019) [19] çalışmalarında DVM ve YSA modellerini beton basınç dayanımını tahmin etmek için kullanmışlar ve DVM modelinin daha başarılı tahmin sonuçları ürettiğini söylemişlerdir. Fan vd. (2020) [20] ise iki farklı çeşit DVM kullanarak oluşturdukları modeller ile beton bileşimini tahmin etmeyi başarmışlardır. Altay vd. (2020) [1] bir ön karışım tasarımı oluşturmak amacıyla, çelik lif donatılı kendiliğinden yerleşen betonun iki farklı işlenebilirlik özelliğini tahmin etmek için bir DVM modeli geliştirmişlerdir. Bunlara ek olarak beton bileşiminde ihtiyaç duyulacak biyokatkı miktarının [21], epoksi cam tozunun [22] ve betonda karbonatlaşma derinliğinin [23] tahmin edilmesi problemlerinde de DVM başarılı bir şekilde kullanılmıştır.

GSR ile ilgili çalışmalar ise literatürde oldukça sınırlıdır. Başaran vd. (2021) [24] çalışmalarında birkaç parametreyi göz önünde bulundurarak betona gömülü FRP çubukların bağ kuvvetlerini tahmin eden altı farklı model oluşturmuşlardır. Bu modeller içinde DVM ve YSA'nın yanında GSR modeli de mevcuttur. Çalışma sonuçlarına göre, beton ile FRP çubukların arasında oluşan bağ kuvvetini tahmin etmekte altı model içerisinde en başarılı olanların GSR ve YSA modelleri olduğu ortaya koyulmuştur [24]. Liu vd. (2022) [25] ise geri dönüştürülmüş agrega ile üretilmiş betonun sülfata dayanıklılığının tahmin edilmesi için geliştirdikleri sekiz farklı model içerisinde GSR'nin, YSA'dan sonra en başarılı model olduğunu söylemişlerdir.

Bu çalışmada ise GSR ve DVM, özel bir beton türü olan Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB)'nin basınç dayanımını tahmin etmek için kullanılmışlardır. Geleneksel betondan daha karmaşık bir karışım tasarımı sürecine sahip olan KYB şöyle tanımlanabilir: vibrasyona ihtiyaç duymaksızın, yoğun donatılı, derin veya dar kesitlere kendiliğinden yerleşebilen ve bu sırada ayrışmadan veya su kusmadan stabilitesini koruyabilen, taze özellikleri geliştirilmiş özel bir beton türüdür [26], [27]. KYB'nin basınç dayanımının tahmin edilebilmesi için kapsamlı bir veri seti elde edilmiştir. Bu veri seti, 269 farklı KYB bileşim oranını (çimento, su, iri ve ince agrega miktarları, en büyük agrega tane boyutu, kimyasal katkı ve toz malzeme miktarları) ile taze betonun çökme-yayıma deneyi sonucu ve beton basınç dayanımı değerini içermektedir. Çalışmanın amacı, KYB için beton bileşiminden ve hedef işlenebilirlik özelliğinden yararlanarak basınç dayanımını tahmin eden modeller geliştirilmesidir. Ek olarak literatürde KYB'nin basınç dayanımını tahmin etmekte sıkça kullanılan YSA modellerinin yanı sıra GSR ve DVM gibi modellerin de başarılarını ortaya çıkarmak amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında KYB'nin ön karışım tasarımı

için basınç dayanımının tahmin edilmesi probleminde başarılı GSR ve DVM modelleri geliştirilebilmiştir. Bu modellerin performansları, aynı veri seti ile eğitilmiş YSA modeli ile karşılaştırılmıştır. Sonuçta, GSR ve DVM modellerinin, YSA'dan daha başarılı tahmin sonuçları üretebildiği gösterilmiş ve böylece bu yöntemlerin beton karışım tasarımında kullanımının yaygınlaştırılması hedeflenmiştir.

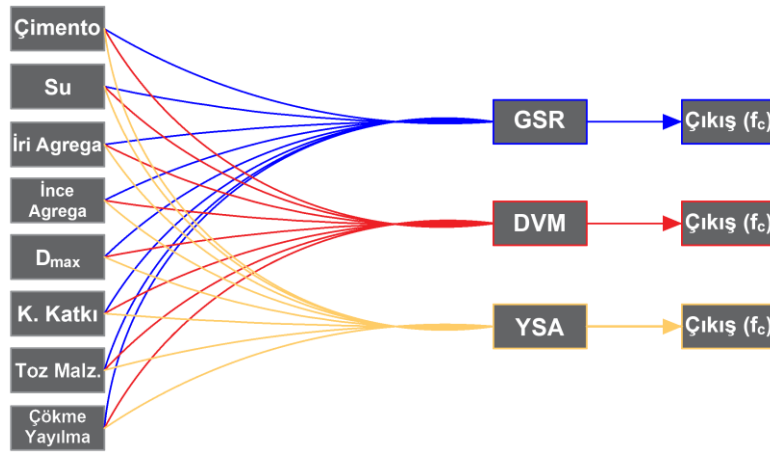
2. Veri Seti ve Çalışmada Kullanılan Yöntemler

Bu çalışmada, makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak KYB'nin basınç dayanımını tahmin eden modeller oluşturmak için literatürde yer almış [28]–[40] referans numaralı deneysel çalışmalardan elde edilen kapsamlı bir deneysel veri seti kullanılmıştır. Toplamda 269 farklı KYB karışımı içeren veri setinin istatistik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Şekil 1'de ise çalışmada kullanılan makine öğrenmesi modellerinin giriş ve çıkışları şematik olarak gösterilmiştir. Kendiliğinden yerleşen beton bileşimini oluşturan çimento, su, iri ve ince agrega miktarları, en büyük agrega tane boyutu (D_{max}), kimyasal katkı ve toz malzeme miktarları ile taze KYB'nin çökme-yayılma değeri modellerin girişlerini oluşturmaktadır. Bu girişlere karşılık, GSR, DVM ve YSA modellerinin üreteceği çıkış ise KYB'nin 28 günlük basınç dayanımı (f_c)'dir.

Tablo 1. Veri setinin istatistiksel özellikleri

	Girişler								Çıkış
	Çimento (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	İri Agrega (kg/m ³)	İnce Agrega (kg/m ³)	D_{max} (mm)	Kimyasal Katkı (kg/m ³)	Toz Malzeme (kg/m ³)	Çökme Yayılma (mm)	f_c (MPa)
Maksimum	670.00	508.40	953.00	1095.16	19.00	24.44	465.00	825.00	86.80
Minimum	180.00	140.00	523.71	640.00	9.50	0.46	0.00	500.00	16.30
Ortalama	392.82	191.76	759.57	819.40	15.11	8.89	164.04	666.89	51.55
Standart Sapma	83.04	54.68	108.99	107.85	1.84	5.06	90.21	59.87	14.76



Şekil 1. KYB performansını tahmin etmek için tasarlanan modeller.

Girişler belirlenirken KYB'nin basınç dayanımını en çok etkileyen iki parametre göz önünde bulundurulmuştur: KYB bileşimi ve KYB'nin işlenebilirliği. Bileşimi oluşturan çimento dozajı, su miktarı, varsa toz malzeme miktarı, iri agrega ve ince agrega miktarları, kimyasal katkı miktarının KYB'nin hem işlenebilirlik hem de mekanik dayanım performanslarını doğrudan etkilediği bilinmektedir [31], [41], [42]. Ayrıca bileşime giren su ve kimyasal katkı miktarının yanı sıra D_{max} da işlenebilirlik ve basınç dayanımı üzerinde oldukça etkilidir [9], [42], [43]. KYB'de en sık kullanılan işlenebilirlik testinin, çökme yayılma testi olduğu bilinmektedir [6]. Bu nedenle, model girişlerine, KYB'nin işlenebilirlik özelliğini temsil etmek için bu testin sonuçları da dahil edilmiştir. Böylece, seçilen tüm bu girişler ile talep edilen işlenebilirliğe sahip KYB'nin basınç dayanımı için bir tahmin modeli geliştirmek mümkün olabilecektir.

GSR, DVM ve YSA modellerinin problemi öğrenme ve sonuç üretebilme performanslarının karşılaştırılabilmesi için ilk olarak 269 veri, eğitim verisi ve test verisi olarak iki ayrı grupta toplanmıştır. Literatürde verilerin bu şekilde ayrılması ile YSA modelleri sıkça geliştirilirken, GSR ve DVM modellerinin

geliştirilmesi sürecinde bu şekilde bir ayrıma pek rastlanılmamaktadır. Bu çalışmada geliştirilen modellerin tamamının test verisine üretebildikleri sonuçlar da bir performans ölçütü olarak değerlendirilmiştir. Bu amaçla, toplam veri seti, %80'i eğitim aşamasında ve %20'si ise test aşamasında kullanılmak üzere rastgele iki gruba ayrılmıştır. 215 veri içeren eğitim veri seti, üç makine öğrenmesi yönteminde de öncelikle modellerin problemi öğrenmesi için kullanılmıştır. Ardından kalan 54 adet veriden oluşan test veri seti ile modeller test edilmişlerdir.

Çalışmada geliştirilen tahmin modelleri için kullanılan makine öğrenmesi metotları aşağıda açıklanmıştır.

2.1. Destek vektör makineleri (DVM)

İlk olarak Cortes ve Vapnik [44] tarafından geliştirilen DVM, temelde istatistiksel bir öğrenme teorisi ve yapısal risk minimizasyonu yöntemidir. DVM, esasen giriş değerlerini (vektörlerini) sınıflara ayırarak bu sınıflar arasındaki sınırı öğrenmeyi amaçlar. Bu sınır, problemin giriş sayısına bağlı olarak doğrusal bir eğri, iki boyutlu bir düzlem ya da çok boyutlu bir hiperdüzlem olabilir. Bu çalışmadaki gibi çoklu değişkenlere sahip doğrusal olmayan problemlerin çözümü için, doğrusal olmayan DVM, n boyutlu hiperdüzlemi girişleri sınıflara ayıran optimum karar yüzeyi olarak tanımlar ve girişleri bu hiperdüzleme olan uzaklıklarına göre sınıflandırır [1], [44]–[46].

Örneğin, ikinci derece bir polinoma karşılık gelen bir karar yüzeyi elde etmek için, Denklemler 1-3'deki gibi $N = n(n + 3)/2$ koordinata sahip bir özellik uzayı (Z) oluşturulursa [44]:

$$Z_1 = x_1, \dots, Z_n = x_n \quad ; n \text{ koordinatlı}, \quad (1)$$

$$Z_{n+1} = x_1^2, \dots, Z_{2n} = x_n^2 \quad ; n \text{ koordinatlı}, \quad (2)$$

$$Z_{2n+1} = x_1 \cdot x_2, \dots, Z_N = x_n \cdot x_{n-1} \quad ; n(n - 1)/2 \text{ koordinatlı}, \quad (3)$$

burada $x = (x_1, \dots, x_n)$ girişleri olup, Z özellik uzayında bir hiperdüzlem oluşturulur [44]. DVM'nin amacı optimum ayırıcı hiperdüzlemi elde etmektir [47]. Burada DVM modelinin çekirdek (Kernel) fonksiyonu önemlidir. Bu çalışmada en iyi sonucu veren DVM modelinin çekirdek fonksiyonu Gauss fonksiyonudur.

2.2. Gauss süreç regresyonu (GSR)

GSR, genellikle doğrusal olmayan çok değişkenli regresyon ve sınıflandırma problemlerin çözümü için kullanılan başarılı ve esnek bir makine öğrenme yöntemidir. GSR'nin en önemli avantajı, sonuçları üzerinde belirsizlik ölçümleri yapılabilmesi ve böylece parametrik olmayan küçük veri setlerinde bile başarılı tahminler üretebilmesidir [46], [48].

Sonuçları oluşturan temel işlevin, tamamen bir ortalama işlev, $m(x)$ ve bir kovaryans işlevi, $k(x, x')$ tarafından belirtilen stokastik bir süreç olan bir Gauss Süreci olduğu varsayımına dayanır. Gauss Sürecinin ortalama işlevi, girdi değişkenlerini çıktı değişkenlerine eşleyen herhangi bir işlev olabilirken kovaryans işlevi, işlevin düzgünlüğünü ve benzerliğini kodlar [49], [50].

Bir dizi giriş-çıkış çifti $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ verildiğinde, verinin olasılığı şu şekildedir:

$$p(y|X, \theta) = N(y|0, K + \sigma^{2n}) \quad (4)$$

burada X girdi değişkenlerinin matrisidir, θ hiperparametrelerin bir vektörüdür, K , $k(x_i, x_j)$ öğelerini içeren kovaryans matrisidir, σ^2 gürültü varyansıdır [50], [51].

GSR'nin amacı ise aşağıda verilen $f(x)$ fonksiyonunu bulmaktır ki; bu fonksiyon y 'nin x üzerindeki dağılımıdır [51]:

$$p(f|X, y, \theta) = N(f|m(x), K) \quad (5)$$

burada $m(x)$, ortalama işlev ve K , kovaryans işlevidir. Modelin hiperparametreleri, verilerin marjinal olasılığını maksimize ederek tahmin edilebilir [51].

Farklı ortalama ve kovaryans fonksiyonlarını seçerek, farklı türde veri setleri modellenilebilir. GPR'deki en önemli adımlardan biri kovaryans fonksiyonunun seçimidir. Bu çalışmada geliştirilen GSR modeli için yaygın olarak kullanılan kovaryans fonksiyonlarından biri olan üstel (exponential) kernel fonksiyonu [51] kullanılmıştır.

GPR'nin ana dezavantajı ise özellikle büyük veri kümeleri için hesaplama açısından yavaş ve maliyetli bir yöntem olabilmesidir. Bununla birlikte, hesaplamayı hızlandırmak için kullanılacak birkaç yaklaşım yöntemi mevcuttur [48].

2.3. Yapay sinir ağları (YSA)

YSA, insan beyninin öğrenme yeteneğini simüle eden bir makine öğrenmesi yöntemi olarak tanımlanmaktadır. YSA, tıpkı bir insan beyni gibi öğrenme, hatırlama, çözme ve akıl yürütme yetenekleriyle sorunlara yanıtlar üretir, böylece bilinen örneklerin girdi ve çıktılarının ilişkisini modelleyerek problemlerin tahmininde başarılı bir şekilde uygulanır [5], [52].

Bir problemi öğrenmek için, yapay nöronlar YSA'nın katmanlarında bir araya gelirler. Giriş ve çıkış katmanlarındaki nöronlar problemin giriş ve çıkış sayıları ile aynı iken, bu iki katman arasındaki gizli katman sayısı ve her bir gizli katmandaki yapay nöron sayısı YSA mimarisini belirler. Ağın çıktısı ile hedef veri arasındaki hatayı en aza indirmek için farklı YSA mimarileri ile birkaç deneme yapmak gerekir [5], [53], [54]. Bu çalışmada, gizli katmandaki gizli hücrelerin sayısı Kaba Arama (Brute Force) yöntemi ile sabitlenmiştir. Kaba Arama, teorik sınırlar içinde tüm olası mimariler arasından en az hatayı üreten en başarılı YSA mimarisinin seçilmesi olarak bilinir [54], [55].

YSA, özellikle betonun basınç dayanımını tahmin etmekte literatürde çokça kullanılan bir yöntemdir ve başarısı birçok çalışma ile ortaya koyulmuştur [5], [6], [9]–[16]. Bu çalışmada ise bir YSA modeline yer verilmesindeki amaç, GSR ve DVM modellerinin performanslarının çalışma alanında başarısını kanıtlamış bir başka modelle karşılaştırılmasıdır.

3. Bulgular ve Tartışma

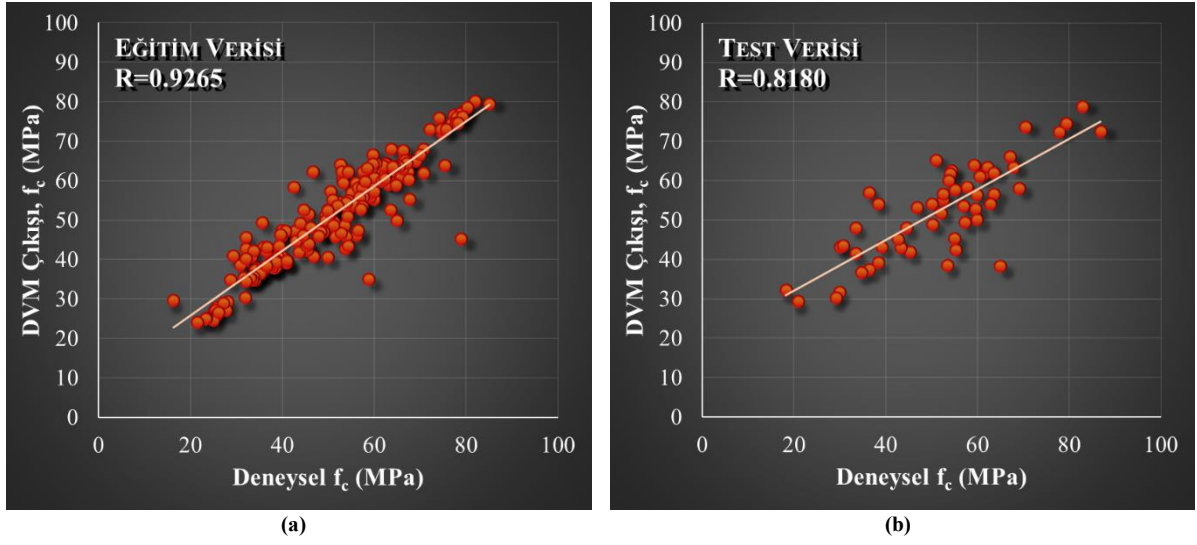
Bu çalışmada, KYB bileşimi ve hedeflenen işlenebilirlikten yola çıkılarak KYB'nin basınç dayanımını tahmin edebilen makine öğrenmesi modelleri geliştirmek ve bu modellerin performanslarını birbirleri ile karşılaştırmak amaçlanmıştır. Bu amaçla geliştirilen GSR, DVM ve YSA modellerinin girişleri, KYB'de yer alan çimento dozajı, su miktarı, iri ve ince agrega miktarları ile D_{max} değeri, kimyasal katkı miktarı, toz malzeme miktarı ve çökme yayılma testi sonucundan oluşmaktadır. Modellerin bu girişlere karşılık KYB'nin basınç dayanımı (f_c)'yi tahmin etmesi sağlanmıştır. Toplamda 269 adet deneysel veri den oluşan veri seti, modelleri eğitmek ve doğrulamak için kullanılmıştır. GSR ve DVM modelleri öncelikle 269 verinin, 215'i ile eğitilmiştir. Daha sonra geliştirilen modeller eğitim aşamasına dahil edilmemiş 54 adet veri ile test edilmişlerdir. Çalışmada geliştirilen makine öğrenmesi modellerinin tamamı MATLAB programı kullanılarak tasarlanmıştır.

Eğitim ve test aşamalarında modellerin ürettiği çıkışların doğruluğunu ölçmek amacıyla tahmin edilen beton basınç dayanımı değerleri ile deneysel olarak elde edilmiş beton basınç değerleri arasında bir doğrusal ilişki kurulmuştur. Bu doğrusal ilişkilerin korelasyon katsayıları (R) Denklem (6) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$R = \frac{\sum_i \sum_j (f_{c,ij}^{tahmin} - \overline{f_c^{tahmin}}) \cdot (f_{c,ij}^{deneysel} - \overline{f_c^{deneysel}})}{\sqrt{(\sum_i \sum_j (f_{c,ij}^{tahmin} - \overline{f_c^{tahmin}})^2) \cdot (\sum_i \sum_j (f_{c,ij}^{deneysel} - \overline{f_c^{deneysel}})^2)}} \quad (6)$$

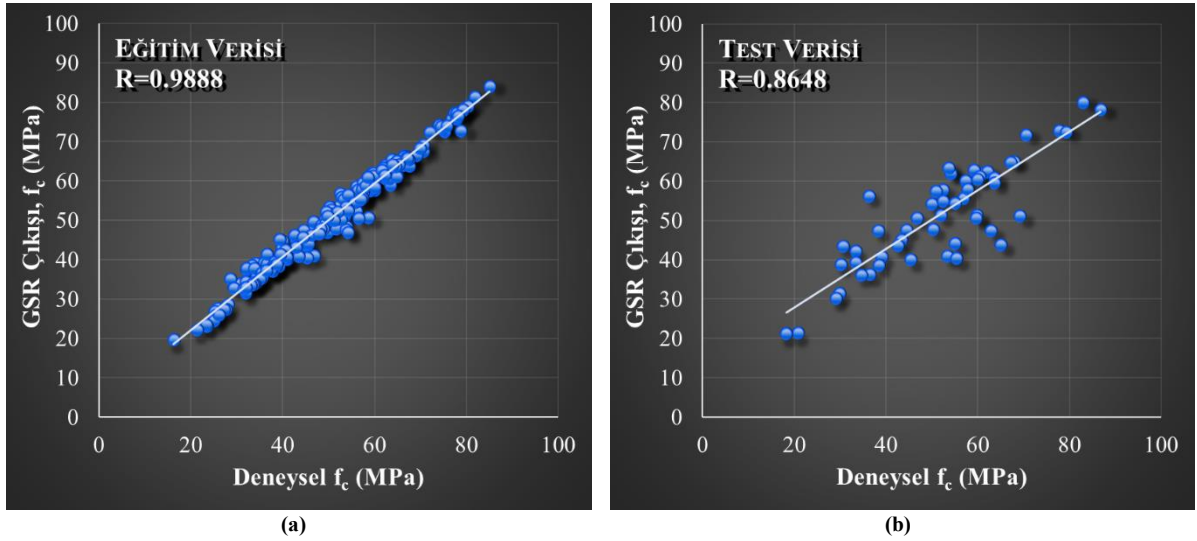
Denklem (6)'da $f_{c,ij}^{tahmin}$, tahmin edilen i . beton basınç dayanımı değeri; $f_{c,ij}^{deneysel}$, deneysel i . beton basınç dayanımı değeri; $\overline{f_c^{tahmin}}$, tahmin edilen beton basınç dayanımı değerlerinin ortalaması; $\overline{f_c^{deneysel}}$, deneysel beton basınç dayanımı değerlerinin ortalamasıdır.

Şekil 2a ve 2b'de deneysel f_c değerlerine karşılık, geliştirilen DVM modelinin tahmin ettiği f_c değerleri grafik olarak verilmiştir. Deneysel veri ile modelin tahmin ettiği değerler arasında doğrusal bir ilişki mevcuttur. Buna göre bu doğrusal ilişkilerin korelasyon katsayıları (R), DVM modelinin eğitim aşamasında 0.9265 ve test aşamasında ise 0.8180 olarak hesaplanmıştır (Şekil 2a-2b).



Şekil 2. DVM çıkışlarının deneysel veri ile karşılaştırılması, a) eğitim verisi ve b) test verisi.

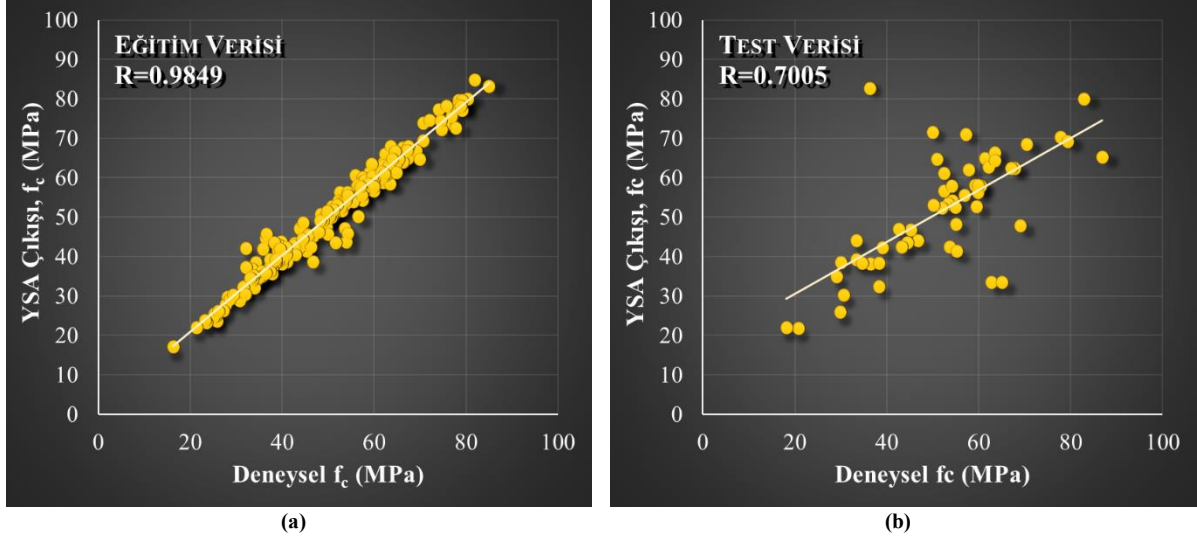
Geliştirilen GSR modelinin, deneysel f_c 'ye karşılık tahmin ettiği f_c değerleri ise eğitim ve test aşamaları için sırasıyla Şekil 3a ve 3b'de görülmektedir. GSR modelinin eğitim aşamasında deneysel veri ile modelin çıkışı arasındaki korelasyon katsayısı 0.9888 ve test aşamasında 0.8648'dir. Korelasyon katsayısı değerleri karşılaştırıldığında hem eğitim hem de test aşamalarında GSR modelinin DVM modelinden daha başarılı olduğu görülmektedir. Ayrıca iki model de test veri setini %80'in üzerinde bir doğrulukla tahmin edebilmişlerdir.



Şekil 3. GSR çıkışlarının deneysel veri ile karşılaştırılması, a) eğitim verisi ve b) test verisi.

Literatürde beton bileşiminden basınç dayanımının tahmin edilmesi probleminde üstün başarı sergileyen ve en çok bilinen makine öğrenmesi yöntemi YSA'dır [5], [6], [9]–[16]. Bu sebeple, bu çalışma kapsamında geliştirilen GSR ve DVM modellerinin başarısı, aynı veri seti ile eğitilmiş ve test edilmiş YSA modeli ile de karşılaştırılmıştır. Çalışmada tasarlanan YSA, deneme yanılma yoluyla oluşturularak kullanılan deneysel veri setine en başarılı çıkışları üretebilen YSA modelidir. Şekil 4a ve 4b'de görülen sonuçları üretmiş olan 8 girişli YSA modelinin, bir gizli katmanında 10 adet gizli yapay sinir hücresi ve 1 adet çıkışı bulunmaktadır. Gizli katmandaki hücrelerin aktivasyon fonksiyonu, tanjant sigmoid aktivasyon fonksiyonudur. Şekil 4a'da 215 adet eğitim verisi ile geliştirilen YSA modelinin, deneysel f_c değerlerine karşılık tahmin edilen f_c değerleri ile karşılaştırılması görülmektedir. Burada eğitim aşamasındaki korelasyon katsayısı, 0.9849 olarak hesaplanmıştır. Şekil 4b'de ise YSA modelinin deneysel test verisine ürettiği çıkış f_c değerleri ile deneysel f_c değerleri arasındaki

doğrusal ilişki verilmiştir. Test verisi için korelasyon katsayısı, 0.7005 olarak hesaplanmıştır. Bu korelasyon değerleri karşılaştırıldığında hem eğitim hem de test aşamalarında GSR ve DVM modellerinin çalışmada kullanılan veri setine YSA'dan daha başarılı sonuçlar üretebildikleri görülmektedir.



Şekil 4. YSA çıktılarının deneysel veri ile karşılaştırılması, a) eğitim verisi ve b) test verisi.

Makine öğrenmesi metotları kullanılarak geliştirilen modellerin, çıktıları tahmin etmekteki başarısını ölçmek için korelasyon katsayılarının yanı sıra deneysel veri ile model çıkışı arasında hesaplanan hata oranları da kullanılmaktadır. Hata oranı, her bir veri için ayrı ayrı basit fark değerleri olarak hesaplanabileceği gibi, bütün veri setinin hatasını tek bir rakamsal değer ile ifade edebilecek şekilde hesaplanabilir. Bu çalışmada eğitim ve test veri setlerinde oluşan, deneysel f_c ile modellerin tahmin ettiği f_c değerleri arasında oluşan hata miktarları iki farklı şekilde hesaplanmıştır. Bu hata değerlerinden biri Kök Ortalama Kare Hata (Root Mean Squared Error - RMSE) miktarı, Denklem (7) ve diğeri Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error - MAE) miktarı, Denklem (8) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (f_{c,i}^{tahmin} - f_{c,i}^{deneysel})^2}{N}} \quad (7)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |f_{c,i}^{tahmin} - f_{c,i}^{deneysel}|}{N} \quad (8)$$

Denklem (7) ve (8)'de N , veri sayısı; $f_{c,i}^{tahmin}$, tahmin edilen i . beton basınç dayanımı değeri; $f_{c,i}^{deneysel}$, deneysel i . beton basınç dayanımı değeridir.

Tablo 2'de geliştirilen DVM, GSR ve YSA modellerinin tahmin ettiği sonuçların doğruluk ve hata değerleri verilmiştir. Gerek korelasyon katsayıları (R) gerekse RMSE ve MAE hata oranları karşılaştırıldığında DVM ve GSR metotlarının YSA'dan daha başarılı olduğu görülmektedir. Ayrıca üç makine öğrenmesi metodu arasında en başarılı olanı GSR'dir. GSR modelinin hem eğitim hem de test veri setleri için en yüksek korelasyon katsayısı değerlerine ve en düşük hata oranlarına sahip olan model olduğu ortaya konulmuştur (Tablo 2).

Tablo 2. Makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak elde edilen tahmin modellerinin performans ölçümleri

	GSR		DVM		YSA	
	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test
Korelasyon Katsayısı (R)	0.9888	0.8648	0.9265	0.8180	0.9849	0.7005
Kök Ortalama Kare Hata (RMSE)	2.2768	7.5684	5.5411	8.6937	2.5364	11.3507
Ortalama Mutlak Hata (MAE)	1.6468	5.4645	3.7392	6.5747	1.6934	7.0424

4. Sonuçlar

KYB'nin basınç dayanımını tahmin eden makine öğrenmesi modelinin geliştirilmesini amaçlayan bu çalışmada aşağıda sıralanan sonuçlara ulaşılmıştır:

- Çalışmada kullanılan üç farklı makine öğrenmesi metodu GSR, DVM ve YSA'dır. Bu metotlar kullanılarak KYB bileşiminden ve taze KYB'nin çökme yayılma değerinden, KYB'nin basınç dayanımını tahmin edebilen modeller geliştirilmiştir.
- Modellerin üçü de problemi eğitim aşamasında %90'ın üzerinde bir doğrulukla öğrenebilmişleridir. Özellikle test aşamasında GSR ve DVM modelleri, daha başarılı sonuçlar üreterek %80'in üzerinde doğruluk oranı yakalamışlardır.
- Literatürde birçok farklı özel beton türünün basınç dayanımının tahmin edilmesinde kullanılan YSA metodu, bu çalışmada kullanılan veri setini öğrenmede GSR ve DVM modelleri kadar başarılı olamamıştır.
- Bu çalışmada gerek korelasyon katsayıları ile gerekse hata oranları ile ölçülen uygunluk hesaplamalarına değerlere göre, en başarılı makine öğrenmesi modeli ise GSR olmuştur.
- Gelecek çalışmalar için GSR ve DVM metotlarının farklı beton türlerine ait veri setleri ile çalıştırılarak, beton karışım tasarımı alanındaki kullanımının ve başarısının artırılabilceği söylenebilir.

Kaynaklar

- [1] O. Altay, M. Ulas, and K. E. Alyamac, "Prediction of the Fresh Performance of Steel Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete Using Quadratic SVM and Weighted KNN Models," IEEE Access, vol. 8, pp. 92647–92658, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2994562.
- [2] O. Altay, T. Gurgenc, M. Ulas, and C. Özel, "Prediction of wear loss quantities of ferro-alloy coating using different machine learning algorithms," Friction, vol. 8, no. 1, pp. 107–114, 2020, doi: 10.1007/s40544-018-0249-z.
- [3] T. Gurgenc, O. Altay, M. Ulas, and C. Ozel, "Extreme learning machine and support vector regression wear loss predictions for magnesium alloys coated using various spray coating methods," J. Appl. Phys., vol. 127, no. 18, p. 185103, May 2020, doi: 10.1063/5.0004562.
- [4] O. Altay, M. Ulas, and K. E. Alyamac, "DCS-ELM: a novel method for extreme learning machine for regression problems and a new approach for the SFRSCC.," PeerJ. Comput. Sci., vol. 7, p. e411, 2021, doi: 10.7717/peerj-cs.411.
- [5] M. Açıkgeç, M. Ulaş, and K. E. Alyamac, "Using an Artificial Neural Network to Predict Mix Compositions of Steel Fiber-Reinforced Concrete," Arab. J. Sci. Eng., vol. 40, no. 2, pp. 407–419, 2015, doi: 10.1007/s13369-014-1549-x.
- [6] M. Acikgeç Ulas, "Development of an artificial neural network model to predict waste marble powder demand in eco-efficient self-compacting concrete," Struct. Concr., no. January, pp. 1–14, May 2022, doi: 10.1002/suco.202200043.
- [7] T. Standard, "TS 802 Beton karışım tasarımı hesap esasları." Turkish Standards Institutions, Ankara, 2016.
- [8] V. Chandwani, V. Agrawal, and R. Nagar, "Modeling slump of ready mix concrete using genetic algorithms assisted training of Artificial Neural Networks," Expert Syst. Appl., vol. 42, no. 2, pp. 885–893, 2015, doi: 10.1016/j.eswa.2014.08.048.
- [9] M. T. Uddin, A. H. Mahmood, M. R. I. Kamal, S. M. Yashin, and Z. U. A. Zihan, "Effects of maximum size of brick aggregate on properties of concrete," Constr. Build. Mater., vol. 134, pp. 713–726, Mar. 2017, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.12.164.
- [10] U. Atici, "Prediction of the strength of mineral admixture concrete using multivariable regression analysis and an artificial neural network," Expert Syst. Appl., vol. 38, no. 8, pp. 9609–9618, Aug. 2011, doi: 10.1016/J.ESWA.2011.01.156.
- [11] A. Behnood and E. M. Golafshani, "Predicting the compressive strength of silica fume concrete using hybrid artificial neural network with multi-objective grey wolves," J. Clean. Prod., vol. 202, pp. 54–64, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.065.
- [12] C. Bilim, C. D. Atiş, H. Tanyildizi, and O. Karahan, "Predicting the compressive strength of ground granulated blast furnace slag concrete using artificial neural network," Adv. Eng. Softw., vol. 40, no. 5, pp. 334–340, May 2009, doi: 10.1016/J.ADVENGSOFT.2008.05.005.
- [13] H. Naderpour, A. H. Rafiean, and P. Fakharian, "Compressive strength prediction of environmentally friendly concrete using artificial neural networks," J. Build. Eng., vol. 16, pp. 213–219, Mar. 2018, doi: 10.1016/J.JOBE.2018.01.007.
- [14] B. K. R. Prasad, H. Eskandari, and B. V. V. Reddy, "Prediction of compressive strength of SCC and HPC with high volume fly ash using ANN," Constr. Build. Mater., vol. 23, no. 1, pp. 117–128, Jan. 2009, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2008.01.014.
- [15] İ. B. Topçu and M. Saridemir, "Prediction of compressive strength of concrete containing fly ash using artificial neural

- networks and fuzzy logic,” *Comput. Mater. Sci.*, vol. 41, no. 3, pp. 305–311, Jan. 2008, doi: 10.1016/J.COMMATSCI.2007.04.009.
- [16] G. Pazouki, E. M. Golafshani, and A. Behnood, “Predicting the compressive strength of self-compacting concrete containing Class F fly ash using metaheuristic radial basis function neural network,” *Struct. Concr.*, no. January, pp. 1–23, 2021, doi: 10.1002/suco.202000047.
- [17] R. N. Sağlam, M. Açikgenç Ulaş, and K. E. Alyamaç, “Hafif Beton Üretimi İçin Gerekli Olan Hafif Agreganın Yapay Sinir Ağı ile Tahmin Edilmesi,” *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg.*, vol. 34, no. 2, pp. 889–898, 2022, doi: 10.35234/fumbd.1133877.
- [18] A. M. Abd and S. M. Abd, “Modelling the strength of lightweight foamed concrete using support vector machine (SVM),” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 6, pp. 8–15, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2016.11.002>.
- [19] H. Ling, C. Qian, W. Kang, C. Liang, and H. Chen, “Combination of Support Vector Machine and K-Fold cross validation to predict compressive strength of concrete in marine environment,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 206, pp. 355–363, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.071>.
- [20] Z. Fan, R. Chiong, Z. Hu, and Y. Lin, “A fuzzy weighted relative error support vector machine fuzzy reverse prediction of concrete components,” *Comput. Struct.*, vol. 230, p. 106171, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2019.106171>.
- [21] J. Dhanpat, A. Higginson, and K. Brooks, “Estimation of the Effect of Bio-Admixtures on Concrete Workability Using Linear Regression and Support Vector Machines,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 54, no. 21, pp. 133–138, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.12.023>.
- [22] N. Harish and P. Janardhan, “Support vector machine in predicting epoxy glass powder mixed cement concrete,” *Mater. Today Proc.*, vol. 46, pp. 9042–9046, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.385>.
- [23] K. Zhang, K. Zhang, R. Bao, and X. Liu, “A framework for predicting the carbonation depth of concrete incorporating fly ash based on a least squares support vector machine and metaheuristic algorithms,” *J. Build. Eng.*, vol. 65, p. 105772, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105772>.
- [24] B. Basaran, I. Kalkan, E. Bergil, and E. Erdal, “Estimation of the FRP-concrete bond strength with code formulations and machine learning algorithms,” *Compos. Struct.*, vol. 268, p. 113972, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113972>.
- [25] K. Liu, Z. Dai, R. Zhang, J. Zheng, J. Zhu, and X. Yang, “Prediction of the sulfate resistance for recycled aggregate concrete based on ensemble learning algorithms,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 317, p. 125917, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125917>.
- [26] K. Ozawa, K. Maekawa, M. Kunishima, and H. Okamura, “High-performance concrete based on the durability of concrete structures,” 1989.
- [27] H. Okamura, K. Ozawa, K. Maekawa, and S. Tangtermsinikul, “High-performance concrete mechanism of super-fluidized concrete,” in *EIT-JSCE-AIT joint seminar on solution to urban infrastructure problems through civil engineering technology*, 1992, p. 16.
- [28] X. Wang, K. Wang, P. Taylor, and G. Morcous, “Assessing particle packing based self-consolidating concrete mix design method,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 70, pp. 439–452, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.002.
- [29] H. Yazici, “The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze-thaw resistance of self-compacting concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 4, pp. 456–462, 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.01.002.
- [30] B. Felekoğlu, S. Türkel, and B. Baradan, “Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete,” *Build. Environ.*, vol. 42, no. 4, pp. 1795–1802, 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2006.01.012.
- [31] K. E. Alyamaç and R. Ince, “A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 3, pp. 1201–1210, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.08.012.
- [32] M. C. S. Nepomuceno, L. A. Pereira-de-Oliveira, and S. M. R. Lopes, “Methodology for the mix design of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 64, pp. 82–94, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.021.
- [33] H. J. H. Brouwers and H. J. Radix, “Self-compacting concrete: Theoretical and experimental study,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 11, pp. 2116–2136, 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2005.06.002.
- [34] H. W. Reinhardt and M. Stegmaier, “Influence of heat curing on the pore structure and compressive strength of self-compacting concrete (SCC),” *Cem. Concr. Res.*, vol. 36, no. 5, pp. 879–885, 2006, doi: 10.1016/j.cemconres.2005.12.004.
- [35] R. Siddique, P. Aggarwal, and Y. Aggarwal, “Influence of water/powder ratio on strength properties of self-compacting concrete containing coal fly ash and bottom ash,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 29, pp. 73–81, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.10.035.
- [36] S. Nunes, H. Figueiras, P. Milheiro Oliveira, J. S. Coutinho, and J. Figueiras, “A methodology to assess robustness of SCC mixtures,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 36, no. 12, pp. 2115–2122, 2006, doi: 10.1016/j.cemconres.2006.10.003.
- [37] V. B. Bosiljkov, “SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 9, pp. 1279–1286, 2003, doi: 10.1016/S0008-8846(03)00013-9.
- [38] E. Güneyisi, M. Gesoğlu, Z. Algin, and H. Yazici, “Effect of surface treatment methods on the properties of self-compacting concrete with recycled aggregates,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 64, pp. 172–183, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.090.

- [39] M. Gesoğlu, E. Güneyisi, M. E. Kocabağ, V. Bayram, and K. Mermerdaş, “Fresh and hardened characteristics of self compacting concretes made with combined use of marble powder, limestone filler, and fly ash,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 37, pp. 160–170, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.092.
- [40] E. Güneyisi, M. Gesoğlu, S. Al-Rawi, and K. Mermerdaş, “Effect of volcanic pumice powder on the fresh properties of self-compacting concretes with and without silica fume,” *Mater. Struct. Constr.*, vol. 47, no. 11, pp. 1857–1865, 2014, doi: 10.1617/s11527-013-0155-9.
- [41] K. E. Alyamac, E. Ghafari, and R. Ince, “Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method,” *J. Clean. Prod.*, vol. 144, pp. 192–202, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.156.
- [42] P. K. Mehta and P. J. M. Monteiro, *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*. New York: McGraw-Hill, 2006.
- [43] M. A. Ulas, K. E. Alyamac, and Z. C. Ulucan, “Effects of aggregate grading on the properties of steel fibre-reinforced concrete,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 246, p. 12015, 2017, doi: 10.1088/1757-899x/246/1/012015.
- [44] C. Cortes and V. Vapnik, “Support-vector networks,” *Mach. Learn.*, vol. 20, no. 3, pp. 273–297, 1995, doi: 10.1007/BF00994018.
- [45] T. Kavzoğlu and İ. Çölkesen, “Destek vektör makineleri ile uydu görüntülerinin sınıflandırılmasında kernel fonksiyonlarının etkilerinin incelenmesi,” *Harit. Derg.*, vol. 76, no. 144, pp. 73–82, 2010, [Online]. Available: <http://search.yayin/detay/102501>.
- [46] M. Korkmaz, A. Dogan, and V. Kirmaci, “Performance Analysis of Counterflow Ranque – Hilsch Vortex Tube with Linear Regression, Support Vector Machines and Gaussian Process Regression Method,” *Gazi J. Eng. Sci.*, vol. 8, no. 2, pp. 361–370, 2022, doi: 10.30855/gmbd.0705015.
- [47] O. Chapelle, P. Haffner, and V. N. Vapnik, “Support vector machines for histogram-based image classification,” *IEEE Trans. Neural Networks*, vol. 10, no. 5, pp. 1055–1064, 1999, doi: 10.1109/72.788646.
- [48] E. Snelson and Z. Ghahramani, “Local and global sparse Gaussian process approximations,” in the Eleventh International Conference on Artificial Intelligence and Statistics, 2007, vol. 2, pp. 524–531, [Online]. Available: <http://proceedings.mlr.press/v2/snelson07a/snelson07a.pdf>.
- [49] J. Vanhatalo, V. Pietiläinen, and A. Vehtari, “Approximate inference for disease mapping with sparse Gaussian processes,” *Stat. Med.*, vol. 29, no. 15, pp. 1580–1607, Jul. 2010, doi: <https://doi.org/10.1002/sim.3895>.
- [50] M. N. Mohd Aris, H. Daud, S. C. Dass, and K. A. Mohd Noh, “Gaussian Process Methodology for Multi-Frequency Marine Controlled-Source Electromagnetic Profile Estimation in Isotropic Medium,” *Processes*, vol. 7, no. 10, 2019, doi: 10.3390/pr7100661.
- [51] J. Liang, Z. Shi, F. Zhu, W. Chen, X. Chen, and Y. Li, “Gaussian Process Autoregression for Joint Angle Prediction Based on sEMG Signals,” *Front. Public Heal.*, vol. 9, 2021, doi: 10.3389/fpubh.2021.685596.
- [52] Ç. Elmas, *Yapay Zeka Uygulamaları*. Ankara: Seçkin Yayıncılık, 2007.
- [53] M. Sarıdemir, “Prediction of compressive strength of concretes containing metakaolin and silica fume by artificial neural networks,” *Adv. Eng. Softw.*, vol. 40, no. 5, pp. 350–355, May 2009, doi: 10.1016/J.ADVENGSOFT.2008.05.002.
- [54] A. S. Pandya and R. B. Macy, *Pattern Recognition with Neural Networks in C++*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1996.
- [55] A. J. Thomas, M. Petridis, S. D. Walters, S. M. Gheytsi, and R. E. Morgan, “On Predicting the Optimal Number of Hidden Nodes,” in 2015 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI), 2015, pp. 565–570, doi: 10.1109/CSCI.2015.33.

Hiperspektral Görüntü Sınıflandırma için Hibrit Evrişimsel Sinir Ağı ve Sıkma- Uyarma Bloğu Yöntemi

Mehmet NERGİZ^{1*}

¹ Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Dicle Üniversitesi, Diyarbakır, Türkiye

*¹ mnergiz@dicle.edu.tr

(Geliş/Received: 23/01/2023;

Kabul/Accepted: 27/02/2023)

Öz: Yüksek spektral çözünürlüğe sahip bir tür optik uzaktan algılama görüntüsü olarak, hiperspektral görüntüler, zengin spektral özellik bilgisine sahip 3 boyutlu görüntü küpleridir. Şu anda hiperspektral görüntü sınıflandırması, uzaktan algılama alanındaki en aktif araştırma alanlarından biridir. Son yıllarda bu alanda derin öğrenme ve özellikle evrişimsel sinir ağları (ESA) sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında, hiperspektral görüntü sınıflandırması için yeni bir model geliştirilmiştir. Önerilen model, 3B ESA, Sıkma-uyarma bloğu ve 2B Derinlemesine ayrılabilir evrişimden (DAE) oluşmaktadır. 2B ESA ile spektral özellik bilgileri elde edilemediğinden dolayı, hem spektral hem de uzamsal özellikleri elde etmek için 3B ESA kullanılmıştır. Sadece 3B ESA kullanımı hesaplama karmaşıklığını arttırmaktadır. Hibrit ESA kullanımı bu sorunu çözmektedir. Hibrit ESA'larda daha fazla uzamsal özellik çıkarabilmek için 3B ESA'dan sonra 2B ESA kullanılmaktadır. Ancak bu çalışma kapsamında, 2B ESA yerine 2B DAE kullanımı tercih edilmiştir. Standart 2B ESA yerine 2B DAE kullanımı ile eğitilebilir parametre sayısı ve hesaplama maliyeti azaltılmıştır. Bu, sınıflandırma performansını arttırmıştır. Ayrıca, özellik çıkarma ve hiperspektral görüntü sınıflandırmasındaki performansı arttırmak için Hibrit ESA modeli bir sıkma-uyarma bloğu ile birleştirilmiştir. Önerilen yöntemin sınıflandırma performansını test etmek için HyRank-Loukia ve Houston 2013 verisetleri kullanılmıştır. %10 eğitim örneği alınarak gerçekleştirilen uygulamalar sonucunda sırasıyla %90.86 ve %99.39 genel doğruluk değeri elde edilmiştir. Ayrıca, önerilen yöntem literatürden yedi farklı yöntem ile karşılaştırılmış ve önerilen yöntemin daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Hiperspektral görüntü sınıflandırma, derin öğrenme, evrişimsel sinir ağı, derinlemesine ayrılabilir evrişim, sıkma-uyarma bloğu.

Hybrid Convolutional Neural Network and Squeeze-Excitation Block Method for Hyperspectral Image Classification

Abstract: As a kind of optical remote sensing image with high spectral resolution, hyperspectral images are 3D image cubes with rich spectral feature information. At present, hyperspectral image classification is one of the most active research areas in the remote sensing field. In recent years, deep learning and especially convolutional neural networks (CNN) have been used frequently in this field. In this study, a new model has been developed for hyperspectral image classification. The proposed model consists of 3D CNN, Squeeze-and-Excitation, and 2D Depthwise separable convolution (DSC). Since spectral feature information cannot be obtained with 2D CNN, 3D CNN is used to obtain both spectral and spatial features. Using only 3D CNN is that it increases computational complexity. The use of hybrid CNN solves this problem. In order to extract more spatial features in hybrid CNNs, 2D CNN is used after 3D CNN. However, within the scope of this study, the use of 2D DSC was preferred instead of 2D CNN. By using 2D DSC instead of standard 2D CNN, the number of trainable parameters and computational cost are reduced. This has improved the classification performance. In addition, the hybrid CNN model is combined with a Squeeze-and-Excitation block to improve performance in feature extraction and hyperspectral image classification. HyRank-Loukia and Houston 2013 datasets were used to test the classification performance of the proposed method. As a result of the applications performed by taking 10% training samples, 90.86% and 99.39% overall accuracy values were obtained, respectively. In addition, the proposed method was compared with seven different methods from the literature and it was seen that the proposed method gave better results.

Key words: Hyperspectral image classification, deep learning, convolutional neural network, depthwise separable convolution, squeeze-excitation block.

1. Giriş

Hiperspektral görüntüler, 3 boyutlu (3B) (bir spektral-iki uzamsal) hiperküp olarak temsil edilmektedir. Bu görüntüler, RGB ve multispektral görüntülere kıyasla yüzlerce spektral banttan oluşmaktadır [1]. Ayrıca zengin

* Sorumlu yazar: mnergiz@dicle.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-0867-5518

spektral özellik bilgisi içermektedirler. Zengin spektral özellik bilgileri sayesinde, yer nesnelere tanınması ve sınıflandırılması daha doğru bir şekilde yapılabilmektedir [2]. Bu nedenle astronomi, tarım, askeri gözetleme, nesne tespiti, yangın izleme, madencilik, bitki örtüsü analizi, ekin izleme gibi birçok gerçek yaşam uygulamasında yaygın olarak kullanılmaktadır [3,4]. Bununla birlikte, orijinal hiperspektral görüntülerin bol spektral özellik bilgisi, spektral fazlalığa neden olmaktadır. Bu durum hiperspektral görüntü sınıflandırma performansını düşürmektedir. Bu sorunu çözmek için, orijinal hiperspektral görüntü verilerine Temel bileşen analizi (TBA), Lineer diskriminant analizi (LDA), Kernel TBA, Bağımsız bileşen analizi, artımlı temel bileşen analizi gibi boyut indirgeme yöntemleri uygulanmaktadır [5]. Bu boyut indirgeme yöntemleri arasında en sık kullanılan yöntem TBA'dır. TBA, denetimsiz ve doğrusal bir yöntemdir. Temel bileşenlerin spektral bilgilerini daha büyük bir varyans katkısıyla korurken, hiperspektral görüntü verilerinden büyük miktarda fazla spektral bilgiyi kaldırabilmektedir. TBA'dan sonra spektral boyut sayısı azalmakta ve hesaplama maliyeti düşmektedir [6].

Hiperspektral görüntülerde sınıflandırma oldukça önemli ve zorlu bir problem olduğundan, hiperspektral görüntü sınıflandırma birçok araştırmacı tarafından araştırmalarının odak noktası haline gelmiştir. Destek vektör makinesi [7], lojistik regresyon [8] ve k-en yakın komşular [9] gibi geleneksel hiperspektral görüntü sınıflandırma yöntemleri, genellikle hiperspektral görüntü sınıflandırma için birçok spektral özellik bilgisinin kullanılmasına dayanmaktadır. Bununla birlikte, hiperspektral görüntüler hem spektral bantlar arasında yüksek korelasyona hem de spektral bant fazlalığına sahip olduğundan, bu tipik sınıflandırıcılar ile yüksek sınıflandırma doğruluğu elde edilememektedir. Ayrıca, yalnızca spektral özellikleri kullanan bu geleneksel sınıflandırıcılar, yüksek çözünürlüklü veriler için algılanan önemli uzamsal özellikleri elde edememektedir. Bu durum genellikle hiperspektral görüntülerde daha düşük sınıflandırma doğruluğuna neden olmaktadır. Sınıflandırma doğruluğunu artırmanın en basit yolu, hem spektral hem de uzamsal özellikleri bir arada kullanan sınıflandırma yöntemleri geliştirmektir. Hiperspektral görüntülerde uzamsal özellikler spektral özelliklerle morfolojik profiller, çoklu çekirdek öğrenme, süper piksel ve seyrek temsil tabanlı yöntemlerle birleştirilmektedir [10]. Spektral özellik bilgisinin uzamsal özellik bilgisi ile birlikte kullanılması sınıflandırma performansını arttırmaktadır. Bununla birlikte, çoğu geleneksel sınıflandırıcılar, hem spektral hem de uzamsal özellikleri manuel olarak çıkarmaktadır.

Son yıllarda, derin öğrenmeye dayalı yöntemler, özellikle evrişimsel sinir ağları (ESA), hiperspektral görüntü sınıflandırmada yaygın olarak kullanılmaktadır. Geleneksel sınıflandırıcılardan farklı olarak, derin öğrenme yöntemlerinin eğitim aşaması özellikleri otomatik olarak çıkarmakta ve çıkarılan özellikleri sınıflandırma aşamasında kullanmaktadır [11]. ESA, hiperspektral görüntü sınıflandırmada daha belirgin özellikler sağladığından, oldukça iyi özellik öğrenme özelliğine sahiptir. Sınıflandırma problemlerinin daha kolay çözülebilmesi için öğrenilen özelliklerin ayırt edici olması gerekmektedir. Bu, sınıflandırma performansını önemli ölçüde arttırmaktadır. Bu nedenle, ESA tabanlı yöntemler, hiperspektral görüntü sınıflandırmada daha derin uzamsal-spektral öznelilikleri çıkarmak için kullanılan en güçlü yöntemlerden biridir. Bu yöntemler, sınıflandırma doğruluğunu arttırdıkları için çoğu araştırmacı tarafından çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

ESA, uzamsal spektral özellik bilgilerini çıkarırken yüksek sınıflandırma doğruluğu sağlamaktadır. Bu yönüyle diğer derin öğrenme temelli yöntemlere kıyasla hiperspektral görüntü sınıflandırma alanında sıklıkla kullanılan önemli bir yöntem olduğunu kanıtlamıştır. Son yıllarda literatürde incelendiğinde de bu alanda oldukça sık kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışma kapsamında da hiperspektral görüntü sınıflandırması için hibrit ESA ve sıkma-uyarma bloğundan (SU) oluşan bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntem 3B ESA, SU bloğu ve 2B Derinlemesine ayrılabilir evrişim katmanlarından oluşmaktadır. Bu çalışmada önerilen yöntemin katkıları şu şekildedir:

- Hiperspektral görüntü sınıflandırmada 2B ESA kullanılan çalışmalarda sadece uzamsal özellikler çıkarılmaktadır. Ayırt edici özellikler spektral boyuttan çıkarılmadığından, önemli spektral özellikler kaybolmaktadır. Hiperspektral görüntü sınıflandırmada en önemli sorunlardan biri, hem spektral hem de uzamsal özelliklerin dikkate alınmasıdır. 2B ESA ile her iki özellik bilgisi elde edilememektedir. 2B ESA'dan farklı olarak, 2B evrişim yerine 3B evrişimlerin kullanıldığı 3B ESA'da uzamsal-spektral özellikler eş zamanlı olarak çıkarıldığı için hiperspektral görüntü sınıflandırmada kullanılmıştır.
- Ancak, 3B ESA kullanımı, hesaplama karmaşıklığında bir artışa neden olmaktadır. Ayrıca, hiperspektral görüntülerdeki farklı sınıflar birçok spektral bant üzerinde benzer dokulara sahip olduğunda tek başına 3B ESA kullanımı sınıflandırma doğruluğunu azaltabilmektedir. 2B ve 3B ESA ayrı ayrı kullanıldığında ortaya çıkan problemlerin üstesinden gelmek için her iki yöntemin birlikte kullanıldığı hibrit ESA yöntemine odaklanılmıştır. Hibrit ESA yöntemi ile hem uzamsal hem de spektral öznelilik bilgisinden tam olarak yararlanılması amaçlanmaktadır. Bu, sınıflandırma doğruluğunu arttırmaktadır.
- Önerilen yöntemimizdeki bir başka motivasyonumuz hibrit ESA yönteminde 2B Evrişim yerine 2B derinlemesine evrişim katmanlarının kullanılmasıdır. Derinlemesine evrişim katmanları kullanılarak,

eğitilebilir parametre sayısı azaltılmış ve sınıflandırma performansı artırılmıştır. Bu sayede önerilen hibrit yöntemin sınıflandırma doğruluğunun artırılması amaçlanmıştır.

- SU bloğu, toplam parametre sayısını minimum düzeyde artırırken sınıflandırma performansını arttırdıkları için önerilen yönteme entegre edilmiştir.
- Önerilen yöntemin sınıflandırma performansını değerlendirmek için uygulamalarda HyRank-Loukia [28] ve Houston 2013 [29] veri setleri kullanılmıştır. %10'luk bir eğitim örneği kullanıldığında, HyRank-Loukia için sırasıyla %90.86 genel doğruluk, %89.13 kappa, %84.39 ortalama doğruluk ve Houston 2013 için %99.39 genel doğruluk, %99.34 kappa, %99.42 ortalama doğruluk sonuçları elde edilmiştir.

Çalışmanın geri kalanı şu şekildedir: Literatürde hiperspektral görüntü sınıflandırma alanında derin öğrenme ile gerçekleştirilen çalışmalar, ilgili çalışmalar bölümünde yer almaktadır. Hibrit ESA'nın teorik altyapısını oluşturan, derinlemesine ayrılabilir evrişim ağları, 3B-2B ESA ve önerilen yöntem materyal ve metot bölümünde açıklanmıştır. Ayrıca çalışmada kullanılan veri setleri ile ilgili bilgilerde materyal ve metot bölümünde yer almaktadır. Kullanılan veri setlerine ilişkin uygulamalar ve bu uygulamaların sınıflandırma sonuçları uygulamalar ve uygulama sonuçları bölümünde yer almaktadır. Bu çalışmanın genel bir değerlendirmesine sonuçlar bölümünde yer verilmiştir.

2. İlgili Çalışmalar

Derin öğrenme, özellikle ESA tabanlı yöntemler, hiperspektral görüntülerin sınıflandırılmasında araştırmacılar tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır. Roy vd. [1] hiperspektral görüntü sınıflandırma için etkili bir S3EResBoF (spektral-uzaysal sıkma ve uyarma artık özellik çantası) öğrenme yöntemini geliştirdi. Bu yöntem, sınıflandırma performansını arttırmak için uzamsal ve spektral artık öğrenme blokları içermektedir. Ek olarak, her artık bloğu bir sıkma ve uyarma ağı takip etmektedir. Roy vd. [12], 2B ve 3B ESA'yı birlikte kullanarak hiperspektral görüntü sınıflandırma için bir HybridSN (Hybrid SpectralNet) yöntemi geliştirdi. Geliştirilen yöntemde öncelikle uzamsal-spektral özellikleri çıkarmak için 3B ESA gerçekleştirilmiştir. Ardından, daha fazla uzamsal özellik çıkarmak için 2B ESA uygulanmıştır. Ahmad [13], sınıflandırma doğruluğunu arttırmak için 4 ardışık 3B evrişim katmanından oluşan bir yöntem (FC3B ESA) geliştirdi. Ayrıca boyut indirgeme yöntemi olarak artımlı TBA'yı kullandı. Roy, Dubey vd. [14] maksimum ve küresel havuzlama gibi farklı sıkma türlerinde çift doğrusal bir füzyon işlemi olan FuseNet'i tasarladı. FuseNet yönteminde, sıkma ve uyarma ağı artık blok ile birleştirilmiştir. Iyer vd. [15], hiperspektral görüntü sınıflandırma için Inception modüllerini kullanan bir yöntem önerdi. Ardından geliştirdikleri Inception modülüne HybridSN ve Inception artık ağ mimarisini eklediler. Yang [16], hiperspektral görüntü sınıflandırma için yeni bir sinerjik evrişimsel sinir ağı önerdi. Önerilen yöntem, hibrit 3B-2B ESA ve uzamsal-spektral özellik bilgisini birleştiren veri etkileşimi modüllerinden oluşmaktadır. Ayrıca, tamamen bağlı katmandan önceki bilgileri ve özellikleri etkili bir şekilde filtrelemeye yardımcı olan bir 3B dikkat mekanizması sunmaktadırlar. Firat vd. [17] 3B ESA ve ResNet18 mimarisini kullanarak derin uzamsal spektral özellikleri çıkarmak için hibrit bir 3B artık uzamsal-spektral evrişim ağı önermişlerdir. Eşzamanlı olarak spektral-uzamsal özellik çıkarımı, 3B ESA kullanılarak sağlanmıştır. Daha derin ESA'larda, katman sayısı arttıkça daha yüksek sınıflandırma performansı elde etmek için artık ağ (ResNet) mimarisi kullanılmıştır. Ayrıca ResNet mimarisi sayesinde derin ağlarda oluşabilecek bozulma ve kaybolan gradyan gibi problemlerin üstesinden gelinmiştir. Ali [18] hiperspektral görüntü sınıflandırma için çok yönlü Hibrit ESA ve sıkma-uyarma ağının bir kombinasyonundan oluşan bir yöntem önermektedir. Ding [19], çok ölçekli süper piksel tabanlı grafik özelliklerini ve yerel piksel özelliklerini çıkarabilen çok ölçekli grafik evrişimli ağı ve çok ölçekli ESA'yı entegre ederek hiperspektral görüntü sınıflandırması için yeni bir çok kademeli füzyon ağı önerdi. Hong [20], hiperspektral görüntü sınıflandırma için sıralı bir perspektiften transformatörler kullandı ve SpectralFormer adlı yeni bir yöntem önerdi. SpectralFormer, klasik transformatörlerdeki bant yönünde temsillerin ötesinde, hiperspektral görüntülerin komşu bantlarından spektral olarak yerel dizi bilgisini öğrenerek grup bazında spektral gömmeler sağlayabilmektedir.

3. Materyal ve Metot

Bu bölümde çalışma kapsamında önerilen yöntemin teorik arka planını oluşturan 3B-2B evrişimsel sinir ağı, 2B derinlemesine ayrılabilir evrişim, çalışma kapsamında kullanılan veri setleri ile ilgili bilgiler ve önerilen yöntemin detaylı açıklaması yer almaktadır.

3.1. 3B ve 2B evrişimsel sinir ağları (ESA)

Son zamanlarda sınıflandırma sürecinde derin öğrenme tekniklerinin kullanımı oldukça ilgi görmektedir. ESA, evrişim katmanı, havuzlama katmanı ve tamamen bağlantılı katman, sınıflandırma katmanı gibi farklı katmanlardan oluşan çok katmanlı sinir ağıdır. Evrişim işlemi, ESA modelinin birincil katmanı olan evrişim katmanındaki girdi verileri üzerinde gerçekleştirilir. Evrişim, alıcı alan ve çekirdek (öğrenilebilir parametreler) olmak üzere iki matris arasındaki nokta çarpım işlemidir. Genel olarak, çekirdek girdi verilerinin boyutundan daha küçüktür ve çekirdek girdi verileri üzerinde belirli bir adım (stride) değerine göre kaydırılarak mevcut özelliklere göre özellik haritası oluşturulur. Havuzlama katmanı, özellik haritasının uzamsal boyutunu azaltmada etkilidir ve genellikle evrişim katmanından sonra yer alır. Havuzlama işlemi, ağıdaki parametre sayısını azaltır ve aşırı öğrenmeyi etkili bir şekilde önler. Ağın son kısmı genellikle tamamen bağlı birkaç katmanı birbirine bağlar. Tamamen bağlı bir katmandaki her bir nöron, bir önceki katmandaki tüm nöronlarla bağlantı kurar ve çıktı değerini sınıflandırıcıya gönderir [21]. Bireysel nöronun x girdileri için çıktısı şu şekilde hesaplanır:

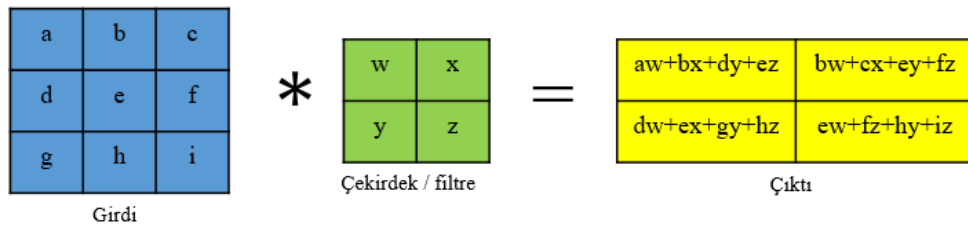
$$y = f(w * x + b) \quad (1)$$

Denklem 1'de w filtre ağırlığıdır ve b bias değeridir. $f(\cdot)$, ağırlıklı bir girdi toplamına uygulanan doğrusal olmayan aktivasyon anlamına gelir. ReLU, derin sinir ağlarına dayalı olarak geliştirilen modellerde en sık kullanılan aktivasyon fonksiyonudur ve Denklem 2'deki gibi hesaplanır [22].

$$f(y) = \max(0, y) \quad (2)$$

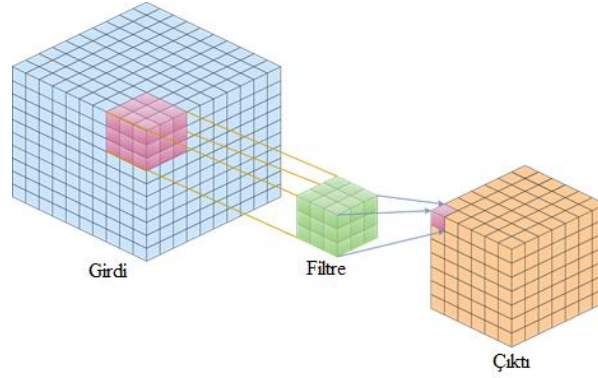
Bu fonksiyonda, y 'in değeri sıfırdan büyükse y 'nin çıktısı, y 'in değeri sıfırdan küçük veya ona eşitse çıktısı sıfırdır. ReLU doğrusal olmayan işlevini kullanmanın temel avantajı, sıfırdan büyük tüm girdiler için sabit bir türevi olmasıdır. Bu sabit türev, ağ öğrenimini hızlandırır. Sınıflandırma katmanı, ESA modelinin son katmanı ve sınıflandırma işleminin yapıldığı katmandır. Bu katmanın çıktı değerleri, tanınacak nesne sayısına bağlı olarak sınıf sayısına eşittir. Derin öğrenme mimarilerine dayanan softmax sınıflandırıcı bu katmanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sınıflandırıcı, her sınıf için 0-1 arasında olasılıksal değerler üretir. Sonuç olarak en yüksek olasılık değeri model tarafından tahmin edilen sınıfı verir [23]. Katmanların temel amacı, sınıflandırma işlemini gerçekleştirmek için daha sonraki katmanlarda kullanılacak yararlı özellikleri çıkarmaktır.

Geleneksel 2B ESA'da evrişim, 2×2 , 3×3 , 5×5 , 7×7 gibi 2B filtreler kullanılarak gerçekleştirilir. Bu işlem standart evrişimdir. Hiperspektral görüntü verilerine standart 2B ESA uygulandığında, yalnızca uzamsal özellik bilgisi elde edilir. Evrişim işlemi, Şekil 1'de gösterildiği gibi girdi görüntü matrisinin ve çekirdek/filtre matrisinin iç çarpımı ile gerçekleştirilir. Girdi görüntüsünün (özellik haritası) çıktısı, girdi görüntü matrisi üzerinde belirtilen adım sayısı (stride) kadar çekirdek matrisi sağa-sola, yukarı-aşağı kaydırılarak oluşturulur.



Şekil 1. 2B evrişim işlemi.

Hiperspektral görüntü verilerine standart 2B ESA uygulandığında, yalnızca uzamsal özellik bilgisi elde edilir. Hiperspektral görüntü verileri 3 boyutlu olduğu için 2 boyutlu ESA uygulandığında spektral öznitelik bilgileri elde edilemez. Bu durumda, 3B evrişim katmanlarına sahip 3B ESA kullanılır. 3B ESA ile hem spektral hem de uzamsal özelliklerden yararlanır. 3B ESA'da kullanılan filtreler $3 \times 3 \times 3$, $5 \times 5 \times 5$, $7 \times 7 \times 7$ gibi 3B'dir. 3B Evrişim işlemi, standart 2B evrişim işlemiyle aynıdır. Geleneksel 2B ESA'larda, 2B özellik haritalarını elde etmek için evrişim işlemi yalnızca uzamsal boyutlara uygulanır ve önceki katmanın tüm özellik haritalarını içerir. Ayrıca, geleneksel 2B ESA'larda, giriş görüntüsü 2B veya 3B olsun, çıkış görüntüsü 2B'dir. Hiperspektral görüntüler 3B'dir. Şekil 2'de gösterildiği gibi hem spektral hem de uzamsal özellikleri elde etmek için bir 3B filtre kullanılır ve çıktı 3B'dir.



Şekil 2. 3B evrişim işlemi.

3.2. 2B Derinlemesine Ayrılabilir Evrişim (2B DAE)

Standart evrişimin aksine, derinlemesine ayrılabilir evrişimin (DAE) kullanımı, eğitilebilir parametrelerin sayısını azaltmanın etkili bir yolu olarak görülebilmektedir. Eğitilebilir parametre sayısının azaltılması sınıflandırma performansını artırabilmektedir. DAE, standart evrişim işlemini iki ayrı adımda gerçekleştirir. (1) Derinlemesine evrişim (DE) ve (2) Noktasal evrişim (NE). NE ayrıca 1x1 standart evrişimdir. DAE'de, girişleri tek adımda yeni bir çıkış kümesinde birleştiren ve filtreleyen standart evrişimden farklı olarak, DE önce her giriş kanalını bağımsız olarak filtreler, ardından NE, DE'nin çıkışını 1x1 evrişimle filtreleyerek birleştirir. Bu açıdan DAE çarpanlara ayrılmış evrişim olarak da tanımlanabilmektedir [24,25]. Şekil 3'te gösterildiği gibi, 2B DAE'de, DE kullanılarak, giriş görüntüsünün her kanalına ayrı ayrı evrişim işlemleri uygulanır ve her boyutta uzamsal özellikler çıkarılır. 1x1 evrişimli NE, DE sonucunda elde edilen özellik haritalarına uygulanır. NE, özellik haritasını kanallar arasında birleştirmek için kullanılır. Şekil 3'teki giriş görüntüsünün uzunluğu $W \times H \times D$ olsun. Burada W genişlik, H yükseklik ve D kanal sayısıdır. $K \times K \times D$ boyutunda 1 filtre olduğunu varsayalım. Standart evrişim işlemi yapıldığında $W \times H \times 1$ boyutunda çıktı alındığını varsayalım. Standart evrişim işleminin maliyeti Denklem 3'teki gibidir.

$$cost_{standart_convolution} = KxKxDxWxHx1 \quad (3)$$

Derinlemesine ayrılabilir evrişimde, önce derinlemesine evrişim işlemi uygulanır. Daha sonra noktasal evrişim işlemi uygulanır. 2B Derinlemesine ayrılabilir evrişim işleminin matematiksel gösterimi aşağıdaki gibidir.

$$cost_{depthwise_convolution} = KxKx1xWxHxD \quad (4)$$

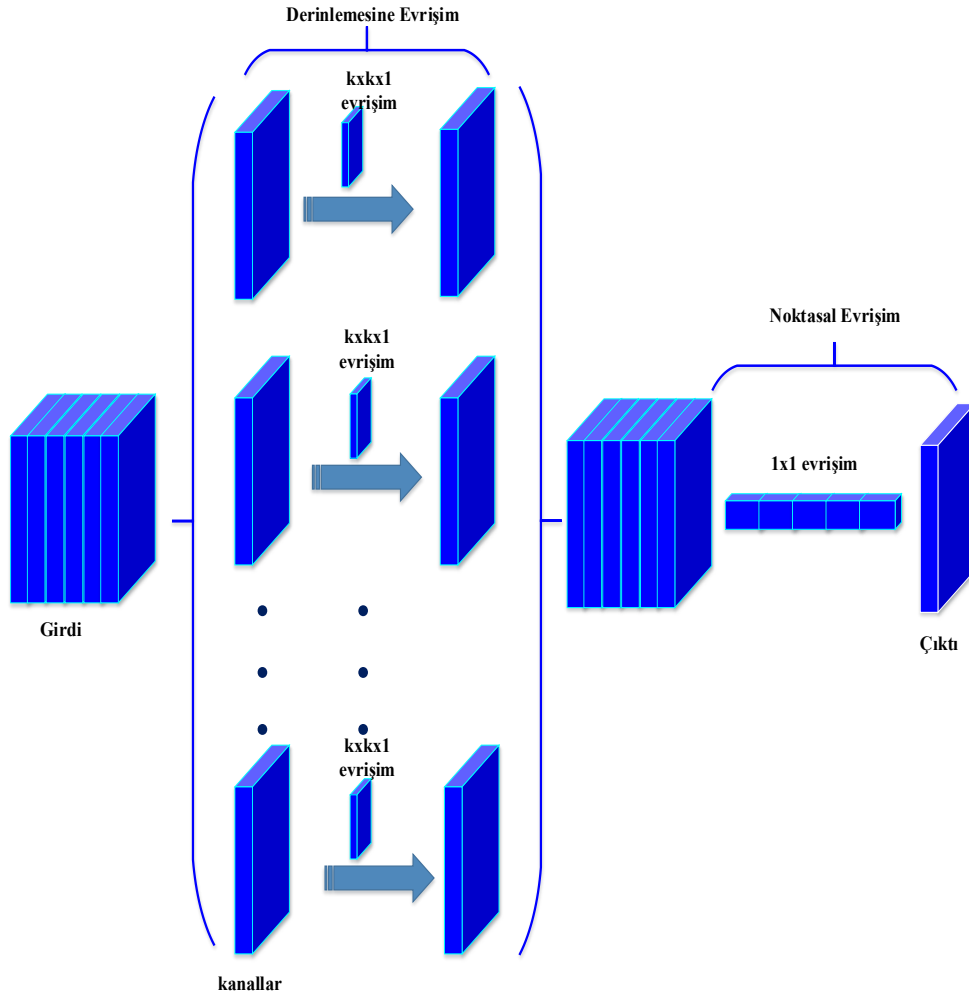
$$cost_{standart_convolution} = KxKxDxWxHx1 \quad (5)$$

$$\frac{(cost_{depthwise_convolution} + cost_{pointwise_convolution})}{cost_{standart_convolution}} = \frac{KxKx1xWxHxD + WxHxD}{KxKxDxWxHx1} = 1 + \frac{1}{K^2} \quad (6)$$

3.3. Sıkma ve uyarma bloğu (SU)

Sıkma-uyarma bloğu (SU), ESA'lar için neredeyse hiçbir hesaplama maliyeti olmadan kanal bağımlılıklarını iyileştiren bir yapı sunmaktadır. SU bloğu, girdi olarak aldığı özellikleri yeniden kalibre ederek önemli olan özellik bilgilerini çıkartmaktadır [26]. SU bloğunu kullanmak, kanallar arasındaki karşılıklı bağımlılığı artırabilmekte ve hiperspektral görüntü sınıflandırmaları için yararlı olan özellik bilgilerini geliştirebilmektedir. SU bloğunun işlevi şu şekildedir: Öncelikle, SU bloğunun girişine bir özellik haritası ve sahip olduğu mevcut kanal sayısı verilmektedir. Ardından, Global Ortalama Havuzlama (Global Average Pooling) kullanılarak, her kanal tek bir sayısal değere dönüştürülmektedir (sıkma işlemi). Daha sonra uyarma işlemi, parametrelere göre her özellik kanalı için ağırlıklar oluşturmak için kullanılmaktadır. Parametreler, özellik kanalları arasındaki korelasyonu açıkça modellemek için

öğrenilmektedir. Modelin karmaşıklığını sınırlamak ve genelleştirmeyi kolaylaştırmak için ve kanallar arasındaki korelasyonları modellemek için bir darboğaz yapısı oluşturmak üzere iki tam bağlı katman (FC katmanı) kullanılmaktadır. Birinci FC katmanı özellik boyutunu küçültmek için kullanılır ve ilk FC'den sonra ikinci FC katmanında tekrar orijinal boyutuna yükseltilir. Doğrudan bir FC katmanı kullanmakla karşılaştırıldığında, bu yapı, kanallar arasındaki karmaşık korelasyona daha iyi uyum sağlayabilen daha fazla doğrusal olmayan özelliğe sahiptir. Ayrıca parametre ve hesaplama miktarını da azaltabilmektedir. Daha sonra, 0 ile 1 arasında normalize edilmiş ağırlıkları elde etmek için sigmoid fonksiyonu kullanılmaktadır. Son olarak, normalleştirilmiş ağırlıkları her bir kanalın özelliklerine göre ağırlıklandırmak için bir ölçekleme işlemi gerçekleştirilmektedir [27]. SU bloğunun bu işlemleri neredeyse hiçbir ek işlem maliyeti gerektirmez. Sınıflandırma görevlerinde performans artırıcı özelliğinden dolayı herhangi bir modele kolay bir şekilde eklenebilmektedir.



Şekil 3. 2B Derinlemesine ayrılabilir evrişim.

3.4. Veri setleri

Önerilen yöntemin performansını test etmek için literatürden HyRank-Loukia (HL) [28] ve Houston (UH) 2013 [29] veri setleri kullanılmıştır. HL veri seti, Hyperion Earth Observing-1 sensörü kullanılarak toplanan HyRANK veri setindeki görüntüyü temsil eder. Bu veri seti, 400–2500 nm'lik bir spektral kapsama ve 30 m'lik bir uzamsal çözünürlüğe sahiptir. Görüntü, 249 x 945 piksel boyutunda 176 yüzey yansıtma bandı sağlar. 14 çeşit arazi örtüsü sınıfı ve 13.503 örnek içermektedir. Houston Üniversitesi (UH) veri seti, 2012'de 2.5 metre uzamsal çözünürlüğe sahip Kompakt Hava Spektrografik Görüntüleyici tarafından elde edilmiştir. Veri seti 349 x 1905 boyutunda 144 banttan oluşmaktadır. 15 çeşit arazi örtüsü sınıfı ve 15.029 örnek içermektedir. HL ve UH veri setleri hakkında detaylı bilgiler Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. HyRank-Loukia ve Houston verisetlerindeki her sınıfın örneklerine ilişkin bilgiler.

		HyRank-Loukia (HL)		Houston 2013 (UH)	
Renk	No	Sınıf Adı	Örnek Sayısı	Sınıf Adı	Örnek Sayısı
	1	Yoğun kentsel yapı	288	Sağlam çim	1251
	2	Mineral çıkarım sahaları	67	Yıpranmış çim	1254
	3	Sulanmayan ekilebilir arazi	542	Sentetik çim	697
	4	Meyve ağaçları	79	Ağaç	1244
	5	Zeytinlikler	1401	Toprak	1242
	6	Geniş yapraklı orman	223	Su	325
	7	İğne yapraklı orman	500	Konut	1268
	8	Karışık orman	1072	Ticari Yapı	1244
	9	Yoğun sklerofil bitki örtüsü	3793	Yol	1252
	10	Seyrek sklerofil bitki örtüsü	2803	Otoyol	1227
	11	Seyrek bitki örtüsü olan alanlar	404	Demiryolu	1235
	12	Kayalar ve kum	487	Otopark 1	1233
	13	Su	1393	Otopark 2	469
	14	Kıyı suyu	451	Tenis kortu	428
	15			Koşu parkuru	660
Toplam örnek sayısı			13503		15029

3.5. Önerilen yöntem (ÖY)

Bu çalışmada, hiperspektral görüntü sınıflandırması için hibrit ESA ve sıkma-uyarma (SU) bloğundan oluşan yeni bir model önerilmiştir. Önerilen modelde, Şekil 4'te de gösterildiği gibi Hibrid ESA, 3B ESA ve 2B DAE katmanlarından oluşmaktadır. Bu çalışmanın ilk amacı, hiperspektral görüntü sınıflandırma için uzamsal-spektral özelliklerin eş zamanlı olarak çıkarılmasını sağlamaktır. 2B ESA ile sadece uzamsal özellikler çıkarılır. Bununla birlikte, hiperspektral görüntüler 3 boyutlu olduğundan, spektral özellikler oldukça önemlidir. Uzamsal özellikler ile birlikte spektral özellikleri de çıkarmak için 3B ESA yöntemi kullanıldı. Çalışma kapsamındaki bir diğer amaç ise, hesaplama maliyetini düşürmektir. Hesaplama maliyetinin düşürülmesi ise eğitilebilir parametre sayısının azaltılmasıyla mümkündür. DAE katmanları, hesaplama maliyetini ve eğitilebilir parametre sayısını azaltmak için kullanıldı. Hibrit bir yöntem kullanılmasının nedeni ise, sadece 3B ESA'nın kullanımı hesaplama maliyetini arttırmaktadır. DAE katmanları ve hibrit yöntem kullanılması hesaplama maliyetini azaltmaktadır. Ayrıca, özellik çıkarma ve hiperspektral görüntü sınıflandırmasındaki performansı arttırmak için Hibrit ESA modeli bir SU bloğu ile birleştirilmiştir. SU bloğu, toplam parametre sayısını minimum düzeyde arttırırken sınıflandırma performansını arttırdıkları için önerilen yönteme entegre edilmiştir.

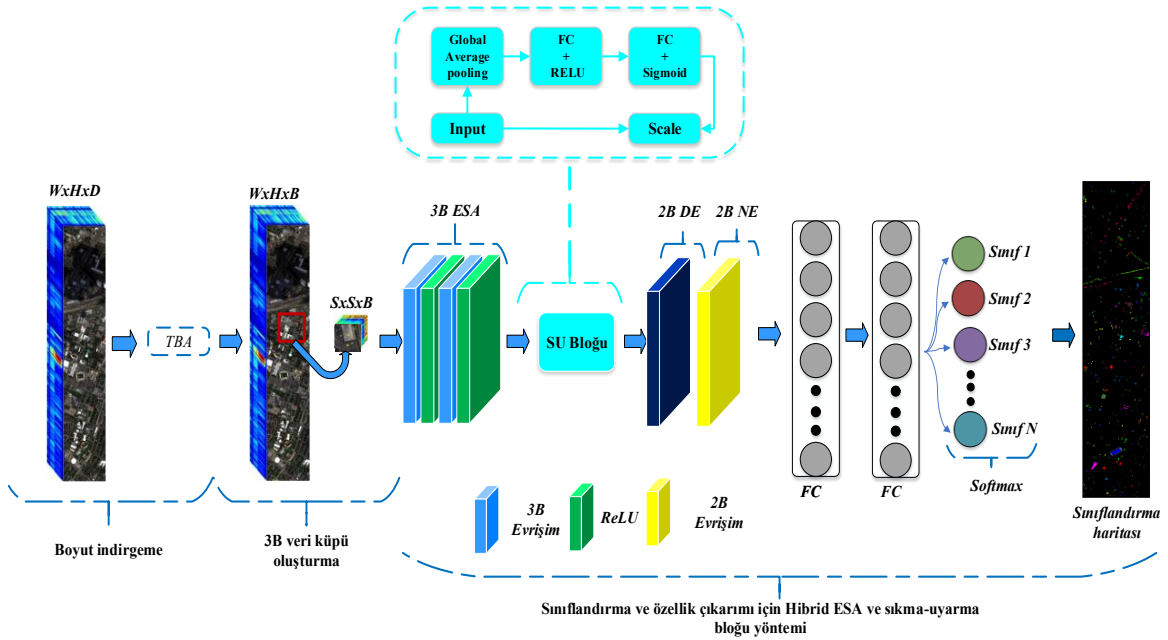
Hiperspektral görüntü, $W \times H \times D$ boyutunda bir 3B küp olarak belirtilmektedir. W ve H , görüntünün uzamsal genişliğini ve yüksekliğini ifade etmektedir. D , spektral bantların sayısını gösterir. Hiperspektral görüntü pikselleri, herhangi bir sınıflandırma modeli için kapsamlı çaba gerektiren sınıflar arası yüksek benzerlik, yüksek sınıf içi değişkenlik, örtüşen ve iç içe bölgeler sergiler. Bu sorunların üstesinden gelmek için spektral fazlalığı ortadan kaldırmak gerekir. Spektral bantlar boyunca geleneksel TBA, spektral fazlalığı ortadan kaldırmak için önce orijinal hiperspektral görüntüye uygulanır. TBA, aynı uzamsal boyutları (yani genişlik W ve yükseklik H) korurken spektral bant sayısını D 'den B 'ye azaltır. Bu şekilde, yalnızca spektral bantlar azaltıldı ve herhangi bir nesneyi tanımak için çok önemli olan uzamsal bilgiler korundu. TBA'dan sonra spektral bant fazlalığı azaltılıp, istenilen bant sayısına düşürülmüştür. TBA'dan sonra, hiperspektral veri küpü, görüntü sınıflandırma tekniklerini kullanmak için merkezi piksele dayalı gerçek etiketlerin üretildiği küçük örtüşen 3B uzamsal parçalara bölünmüştür. 3B parçalar, uzamsal konumda (a,b) merkezli ve $S \times S$ penceresini veya uzamsal boyutu ve tüm B spektral bantlarını kapsayan hiperspektral veri küpünden oluşturuldu. Oluşturulan 3B parçaların boyutu $S_x S_x B$ 'dir. Hiperspektral veri küpünden üretilen toplam 3B parça sayısı $(M-S+1) \times (N-S+1)$ ile bulunur.

Elde edilen 3B parçalara öncelikle ard arda 2 defa 3B evrişim uygulanmaktadır. Uygulanan 3B evrişimlerin filtre ve çekirdek boyutları şu şekildedir: Birinci 3B evrişimin çekirdek boyutu $3 \times 3 \times 3$ ve filtre sayısı 8'dir. İkinci 3B evrişimin çekirdek boyutu $1 \times 1 \times 1$ ve filtre sayısı 16'dır. Her bir 3B evrişimden sonra aktivasyon fonksiyonu olarak ReLU kullanılmaktadır. 3B evrişim işlemlerinden sonra 2B görüntü boyutunda yeniden boyutlandırma (reshape) işlemi yapılır. Elde edilen 2B görüntü öncelikle bir SU bloğundan geçirilir ve elde edilen çıktıya 2B DAE uygulanır. 2B DAE, DE ve NE katmanlarından oluşmaktadır. DE katmanı 3×3 çekirdek boyutuna ve NE katmanı 1×1 çekirdek boyutuna sahiptir. En son işlemekten sonra, çıkarılan öznitelikler düzleştirilir ve hiperspektral görüntü

sınıflandırma için tam bağlı (FC) katmanlara girdi olarak verilir. Önerilen hibrit yöntemde, 128 ve 256 nöronlu iki FC katmanı kullanır. Aşırı öğrenmeyi önlemek için her FC katmanından sonra 0.4 bırakma oranına sahip bir bırakma (dropout) katmanı uygulanır. FC katmanının çıktısı, sınıflandırma sonucunu oluşturmak için basit softmax sınıflandırıcıya verilir. HyRank-Loukia (HL) veri seti kullanılarak önerilen yöntem ile ilgili ayrıntılı bilgiler Tablo 2’de yer almaktadır. Tablo 2’ye bakıldığında, HL veri seti için önerilen yöntemdeki eğitilebilir parametre sayısının 1.409.855 olduğu görülmektedir.

Tablo 2. HL veri seti kullanılarak önerilen yöntem ile ilgili ayrıntılı bilgiler.

Katman	Çıktı	Parametre sayısı
Girdi	(11,11,20,1)	0
3B evrişim_1	(11,11,20,8)	224
3B evrişim_2	(11,11,20,16)	144
Yeniden boyutlandırma (reshape)	(11,11,320)	0
2B Global Ortalama havuzlama	320	0
FC	0	0
FC	1	1
tf.reshape	(1,1,1)	0
multiply	(11,11,320)	0
2B Derinlemesine evrişim	(9,9,640)	6400
2B evrişim (NE)	(9,9,64)	41024
Düzleştirme katmanı	(5184)	0
FC	256	1327360
Bırakma katmanı	256	0
FC	128	32896
Bırakma katmanı	128	0
Çıktı katmanı	14	1806
Toplam Eğitilebilir Parametre sayısı		1.409.855



Şekil 4. Hiperspektral görüntü sınıflandırması için önerilen yöntem.

4. Uygulamalar ve uygulama sonuçları

İki veri seti kullanılarak gerçekleştirilen uygulamalar python programlama dilinde yazılmıştır. Uygulamalarda Google Colab kullanılmıştır. Ayrıca donanım hızlandırıcı olarak Tensor işleme birimi kullanıldı. Tensör işleme birimleri, Colab'da python kodlarını çalıştırmak için 107.77 GB depolama ve 35 GB RAM sağlamaktadır. Tüm verisetleri için eğitim-test oranı %10-90 alınmıştır. Ayrıca, öğrenme oranı 0.001 olarak alınmış ve optimize edici olarak Adam kullanılmıştır. Eğitim süreci 256 batch size ve 100 epoch'ta gerçekleştirilmiştir. Her iki veri setinde elde edilen 3 boyutlu veri küpünün genişlik ve yüksekliği 11x11 (S=11) olarak alınmıştır. WxHxD boyutunda hiperspektral görüntüye TBA uygulandıktan sonra spektral bant sayısı azalır ve yeni oluşturulan görüntü WxHxB boyutunda olur. Uygulamalar kapsamında her iki veri seti için B=20 alınmıştır. Karşılaştırma için kullanılan tüm derin öğrenmeye dayalı yöntemlere girdi görüntü verileri olarak verilen 3B parça boyutları, her iki veri seti için 11x11x20'dir (SxSxB). Ortalama doğruluk (OD), Genel doğruluk (GD) ve Kappa (K) katsayısı değerlendirme metrikleri, önerilen yöntemin iki veri setindeki sınıflandırma doğruluğunu analiz etmek için kullanıldı. OD, sınıf bazlı sınıflandırma doğruluğuna göre hesaplanır. GD, doğru sınıflandırılmış örnek sayısının tüm test örneklerinin sayısına oranıyla belirlenir. K, tahmin sonucunda elde edilen sınıflandırma haritası ile yer gerçeği (ground truth) haritası arasındaki tutarlılığı değerlendirebilen istatistiksel bir metriktir.

Önerilen yöntem, S3EResBoF [1], HybridSN [12], FC3B ESA [13], FuSENet [14], DLEM [15], 3B ESA [30], 2B ESA [31] gibi son yıllarda üzerinde çalışılan 7 farklı derin öğrenmeye dayalı yöntemle karşılaştırılmıştır.

HL veri seti kullanılarak gerçekleştirilen uygulamalarda elde edilen GD, OD, K değerlendirme metrikleri ile her sınıfın sınıf bazlı sınıflandırma sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. Tablo 3 incelendiğinde, önerilen yöntem ile elde edilen GD, K ve OD sonuçları sırasıyla %90.86, %89.13 ve %84.39 olarak bulunmuştur. Diğer tüm yöntemler ile karşılaştırıldığında en yüksek sınıflandırma sonuçlarının önerilen yöntem ile elde edildiği görülmektedir. Önerilen yöntemle en yakın sınıflandırma sonuçları %84.83 GD, %81.92 K ve %77.91 OD ile DLEM yönteminde elde edilmiştir. En düşük sınıflandırma doğruluk değerleri ise, %73.55 GD, %68.18 K ve %55.28 OD ile FC3B ESA yönteminde elde edilmiştir. Sınıf bazlı sınıflandırma doğrulukları incelendiğinde, 3, 4, 6, 8, 9, 10 ve 11 nolu sınıflarda sırasıyla %89.96, %50.70, %53.73, %92.23, %88.87, %93.02 ve %88.15 ile en iyi sınıflandırma sonuçlarının önerilen yöntem ile elde edildiği görülmektedir. 1 nolu sınıf için %83.45 ile en iyi sınıflandırma sonucu S3EResBof yönteminde elde edilmiştir. 2 nolu sınıf için %100 ile DLEM, FuSENet ve S3EResBoF yöntemlerinde en iyi sınıflandırma sonuçları elde edilirken, 7 ve 12 nolu sınıflarda ise %88.31 ve %95.27 ile FuSENet'te en iyi sonuçlar bulunmuştur. 5 nolu sınıf için %97.07 ile DLEM yönteminde en iyi sonuç elde edilmiştir. 13 nolu sınıf için %100 ile ÖY, DLEM, HybridSN, FC3B ESA, 2B ESA yöntemleri ile en iyi sınıflandırma doğruluk sonucu elde edilirken, 14 nolu sınıf için yine %100 ile ÖY, DLEM, HybridSN, FC3B ESA, 3B ESA yöntemlerinde en iyi sınıflandırma doğruluk sonucu bulunmuştur. Tüm yöntemler için elde edilen sınıflandırma haritaları Şekil 5'te verilmiştir. Tüm yöntemlerin OD sonuçları dikkate alındığında en iyi OD sonucunun önerilen yöntem ile en kötü OD sonucunun ise FC3B ESA ile elde edildiği görülmüştür. OD sonuçlarından yola çıkarak, ground truth'a en yakın yöntemin, önerilen yöntem ile elde edilen sınıflandırma haritası olduğu söylenebilmektedir.

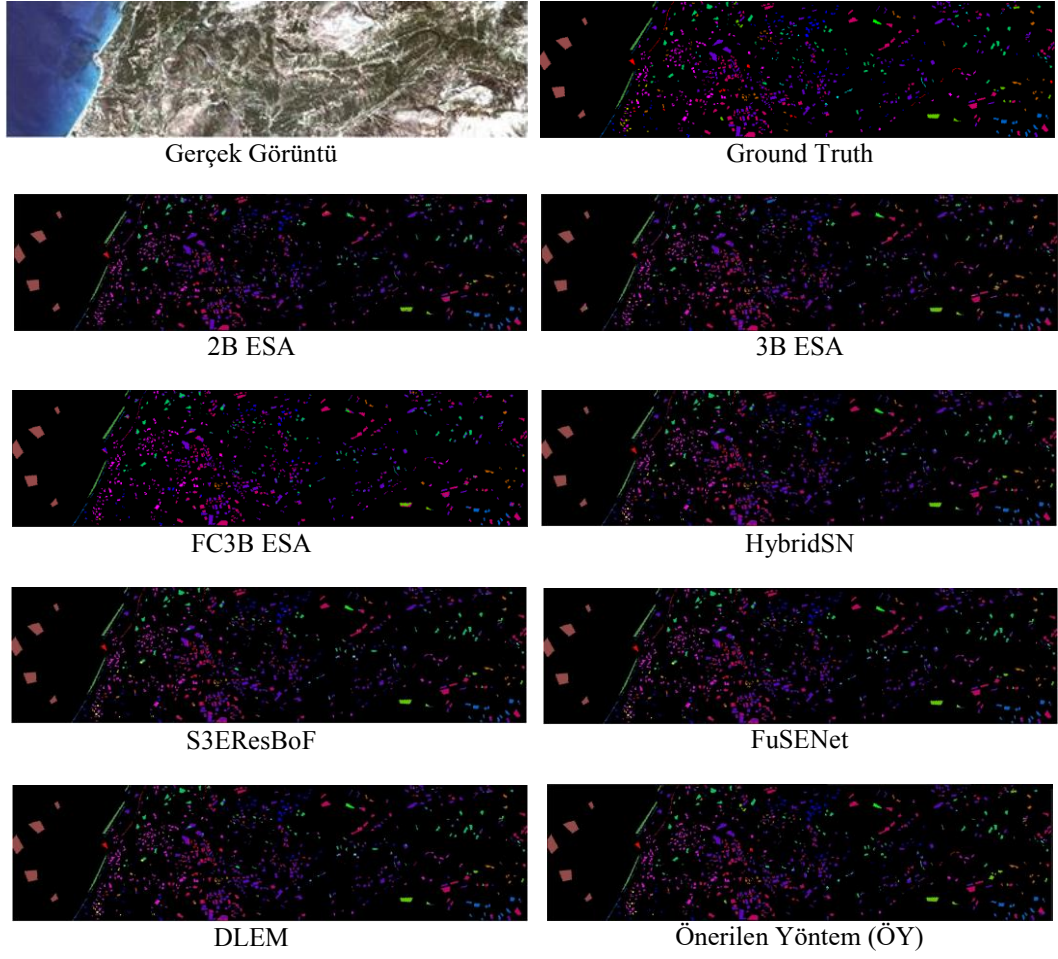
UH veri seti kullanılarak gerçekleştirilen uygulamalar sonucunda elde edilen sınıflandırma doğruluk değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Tablo 4 incelendiğinde, önerilen yöntem ile %99.39 GD, %99.34 K ve %99.42 OD değeri elde edilmiştir. Karşılaştırma için kullanılan diğer tüm yöntemler incelendiğinde tüm metriklerde en iyi sınıflandırma doğruluklarının önerilen yöntem ile elde edildiği görülmektedir. Önerilen yöntemle en yakın sınıflandırma doğruluk değerleri %98.10 GD, %97.95 K ve %98.25 OD ile DLEM yönteminde elde edilmiştir. Tüm yöntemler arasında en kötü sınıflandırma sonuçları ise %89.54 GD, %88.68 K ve %88.94 OD ile FC3B ESA yönteminde bulunmuştur. Sınıf bazlı sınıflandırma sonuçları incelendiğinde, 1, 11 ve 13 nolu sınıflarda %98.40, %99.73, %97.87 ile ÖY'de en iyi sınıflandırma doğruluk sonuçları elde edilmiştir. 2, 7, 8, 9 ve 12 nolu sınıflarda sırasıyla %100, %98.34, %99.79, %100 ve %99.81 ile FuSENet'te en iyi sonuçlar bulunmuştur. 3 nolu sınıfta %100 ile FuSENet ve ÖY, 4 nolu sınıfta %100 ile DLEM, 5 nolu sınıfta %100 ile ÖY, DLEM, FuSENet, S3EResBof, HybridSN, 6 nolu sınıfta %100 ile ÖY, DLEM, FuSENet, 10 sınıfta %100 ile ÖY, DLEM yöntemleri ile en iyi sınıflandırma doğruluk sonuçları elde edilmiştir. 14 nolu sınıf için DLEM, ÖY ve HybridSN yöntemleri ile %100 sınıflandırma doğruluğu elde edilirken, 15 nolu sınıf için %100 ile ÖY, DLEM, HybridSN ve 3B ESA yöntemlerinde en iyi sonuçlar bulunmuştur. Önerilen yöntem ile 1, 3, 5, 6, 10, 11, 13, 14 ve 15 nolu sınıflarda en iyi sınıflandırma doğruluğu elde edilirken, diğer sınıflarda da en iyi sınıflandırma sonucunun elde edildiği yöntemle oldukça yakın sonuçların elde edildiği görülmektedir. Tüm yöntemler için elde edilen sınıflandırma haritaları Şekil 6'da verilmiştir. Tüm yöntemlerin OD değerleri incelendiğinde en iyi değer önerilen yöntem ile elde edildiği görülmektedir. Bu değerden yola çıkarak, ground truth değerine en yakın sınıflandırma haritasının önerilen yöntem ile elde edildiği sonucu çıkarılabilmektedir.

Tablo 3. HL veri seti kullanılarak elde edilen sınıflandırma doğruluk değerleri (%).

No	Eğitim/Test	2B ESA	3B ESA	FC3B ESA	HybridSN	S3EResBoF	FuSENet	DLEM	ÖY
1	29/259	43.73	39.78	11.68	65.69	83.45	79.34	73.36	79.92
2	7/60	49.23	83.08	29.69	96.87	100.00	100.00	100.00	83.33
3	54/488	70.15	68.44	67.96	86.02	88.27	68.49	86.41	89.96
4	8/71	1.30	15.58	4.00	46.67	48.14	38.77	26.67	50.70
5	140/1261	88.96	92.42	88.13	89.63	77.46	82.82	97.07	96.83
6	22/201	7.87	29.63	4.24	28.77	46.90	73.27	29.72	53.73
7	50/450	45.36	59.59	46.31	64.42	83.62	88.31	62.74	70.44
8	107/965	57.88	54.90	67.39	78.09	72.71	65.06	84.38	92.23
9	379/3414	80.97	70.97	74.13	80.07	80.99	85.27	81.54	88.87
10	280/2523	72.89	80.21	77.81	79.76	64.15	77.58	84.30	93.02
11	41/363	50.00	52.04	32.29	66.14	77.78	48.09	69.79	88.15
12	49/438	80.93	85.38	70.41	94.17	90.54	95.27	94.82	94.29
13	139/1254	100.00	98.67	100.00	100.00	99.91	99.58	100.00	100.00
14	45/406	99.77	100.00	100.00	100.00	99.08	99.49	100.00	100.00
GD	1350	75.57	75.48	73.55	82.04	77.46	80.65	84.83	90.86
K	/	70.57	70.79	68.18	78.61	73.10	77.28	81.92	89.13
OD	12153	60.64	66.48	55.28	76.88	79.50	78.67	77.91	84.39

Tablo 4. UH veri seti kullanılarak elde edilen sınıflandırma doğruluk değerleri (%).

No	Eğitim/Test	2B ESA	3B ESA	FC3B ESA	HybridSN	S3EResBoF	FuSENet	DLEM	ÖY
1	125/1126	94.07	92.17	92.93	97.05	97.93	98.12	97.22	98.40
2	125/1129	99.59	98.44	97.73	99.92	99.24	100.00	99.92	99.91
3	70/627	95.41	99.26	95.62	99.70	99.66	100.00	99.70	100.00
4	124/1120	99.01	94.95	93.15	99.58	97.64	97.65	100.00	99.73
5	124/1118	99.67	99.75	99.58	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
6	33/292	86.98	85.08	85.44	99.68	99.63	100.00	100.00	100.00
7	127/1141	94.06	90.73	92.45	94.77	97.69	98.34	97.26	97.19
8	124/1120	90.14	73.24	90.27	97.46	99.48	99.79	96.70	99.20
9	125/1127	90.62	92.92	60.97	86.54	98.43	100.00	91.08	99.82
10	123/1104	93.36	94.45	91.25	99.40	98.87	93.09	100.00	100.00
11	123/1112	90.15	97.41	87.98	94.63	95.28	98.86	99.49	99.73
12	123/1110	94.23	96.32	90.35	96.16	97.68	99.81	97.61	99.55
13	47/422	54.06	66.15	58.52	93.50	95.42	89.93	94.84	97.87
14	43/385	69.40	92.05	99.26	100.00	86.99	95.00	100.00	100.00
15	66/594	97.81	100.00	98.56	100.00	99.46	93.91	100.00	100.00
GD	1502	92.54	92.58	89.54	96.91	97.89	98.00	98.10	99.39
K	/	91.92	91.97	88.68	96.66	97.72	97.83	97.95	99.34
OD	13527	89.90	91.52	88.94	97.23	97.55	97.63	98.25	99.42

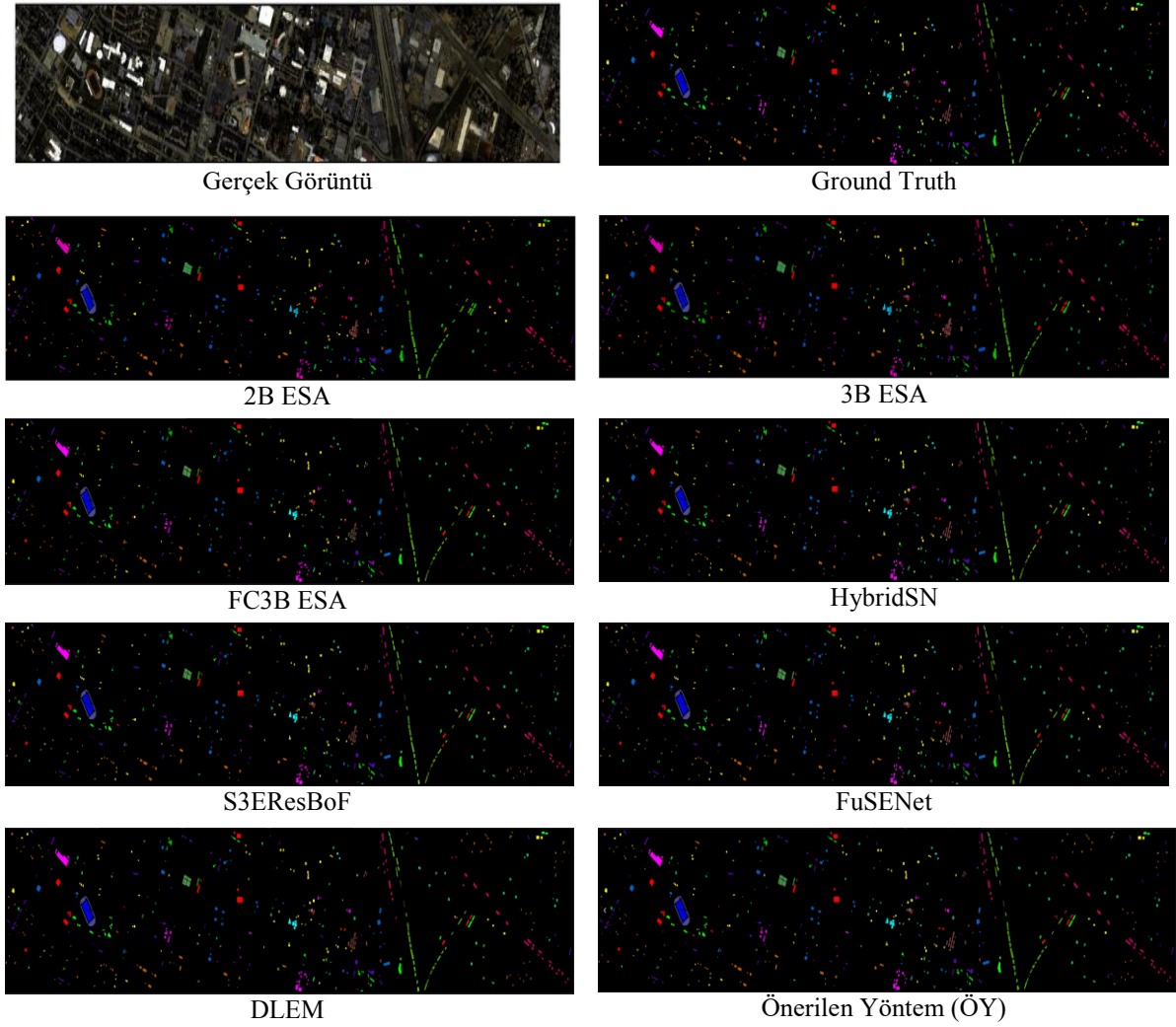


Şekil 5. HL veri seti kullanılarak elde edilen sınıflandırma haritaları.

5. Sonuçlar

Bu çalışma, hiperspektral görüntü sınıflandırması için yeni bir derin özellik çıkarma yöntemi geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu amaçla 3B ESA, Sıkma-uyarma bloğu ve 2B DAE'den oluşan bir yöntem önerilmiştir. 2B ESA ile sadece uzamsal özellik bilgileri çıkarılmaktadır. Hiperspektral görüntüler 3B olduğundan dolayı uzamsal özellik bilgilerinin yanısıra spektral özellik bilgilerinin de elde edilmesi sınıflandırma açısından oldukça önemlidir. Bu doğrultuda, 3B ESA, hem spektral hem de uzamsal özellikleri aynı anda çıkarmak için kullanıldı. Ancak, yalnızca 3B ESA kullanmak, hesaplama karmaşıklığını arttırmaktadır. 2B ESA ve 3B ESA kullanılarak elde edilen hibrit yöntemler ile hesaplama karmaşıklığının önüne geçilmekte ve eş zamanlı olarak daha fazla uzamsal özellik çıkarılmaktadır. Ancak bu çalışma kapsamında 2B ESA'daki 2B evrişim katmanları, 2B DAE katmanları ile değiştirilmiştir. DAE katmanlarının kullanımı ile eğitilebilir parametre sayısı azaltılmıştır. Eğitilebilir parametre sayısının azaltılması ile hesaplama maliyeti de düşürülmüştür. Son olarak, bu çalışmada öznetelik çıkarma ve hiperspektral görüntü sınıflandırmasındaki performansını arttırmak amacıyla geliştirilen Hibrit ESA yöntemine bir sıkma-uyarma bloğu eklenmiştir. Sıkma-uyarma bloğunun neredeyse hiçbir ek işlem maliyeti gerektirmez. Sınıflandırma görevlerinde performans artırıcı özelliğinden dolayı herhangi bir modele kolay bir şekilde eklenebilmektedir. Önerilen yöntemin sınıflandırma performansını analiz etmek için uygulamalarda HyRank-Loukia ve Houston 2013 veri setleri kullanılmıştır. Her iki veri seti ile gerçekleştirilen uygulamalarda %10 eğitim örneği alınmıştır. %10 eğitim örneğinin alınmasının nedeni, düşük eğitim örneğinde önerilen yöntemin performansını test etmektir. HyRank-Loukia veri seti ile gerçekleştirilen uygulamalar sonucunda %90.86 genel doğruluk, %89.13 kappa ve %84.39 ortalama doğruluk sonucu elde edilirken, Houston 2013 veri setinde önerilen yöntem ile %99.39 genel doğruluk, %99.34 kappa ve %99.42 ortalama doğruluk sonuçları elde edilmiştir. Ayrıca önerilen yöntem, literatürden alınan 2B ESA, 3B ESA, FC 3B ESA, HybridSN, S3EResBoF, FuSENet ve DLEM

yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. HyRank-Loukia ile gerçekleştirilen uygulamalarda önerilen yöntem dışındaki diğer yöntemler ile sırasıyla %75.57, %75.48, %73.55, %82.04, %77.46, %80.65 ve %84.83 genel doğruluk sonucu elde edilmiştir. Yine aynı veri seti kullanılarak önerilen yöntem dışındaki diğer yöntemler ile sırasıyla %70.57, %70.79, %68.18, %78.61, %73.10, %77.28, %81.92 kappa ve %60.64, %66.48, %55.28, %76.88, %79.50, %78.67, %77.91 ortalama doğruluk değerleri elde edilmiştir. Houston 2013 ile önerilen yöntem dışındaki diğer yöntemler ile sırasıyla %92.74, %92.58, %89.54, %96.91, %97.89, %98, %98.10 genel doğruluk, %91.92, %91.97, %88.68, %96.66, %97.72, %97.83, %97.95 kappa ve %89.90, %91.52, %88.94, %97.23, %97.55, %97.63, %98.25 ortalama doğruluk değerleri bulunmuştur. Önerilen yöntem, her iki veri setinde de tüm değerlendirme ölçümleri için karşılaştırılan yöntemlerden daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. Sınıflandırma sonuçları, önerilen yöntemin gerçek dünya uygulamalarında kullanılabilirliğini göstermektedir.



Şekil 6. UH veri seti kullanılarak elde edilen sınıflandırma haritaları.

Kaynaklar

- [1] Roy SK, Chatterjee S, Bhattacharyya S, Chaudhuri BB, and Platos J. Lightweight Spectral-Spatial Squeeze-and-Excitation Residual Bag-of-Features Learning for Hyperspectral Classification. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2020; 58(8): 5277–5290. doi: 10.1109/TGRS.2019.2961681
- [2] Wang A, Liu C, Xue D, Wu H, Zhang Y, and Liu M. Depthwise separable relation network for small sample hyperspectral image classification. *Symmetry (Basel)* 2021; 13(9):1673. doi: 10.3390/sym13091673.
- [3] Firat H and Hanbay D. Classification of hyperspectral images using 3D CNN based ResNet50. *SIU 2021 - 29th IEEE Conf. Signal Process. Commun. Appl. Proc.*, 2021:6–9. doi: 10.1109/SIU53274.2021.9477899.
- [4] Ahmad M, Mazzara M, and Distefano S. Regularized cnn feature hierarchy for hyperspectral image classification. *Remote Sens* 2021;13(12):1–11. doi: 10.3390/rs13122275.
- [5] Firat H, Asker ME, and Hanbay D. Classification of hyperspectral remote sensing images using different dimension reduction methods with 3D/2D CNN. *Remote Sens. Appl. Soc. Environ* 2022:100694. doi: 10.1016/j.rsase.2022.100694.
- [6] Mohan A and Meenakshi Sundaram V. V3O2: hybrid deep learning model for hyperspectral image classification using vanilla-3D and octave-2D convolution. *J. Real-Time Image Process* 2020:0123456789. doi: 10.1007/s11554-020-00966-z.
- [7] Wang Y, Yu W, and Fang Z. Multiple Kernel-based SVM classification of hyperspectral images by combining spectral, spatial, and semantic information. *Remote Sens* 2020;12(1). doi: 10.3390/RS12010120.
- [8] Li J, Bioucas-Dias JM, and Plaza A. Semisupervised hyperspectral image segmentation using multinomial logistic regression with active learning. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens* 2010:48(11):4085–4098. doi: 10.1109/TGRS.2010.2060550.
- [9] Ahmad M et al., Spatial prior fuzziness pool-based interactive classification of hyperspectral images. *Remote Sens* 2019;11(9):1–19. doi: 10.3390/rs11091136.
- [10] Firat H, Emin M, Mehmet IB, and HanbayD. Hybrid 3D / 2D Complete Inception Module and Convolutional Neural Network for Hyperspectral Remote Sensing Image Classification. *Neural Process. Lett* 2022:1–44. doi: 10.1007/s11063-022-10929-z.
- [11] Uzen H, Turkoglu M, and Hanbay D. Texture defect classification with multiple pooling and filter ensemble based on deep neural network. *Expert Syst. Appl* 2021;175:114838. doi: 10.1016/j.eswa.2021.114838.
- [12] Roy SK, Krishna, G Dubey SR, and Chaudhuri BB. HybridSN: Exploring 3D-2D CNN Feature Hierarchy for Hyperspectral Image Classification. *arXiv* 2019;17(2):277–281, 2019.
- [13] Ahmad M, Khan A, Mazzara M, Distefano S, Ali M, and Sarfraz MS. A Fast and Compact 3-D CNN for Hyperspectral Image Classification. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett* 2020:1–5. doi: 10.1109/LGRS.2020.3043710.
- [14] Roy SK, Dubey SR, Chatterjee S, and Chaudhuri BB, FuSENet: Fused squeeze-and-excitation network for spectral-spatial hyperspectral image classification. *IET Image Process* 2020; 14(8):1653–1661. doi: 10.1049/iet-ipr.2019.1462.
- [15] Iyer P, S. A, and Lal S. Deep learning ensemble method for classification of satellite hyperspectral images. *Remote Sens. Appl. Soc. Environ* 2021;23:100580. doi: 10.1016/j.rsase.2021.100580.
- [16] Yang X et al. Synergistic 2D/3D convolutional neural network for hyperspectral image classification. *Remote Sens* 2020; 12(12):1–19. doi: 10.3390/rs12122033.
- [17] Firat H, Asker ME, Bayindir Mİ, and Hanbay D. 3D residual spatial–spectral convolution network for hyperspectral remote sensing image classification. *Neural Comput. Appl* 2022;8. doi: 10.1007/s00521-022-07933-8.
- [18] Ari A Multipath feature fusion for hyperspectral image classification based on hybrid 3D/2D CNN and squeeze-excitation network. *Earth Sci. Informatics* 2023: 0123456789. doi: 10.1007/s12145-022-00929-x.
- [19] Ding Y et al. Multi-feature fusion: Graph neural network and CNN combining for hyperspectral image classification. *Neurocomputing* 2022; 501:246–257. doi: 10.1016/j.neucom.2022.06.031.
- [20] Hong D et al. SpectralFormer: Rethinking Hyperspectral Image Classification with Transformers. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens* 2022; 60. doi: 10.1109/TGRS.2021.3130716.
- [21] Ge Z, Cao G, Li X, and Fu P. Hyperspectral Image Classification Method Based on 2D-3D CNN and Multibranch Feature Fusion. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens* 2020;13:5776–5788. doi: 10.1109/JSTARS.2020.3024841.

- [22] Ghaderizadeh S, Abbasi-Moghadam D, Sharifi A, Zhao N, and Tariq A. Hyperspectral Image Classification Using a Hybrid 3D-2D Convolutional Neural Networks. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens* 2021; 14:7570–7588. doi: 10.1109/JSTARS.2021.3099118.
- [23] Türkoğlu M, Hanbay K, Sivrikaya IS, and Hanbay D. Derin Evrişimsel Sinir Ağı Kullanılarak Kayısı Hastalıklarının Sınıflandırılması. *BEÜ Fen Bilim. Derg* 2020;9(1):334–345.
- [24] Üzen H, Turkoglu M, Aslan M, and Hanbay D. Depth-wise Squeeze and Excitation Block-based Efficient-Unet model for surface defect detection. *Vis. Comput* 2022. doi: 10.1007/s00371-022-02442-0.
- [25] Fırat H, Asker ME, and Hanbay D. Hybrid 3D Convolution and 2D Depthwise Separable Convolution Neural Network for Hyperspectral Image Classification *Balk. J. Electr. Comput. Eng* 2022;10(1):35–46. doi: 10.17694/bajece.1039029.
- [26] Hu J, Shen L, and Sun G. Squeeze-and-Excitation Networks. *Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit* 2018; 7132–7141. doi: 10.1109/CVPR.2018.00745.
- [27] Li G, Zhang G, Lei R, Zhang X, Ye Z, and Li X. Hyperspectral remote sensing image classification using three-dimensional-squeeze-and-excitation-DenseNet (3D-SE-DenseNet). *Remote Sens. Lett* 2020; 11(2):195–203. doi: 10.1080/2150704X.2019.1697001.
- [28] Evaluation Q and Aeronautics N. HyRANK : THE NEW ISPRS HYPERSPECTRAL BENCHMARK. 2018.
- [29] 2013 IEEE GRSS Data Fusion Contest – Fusion of Hyperspectral and LiDAR Data. https://hyperspectral.ee.uh.edu/?page_id=459.
- [30] Ben Hamida A, Benoit A, Lambert P, and Ben Amar C. 3-D deep learning approach for remote sensing image classification. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens* 2018; 56(8):4420–4434. doi: 10.1109/TGRS.2018.2818945.
- [31] Makantasis K, Karantzalos K, Doulamis A, and Doulamis N. Deep supervised learning for hyperspectral data classification through convolutional neural networks. *Int. Geosci. Remote Sens. Symp* 2015; 4959–4962. doi: 10.1109/IGARSS.2015.7326945.

Bir Fazlı Z-Kaynaklı Düşürücü-Yükseltici Matris Çeviricinin MATLAB/Simulink Benzetimi

Selda Nur KÖK^{1*}, Hanifi GÜLDEMİR²

^{1,2} Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye
^{*1} ozdemirseldanur@gmail.com, ² hguldemir@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 25/01/2023;

Kabul/Accepted: 01/03/2023)

Öz: Bu çalışmada, kademeli olarak değişen bir çıkış frekansı yanında değişken bir çıkış gerilimi elde etmek için z-kaynak empedans ağı kullanan bir fazlı matris çevirici yapısı modellenip benzetimi yapılmıştır. Bu topoloji ile geleneksel matris çeviricilerin gerilim kazancı sınırlaması ortadan kaldırılarak, çıkış gerilimi ve frekansı yükseltilebilmekte veya düşürülebilmektedir. Matris çevirici, doğrudan AA-AA dönüşüm yaparken anahtarlama stratejisi ile çıkış frekansını kademeli olarak değiştirme imkânı da sağlar. Doğrudan tek aşamada çevirme özelliği sayesinde, geleneksel çeviricilerde kullanılan büyük bir DA bağlantı elemanına olan ihtiyaç ortadan kaldırılmış olup, çift yönlü anahtarlar aracılığı ile giriş doğrudan çıkış fazlarına bağlanarak enerji dönüşümü gerçekleştirilmektedir. Ara devre elemanı kullanılmadığından hem maliyet hem de boyut düşürülmüştür. Ayrıca çevirme işlemi yaparken anahtarlara ölü zaman eklenerek güvenli komütasyon stratejisi gerçekleştirilmektedir. Endüstrideki kademeli frekans ve gerilime ihtiyaç duyulan uygulamalarda, örneğin bir fazlı asenkron motorun hız değişiminin sağlanması, bu çevirici devresi kullanılabilir. Bir fazlı z-kaynaklı matris çevirici devresinin çalışma prensipleri incelenmiş devre MATLAB/Simulink ortamında hazırlanıp, değişik frekanslar ve çıkış gerilimi değerleri için devrenin benzetimi yapılmış ve elde edilen sonuçların bir kısmı paylaşılmıştır. Modellenen çeviricinin hem düşürme ve hem de yükseltme modunda farklı çıkış frekanslı gerilimler verdiği gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Z-Kaynak ağı, matris çevirici, çift yönlü anahtar, doğrudan AA-AA çevirici

MATLAB/Simulink Simulation of Single Phase Z-Source Buck-Boost Matrix Converter

Abstract: In this study, a single-phase matrix converter structure using a z-source impedance network is modeled and simulated to obtain a variable output voltage as well as a stepped varying output frequency. With this topology, the voltage gain limitation of traditional matrix converters can be overcome, and the output voltage and frequency can be increased or decreased. The matrix converter provides the opportunity to step change the output frequency with the switching strategy when performing direct AC-AC conversion. With this direct conversion feature, the need for a large DC link capacitor used in conventional converters has been eliminated, and energy conversion is performed by connecting the input directly to the output phases via bidirectional switches. Since DC link elements are not used, both cost and size are reduced. In addition, a safe commutation strategy is realized by adding dead time to the switches while performing the commutation operation. This converter circuit can be used in the industry where a stepped frequency change, for example for the speed change of a single phase induction motor, or variable voltage or both are required. The working principle of the single-phase z-source matrix converter circuit is examined. The circuit is modelled in MATLAB/Simulink environment and the converter is simulated for different frequencies and output voltage values, and some of the results are presented. It is observed that the modelled z-source matrix converter produces different frequency output voltage both in buck and boost mode.

Key words: Z-source network, matrix converter, bidirectional switch, direct AC-AC converter

1. Giriş

Endüstride kullanılan değişken hızlı sürücü sistemlerinde değişken genlik ve frekansta gerilim üreten kaynaklara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla sabit genlik ve frekansta bir kaynaktan değişik frekans ve genlikte bir gerilim elde etmek için güç elektroniği devreleri kullanılır. AA-AA güç dönüşümü için dolaylı AA-AA çeviriciler, doğrudan AA-AA çeviriciler ve matris çeviriciler popüler topolojilerdir.

Matris çeviriciler alternatif akımdan alternatif akıma doğrudan dönüşüm yapan bir çeviricidir. AA kaynağına doğrudan bağlanan AA-AA çeviricilerden olan matris çeviriciler, matris şeklinde düzenlenmiş çift yönlü anahtarlardan oluşur. Bu anahtarlar değişik anahtarlama teknikleri kullanılarak, çıkış ünitesine bağlanacak yükün cinsine ve gereksinimlerine cevap verecek değişik frekans ve genlikte gerilimler üretilmesini sağlamaktadır. Matris çeviricilerin klasik frekans çeviricilere göre üstünlükleri, sinüsoidal giriş akımı, denetlenebilir giriş güç katsayısı, en az düzeyde enerji depo eden eleman gerektirmesi ve iki yönlü enerji akışına imkân sağlamasıdır.

* Sorumlu yazar: ozdemirseldanur@gmail.com. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-8869-3811, ² 0000-0003-0491-8348

Matris çeviricinin ana dezavantajı, çıkış geriliminin giriş geriliminin % 86,6'sı ile sınırlı olması ve tek fazlı bacağıın her iki çift yönlü anahtarının aynı anda iletimde olmasının mümkün olmamasıdır. Bu sınırlamalar, matris çeviriciye z-kaynak ağı devresi eklenerek aşılabilmektedir.

Bu çalışma değişken genlik ve frekans çıkışı elde etmek için bir fazlı matris çevirici ile birlikte kullanılan bir fazlı z kaynak empedans ağı üzerine odaklanmıştır. Burada z-kaynak ağı kontrol edilerek değişken çıkış gerilimi elde edilebilmektedir [1]. Matris çeviricinin anahtarlama stratejisi ise çıkış frekansını düşürmek, sabit bırakmak veya yükseltmek için kullanılır [2].

Bir fazlı z-kaynaklı düşürücü-yükseltici matris çevirici (TFZMÇ), büyük bir DA bağlantı elemanına gerek duymadan doğrudan AA-AA dönüşümü yapar ve böylece daha kompakt bir yapıya sahip olurken maliyet de düşürülmüş olur. Bu çalışmada TFMÇ için bir snubber devresi olmadan matris çeviricinin anahtarlarına ölü zaman eklenerek güvenli komütasyon stratejisi uygulanmıştır [3-7].

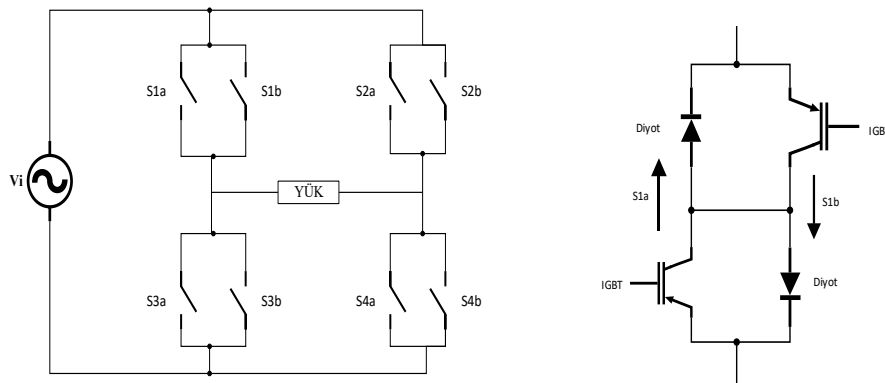
TFMÇ, endüstride kullanılan değişken hızlı sürücü sistemlerinde değişken genlik ve frekansta gerilim üreten kaynaklara ihtiyaç duyulan noktada tek aşamada gerçekleştirdiği çevirme özelliği ile çözüm sunmaktadır. İndüksiyon motor sürücüleri, radyo frekanslı indüksiyon ısıtma, ses güç amplifikasyonu ve kompanzasyon gerilimini düşürmek veya yükseltmek TFMÇ'nin kullanıldığı uygulama alanları arasındadır [8].

Bu çalışmada bir asenkron motor TFMÇ tarafından beslenmektedir. Fırçasız dc motorlar, kalıcı mıknatıslı senkron motorlar gibi daha üstün motorlar çıkmasına rağmen büyük üretim hacmi ve ayarlanabilir hız kontrolü göz önünde bulundurulduğunda bir fazlı asenkron motorlar üzerine yapılan araştırmalar devam etmektedir[9-12]. Önerilen topolojinin bir asenkron motor için tek aşamada gerilim ve hız kontrolünü gerçekleştirdiği bu çalışmada gösterilmiştir.

2. Bir Fazlı Matris Çevirici

Matris çeviriciler ara devre enerji depolama elemanı kullanmadan tüm dönüştürme işlemlerini farklı modülasyon algoritmaları ile tek bir adımda doğrudan gerçekleştirebilmektedir. AA-AA dönüşüm yapabilen bir fazlı matris çevirici, girişine uygulanan sabit değerli gerilim değerini çıkışında istenilen gerilim ve frekans değerine dönüştürebilir. Böylece doğrudan dönüştürme işlemi gerçekleştirebildiği gibi frekans değişiminin önemli olduğu uygulamalar için frekans değiştirici olarak kullanılabilir. Geleneksel çeviricilerde farklı devre tasarımları kullanılırken matris çeviricilerde bir devre yapısı kullanılır ve istenilen özellik gerekli anahtarlama algoritmaları ile sağlanır. Yüke gönderilecek yük miktarı yine bu algoritma ile belirlenir ve algoritma, yarı iletken anahtarlama elemanlarının tetikleme sinyalinin belirler.

Bir fazlı matris çevirici şekil 1'de görüldüğü gibi yapısında dört adet çift yönlü enerji akışı sağlayabilen anahtardan oluşur. Bu çift yönlü enerji akışı sağlayabilen anahtarlar, her iki yönde akımı iletebilir ve ters yöndeki gerilimi bloke edebilir. Ancak bu işlemi gerçekleştirebilecek yarıiletken eleman henüz olmadığından IGBT ile diyot birlikte kullanılarak çift yönlü enerji akışı gerçekleştiren yarıiletken eleman oluşturulur[5, 7].



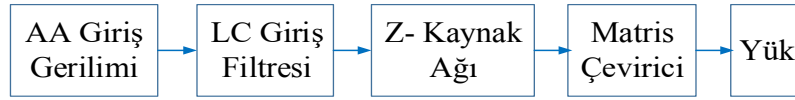
Şekil 1. Bir fazlı matris çevirici genel devre yapısı

Matris çeviricilerin çıkış gerilimi, giriş geriliminin %86,6'sı ile sınırlıdır. Matris çeviricinin bu dezavantajı yapısında z-kaynak empedans ağı kullanılarak aşılabilmektedir.

3. Bir Fazlı Z-Kaynaklı Matris Çevirici

Z kaynaklı matris çevirici, sabit giriş frekansını ve gerilimini çıkışta artırabilen veya azaltabilen bir çevirici türüdür. Matris çeviricilerin frekans artırma özelliği olmakla birlikte tek başına matris çevirici çıkış gerilimini istenilen seviyede değiştirebilme avantajı sağlamamaktadır. Z kaynaklı matris çevirici bu noktada bu yapının daha avantajlı durumda olmasını sağlamıştır. Z- kaynak empedansının gerilim seviyesini değiştirebilme özelliği ile matris çeviricinin frekans değiştirebilme özelliği birleştirilerek daha avantajlı bir topolojinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu sayede matris çeviricinin çıkış gerilimi giriş geriliminin % 86,6'sında sınırlı olma durumu ortadan kaldırılmıştır. Aynı zamanda giriş gerilimine ve frekansına bağlı kalmadan çıkışta istenilen farklı seviyelerde gerilim ve frekans değeri elde edilmiştir. Bir fazlı matris çeviricinin AA giriş gerilimi V_i , AA-AA z kaynak çevirici tarafından artırılır. Frekans ise matris çevirici tarafından ayarlanır.

Şekil 2'de, çevirici sistemin blok diyagramı verilmiştir. Z-kaynak matris çeviricinin giriş gerilimini bir fazlı AA kaynağı oluşturur. Çeviricide bir LC giriş filtresi, bir z-kaynak empedans ağı, çift yönlü anahtarlarla gerçekleştirilmiş matris çeviricide ve yük kullanılmıştır. LC giriş filtresi, anahtarlama dalgalanmalarını azaltmak için kullanılır. Z-kaynak empedans ağında kullanılan indüktans ve kapasitans değerleri küçük olduğu için filtreleme görevi yapmış olup, giriş akımından kaynaklanan dalgalanmaları azaltmak için kullanılır. İki adet indüktans ve kapasitansdan oluşan simetrik z-kaynak ağı, bir fazlı düşürücü-yükseltici matris çeviricinin enerji depolama ve filtre elemanı olup, ana devreyi güç kaynağına, yüke veya çeviriciye bağlamak için kullanılır. Sistemin gerilim değerinin düşürülmesi veya yükseltilmesi istenilen durumlarda z-kaynak empedans ağı kullanılarak gerilim aralığı genişletilir.

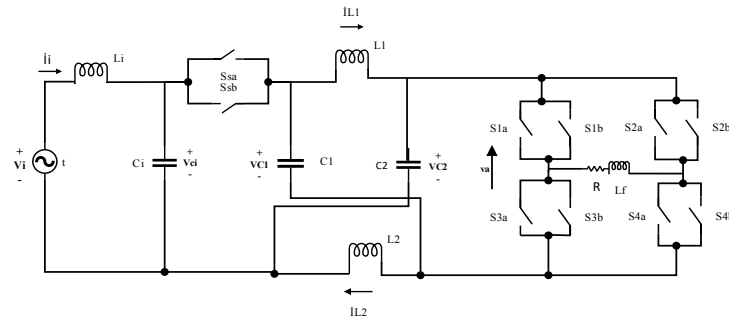


Şekil 2. Önerilen topolojinin blok diyagramı

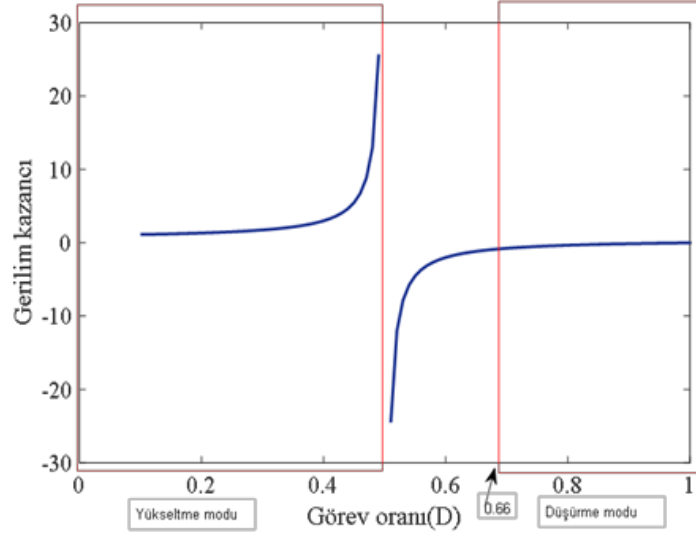
Z kaynak empedans ağı kullanılmadığında, tek başına Şekil 3' te verilen bir fazlı matris çeviricinin aynı faz bacağındaki anahtarları aynı anda iletimde olamaz aksi takdirde akım artışları anahtarları tahrip eder. Empedans ağı kullanıldığında ise bu durum ortadan kalkar. Z kaynak empedans ağı matris çeviricilerin aynı faz bacağındaki anahtarlarının aynı anda iletimde olmasını sağlar. Bu duruma shoot-through denir. Geleneksel çeviricilerde bu durum yoktur. Geleneksel çeviriciler iki aktif durum ve iki sıfır durum olmak üzere dört anahtarlama durumuna sahiptir. Mevcut olan anahtarlama durumlarına ek olarak shoot-through durumu, bir faz bacağının veya iki faz bacağının aynı anda açılıp çıkış terminallerinin kısa devre yapılmasıyla elde edilir. Böylece matris çeviricinin anahtarlama durumlarına ek bir anahtarlama durumu eklenmiş olur. Bu durum matris çeviriciye düşürücü-yükseltici özelliği sağlar. Geleneksel çeviricilerde bu özellik kullanılamaz kısa devreye sebep olur ve cihazları tahrip eder [3].

Çıkış gerilimi genliğinin ayarlanması D görev oranı tarafından gerçekleştirilir. Görev oranında kalma süresine bağlı olarak shoot-through süresi ayarlanırken shoot-through durumunda kalma süresine bağlı olarak da çıkış gerilimi düşürülebilir veya yükseltilebilir. Çıkış gerilimi frekansının düşürülmesi veya yükseltilmesi ise anahtarlama stratejisine bağlı olarak ayarlanır [3, 7].

Şekil 4'de görev oranı eğrisi verilen bir fazlı z kaynaklı düşürücü- yükseltici matris çevirici iki çalışma bölgesine sahiptir. $D < 0,5$ olduğunda z- kaynaklı matris çevirici yükseltici modunda çalışır. $D > 0,66$ olduğunda ise z kaynaklı matris çevirici düşürücü modunda çalışır. Bu çalışmada z kaynak empedans ağının gerilim değerini değiştirmek için basit yükseltme darbe genişlik modülasyonu Ssa ve Ssb anahtarlarına uygulanmıştır.



Şekil 3. Bir fazlı z-kaynaklı matris çevirici devresi



Şekil 4. Görev Oranı Eğrisi

Matris çeviricinin 25 Hz ve 100 Hz çıkış frekansı için dört farklı çalışma modu vardır. Aktif çalışma durumunda, giriş beslemesinin pozitif döngüsü sırasında A anahtarları açık durumda, giriş beslemesinin negatif döngüsü sırasında B anahtarları açık durumdadır. Sabit çıkış frekansı ise iki farklı çalışma modu gerçekleştirilir.

Matris çeviricilerde, geleneksel çeviricilerde olan anahtarlar iletimden çıktığında kullanılan serbest dönüş yolu bulunmamaktadır. Serbest dönüş yoluna ihtiyaç yük indüktif kullanıldığında ortaya çıkar. Serbest dönüş yolu sağlamak için snubber devresi kullanmadan SDGM anahtarlarına ölü zaman ekleyerek sürekli bir akım yolu kazandırılır. Bu yapıda, komütasyon için pozitif döngü sırasında üst anahtarlar, negatif döngü sırasında alt anahtarlar kullanılır[2,7]. Güvenli komütasyon ile geliştirilmiş anahtarlama stratejisi ve farklı çalışma modları Tablo 1’de gösterilmiştir.

100 Hz çıkış frekansı için dört çalışma modunda güvenli komütasyonlu matris çeviricinin çift yönlü anahtarlarının kullanımı şekil 5’de gösterilmiştir. Şekil 5, yükseltme modunda durum 1’i gösterir. $S_{sa}, S_{1a}, S_{2b}, S_{4a}$ anahtarları tamamen açıktır. S_{2b} , komütasyon amacıyla açılır. S_{sa} ve S_{4a} sürekli akım akışı için açılır. S_{1b}, S_{3b} ve S_{4b} ölü zamanı tamamlayıcı olarak çalıştırılır. Durum 1’de, Şekil 5’de gösterildiği gibi, S_{4b} açılır ve giriş geriliminin artan pozitif döngüsü sırasında akım akışını sağlar. S_{sb} ve S_{1b} yükten kaynağa negatif akım akışını açar ve iletir; S_{2b} , komütasyon amacıyla açılır. Devamında S_{sb} ve S_{4b} kapanır ve S_{3b} henüz açılmamıştır ve meydana gelen iki komütasyon durumu vardır:

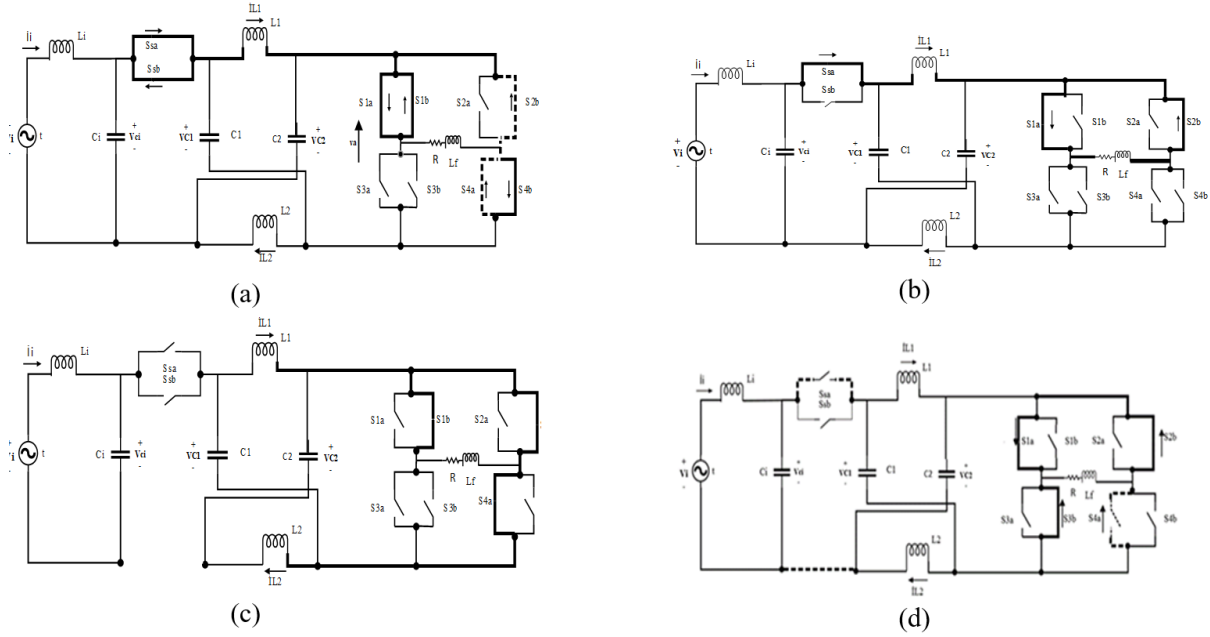
- $I_{L1} + I_{L2} + I_0 > 0$ ise akım, şekil 6 (b)’de gösterildiği gibi S_{sa} yolu boyunca akar.
- $-I_{L1} - I_{L2} + I_0 > 0$ ise akım, şekil 6 (c)’de gösterildiği gibi S_{2b} ve S_{4a} ’ dan bir yol boyunca iletir.

Şekil 6 (c)’de gösterildiği gibi, S_{2b} ’den geçen akımın yolu $-I_{L1} - I_{L2} + I_0$ ’dır. S_{2b} anahtarının iletken olması gerektiğinden, bu durum için ise mevcut koşul $-I_{L1} - I_{L2} + I_0 > 0$ ’dır. Durum 2’de, Şekil 5 (d)’de gösterildiği gibi, S_{3b} açılır ve z-kaynak ağındaki akım akışını bir geçiş yolu olarak iletir. Pozitif yük akımı S_{2b} ve S_{1a} üzerinden serbest bırakılabilir; negatif yük akımı S_{3b} ve S_{4a} üzerinden serbest bırakılabilir [7].

Bu anahtarlama modellerinde, akım yönü ne olursa olsun akım yolu her zaman sürekli. Böylece anahtarlama ve komütasyon işlemleri sırasında gerilim yükselmeleri ortadan kalkar. Durum 2, 3 ve 4 için anahtarlama şekilleri, durum 1 ile benzerdir. Şekil 5’deki noktalı çizgi, her belirli aşama sırasında güvenli komütasyon anahtarını gösterir. 50 ve 25 Hz’lik diğer çıkış frekanslarındaki işlemler, anahtarlama stratejileri değiştirilerek gerçekleştirilir. 50 Hz’lik bir çıkış frekansı için işlem, durum 2 ve durum 3’ün atlanması ve durum 1 ve durum 4 için zaman aralıklarının iki katına çıkarılmasıyla gerçekleştirilir. Benzer şekilde, 25 Hz’lik bir çıkış frekansı için işlem, durum 2 ve durum 3’ün değiştirilmesiyle gerçekleştirilir.

Tablo 1. Yükseltme modu için anahtarlama durumları

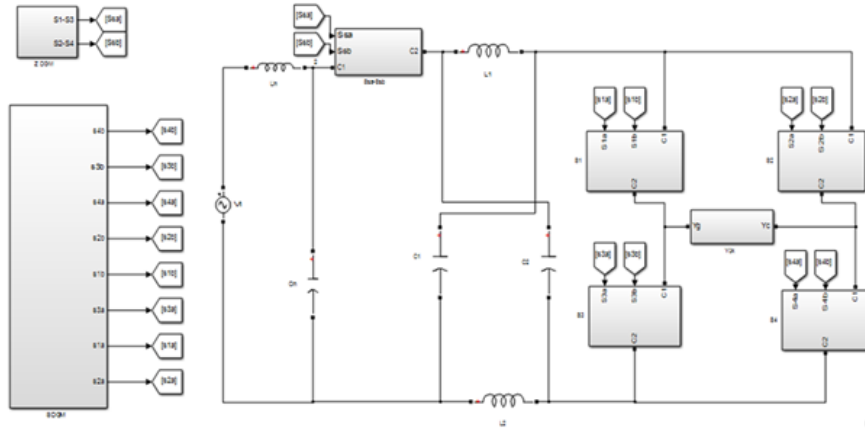
F_i	F_0	Durum	Anahtar açık durumda				
			Durum 1		Durum 2		
			Aktif	Komütasyon	Shoot-Through	Serbest dolaşım yolu	Komütasyon
50 Hz	100 Hz	1	$S_{Sa}, S_{1a}, S_{4b}, S_{Sb}, S_{1b}$	S_{2b}, S_{4a}	S_{1a}, S_{3b}	(S_{1a}, S_{2b}) veya (S_{3b}, S_{4a})	S_{Sa}, S_{4a}
		2	$S_{Sa}, S_{2a}, S_{3b}, S_{Sb}, S_{2b}$	S_{1b}, S_{3a}	S_{2a}, S_{4b}	(S_{1b}, S_{2a}) veya (S_{3a}, S_{4b})	S_{Sa}, S_{3a}
		3	$S_{Sb}, S_{2b}, S_{3a}, S_{Sa}, S_{3b}$	S_{2a}, S_{4b}	S_{1a}, S_{3a}	(S_{3a}, S_{4b}) veya (S_{1b}, S_{2a})	S_{Sb}, S_{2a}
		4	$S_{Sb}, S_{1b}, S_{4a}, S_{Sa}, S_{4b}$	S_{1a}, S_{3b}	S_{2b}, S_{4a}	(S_{3b}, S_{4a}) veya (S_{1a}, S_{2b})	S_{Sb}, S_{1a}
	50 Hz	1	$S_{Sa}, S_{1a}, S_{4b}, S_{Sb}, S_{1b}$	S_{2b}, S_{4a}	S_{1a}, S_{3b}	(S_{1a}, S_{2b}) veya (S_{3b}, S_{4a})	S_{Sa}, S_{4a}
		2	$S_{Sb}, S_{1b}, S_{4a}, S_{Sa}, S_{4b}$	S_{1a}, S_{3b}	S_{2b}, S_{4a}	(S_{3b}, S_{4a}) veya (S_{1a}, S_{2b})	S_{Sb}, S_{1a}
	25 Hz	1	$S_{Sa}, S_{1a}, S_{4b}, S_{Sb}, S_{1b}$	S_{2b}, S_{4a}	S_{1a}, S_{3b}	(S_{1a}, S_{2b}) veya (S_{3b}, S_{4a})	S_{Sa}, S_{4a}
		2	$S_{Sb}, S_{2b}, S_{3a}, S_{Sa}, S_{3b}$	S_{2a}, S_{4b}	S_{1a}, S_{3a}	(S_{3a}, S_{4b}) veya (S_{1b}, S_{2a})	S_{Sb}, S_{2a}
		3	$S_{Sa}, S_{2a}, S_{3b}, S_{Sb}, S_{2b}$	S_{1b}, S_{3a}	S_{2a}, S_{4b}	(S_{1b}, S_{2a}) veya (S_{3a}, S_{4b})	S_{Sa}, S_{3a}
		4	$S_{Sb}, S_{1b}, S_{4a}, S_{Sa}, S_{4b}$	S_{1a}, S_{3b}	S_{2b}, S_{4a}	(S_{3b}, S_{4a}) veya (S_{1a}, S_{2b})	S_{Sb}, S_{1a}



Şekil 5. Durum1 100Hz yükseltme modu için (a) Durum 1, (b) $I_{L1} + I_{L2} + I_o > 0$ olduğunda komütasyon durumu, (c) $-I_{L1} - I_{L2} + I_o > 0$ olduğunda komütasyon durumu, (d) Durum

4. Benzetim Sonuçları

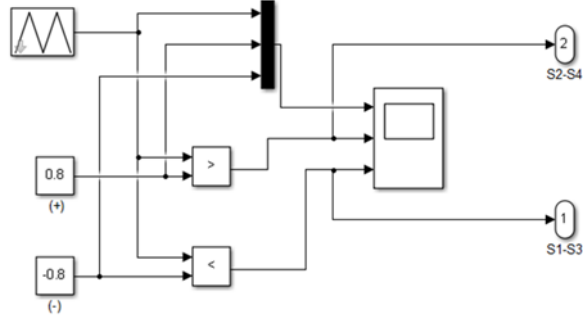
Bir fazlı z-kaynaklı düşürücü-yükseltici matris çeviricinin MATLAB/ Simulink ortamındaki genel devre yapısı şekil 6'da verilmiştir. Bu devrede, tek fazlı matris çevirici ve onu kontrol etmek için kullanılan SDGM, matris çeviricide kullanılan çift yönlü anahtarlar, z-kaynak empedans ağı ve onu kontrol etmek için BYDGM, z-kaynak empedans ağında enerji depolama ve filtre elemanı olarak kullanılan indüktans ve kapasitanslar, AA gerilim kaynağı, R veya RL yük ve LC giriş filtresi bulunur.



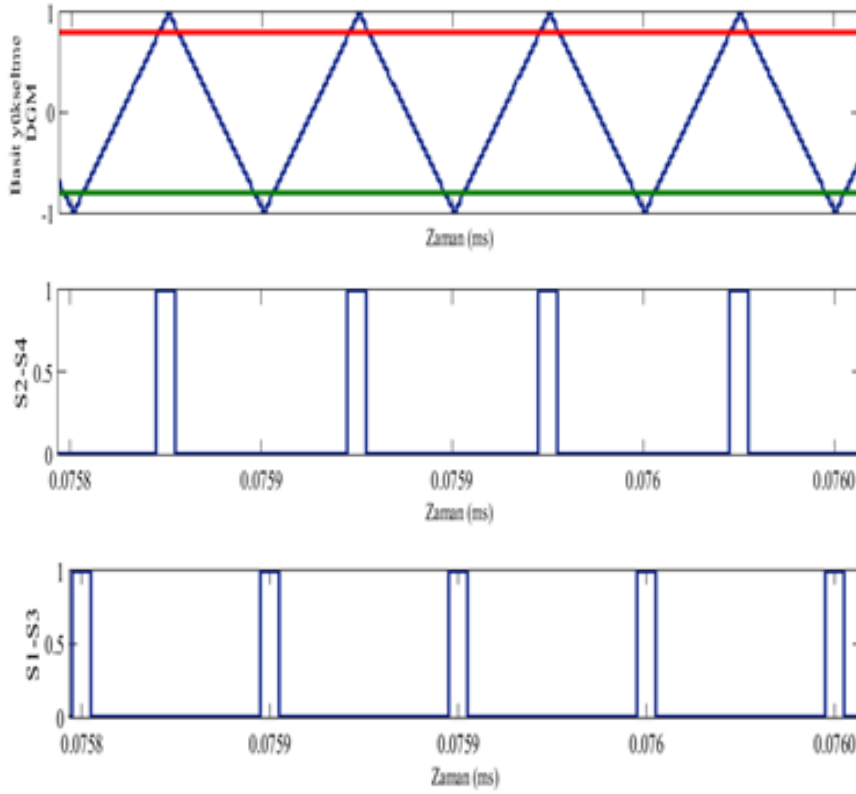
Şekil 6. Bir fazlı z kaynaklı düşürücü-yükseltici matris çevirici genel devre yapısı

Çıkış geriliminin istenilen seviyede değiştirilebilmesi için z empedans ağı basit yükseltme darbe genişlik modülasyonu ile kontrol edilmiştir. Bu yöntem, taşıyıcı sinyal ile karşılaştırılan üst hat ve alt hat referans sinyallerinden oluşur. Üst ve alt referans sinyalleri istenilen gerilim değerini elde etmek için bir geçiş periyodu oluşturur. Üçgen taşıyıcı dalga, üst hat sinyalinden büyük veya alt hat sinyalinden küçük olduğunda devre geçiş durumuna geçer. Aksi durumda ise geleneksel darbe genişlik yöntemi gibi çalışır.

Şekil 7’de BY-DGM’nin blok diyagramı verilmiştir. Burada üçgen bir referans dalga ile üst ve alt hat referans dalgaları karşılaştırılmıştır ve z empedans ağını kontrol edecek olan şekil 4,3’de gösterilen Ssa- ve Ssb anahtarlarına uygulanmıştır. Şekil 8 ise bu modülasyon tekniğinin çıkış dalga şekillerini göstermektedir.



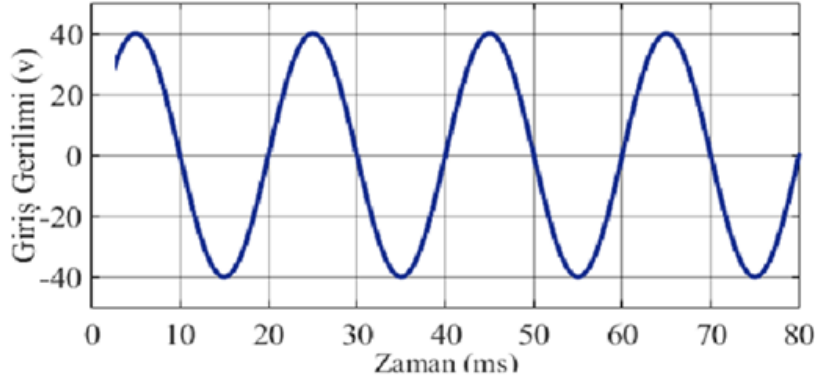
Şekil 7. BY-DGM Blok diyagramı



Şekil 8. BY-DGM dalga şekilleri

Tek fazlı matris çevirici ve üzerindeki AA gerilimi, AA-AA z empedans ağı tarafından artırılır. Ardından matris çevirici frekansı modüle eder.

Bu çalışmada matris çevirici sinüzoidal darbe genişlik modülasyonu (SGDM) ile kontrol edilmektedir. SGMD’nin farklı çalışma modları ile tek fazlı z-kaynaklı matris çeviricinin çıkış frekansı kontrol edilir. Z-kaynak empedans ağı ise basit yükseltme darbe genişlik modülasyonu (BY-DGM) ile kontrol edilir. BY-DGM’nin görev oranı değiştiğinde tek fazlı z-kaynaklı matris çeviricinin çıkış geriliminin genliği değişir. Şekil 9 çeviricinin giriş geriliminin olup, tüm çalışma boyunca 40 V seviyesinde tutulmuştur.

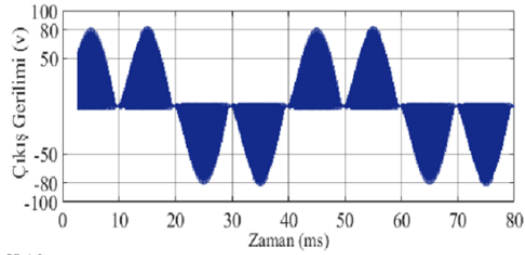


Şekil 9. Bir Fazlı Matris Çeviricinin Giriş Gerilimi

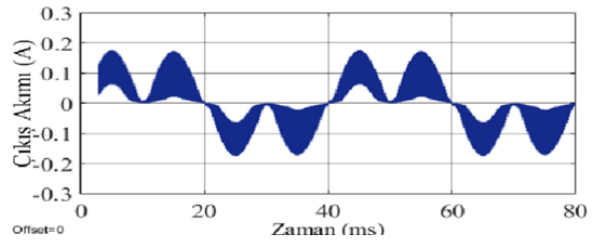
Farklı frekans seviyeleri için farklı gerilim değerleri şekil 8'de gösterildiği gibi elde edilmiştir. LC giriş filtresinin, z kaynak ağının ve yükün benzetim parametreleri $L_{in}=0,1\text{mH}$ ve $C_{in}=6,8\ \mu\text{F}$, $L_1=L_2=1\ \text{mH}$, $C_1=C_2=1\ \mu\text{F}$, $R=100\ \Omega$, $L_f=3\ \text{mH}$ olacak şekilde kullanılmıştır. Anahtarlama frekansı bu parametreler için 10 kHz olarak seçilmiştir.

RL yükünü besleyen çeviricinin çıkış geriliminde gerilim sıçramaları meydana gelmektedir. Oluşan gerilim sıçramalarının ortadan kaldırılabilmesi için SDGM içinde anahtarlara ölü zaman eklenerek, gerilim sıçramaları büyük ölçüde engellenmiş olur. Bu çalışma için ölü zaman $0,5\ \mu\text{s}$ seçilmiştir. Çevirici hem R yükünü beslerken hem de RL yükünü beslerken incelenmiş olup burada RL yükünü beslediği durumdaki sonuçlar verilmiştir.

Oluşturulan z-kaynak matris çevirici modeli hem yükseltici hem de düşürücü modda çalıştırılmıştır. Şekil 10-a, b, ve c' de çevirici yükseltici modda çalıştırılmış olup çıkış frekansları ise sırasıyla 25Hz, 50 Hz ve 100 Hz dir. 40 voltluk bir giriş gerilimi için ise yine sırasıyla 80V, 100 V ve 90 V çıkış gerilimi elde edilmiştir. Şekil 10-d' de ise çevirici düşürücü modda çalıştırılmış olup frekans değeri 25 Hz olup çıkış geriliminin değeri ise 18V olarak elde edilmiştir. Böylece modellenen çeviricinin farklı frekans değerlerinde hem düşürme hem de yükseltme modunda başarılı sonuçlar verdiği ortaya konulmuştur.

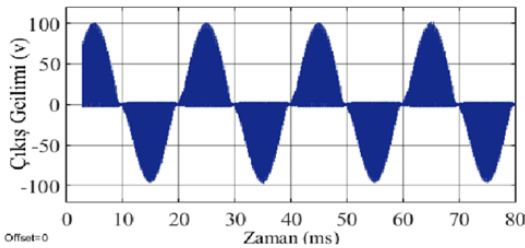


Offset=0

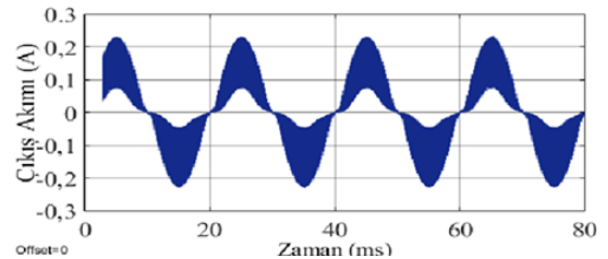


Offset=0

(a)

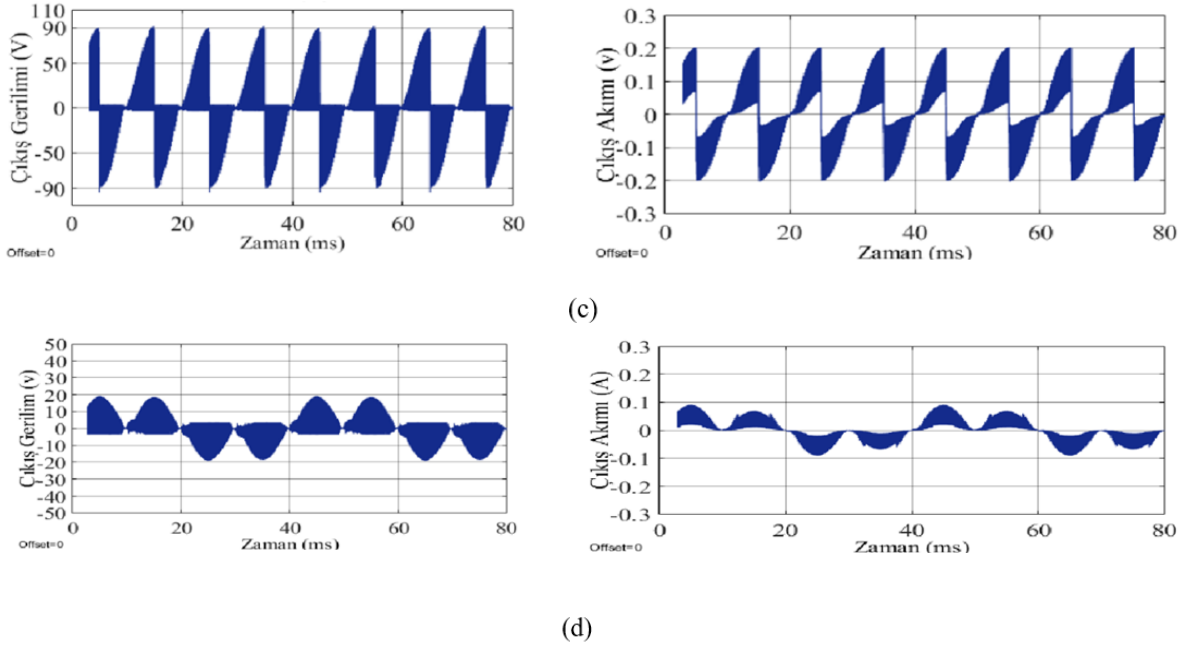


Offset=0



Offset=0

(b)



Şekil 10. Yükseltme ve düşürme modu için bir fazlı matris çeviricinin çıkış gerilimi ve çıkış akımı; (a) 25 Hz, (b) 50 Hz, (c) 100 Hz, (d) 25 Hz (düşürme modu).

5. Sonuçlar

Modellenen bir fazlı z-kaynaklı düşürücü-yükseltici matris çeviricinin daha önce açıklanan özelliklerini doğrulamak için MATLAB / Simulink ortamında benzetim sonuçları alınmıştır. Matris çeviricinin ara devre elemanı kullanmadan çevirme işlemi yapabilmesi buna bağlı olarak kayıpların daha az olması ve ara devre elemanı kullanmadığı için daha kompakt bir yapıya sahip olması, çift yönlü anahtarlar ile çift yönlü güç akışına izin vermesi, farklı frekans seviyelerinde çalışabilme gibi avantajlarının sonuçları benzetim çalışmasında elde edilmiştir. Bunun yanında çıkış geriliminin girişi geriliminin % 86.6'sı ile sınırlı kalma dezavantajı z-kaynak empedans ağı kullanılarak aşılmıştır. Matris çeviricinin frekans seviyesini değiştirebilme özelliği ile z-kaynak empedans ağının gerilim seviyesini değiştirebilme özelliği birleştirilmiş olup çeviriciye hem frekans seviyesi için hem de gerilim seviyesi için düşürücü yükseltici özellik kazandırılmış olmaktadır. Çevirici yapısında snubber devresi kullanılmadan anahtarlara ölü zaman eklenerek güvenli komütasyon stratejisi oluşturularak, RL yükü altında çalıştırıldığında gerilim piklerinin önüne geçilmesi sağlanmıştır. Matris çeviricinin çift yönlü anahtarları sayesinde çift yönde güç akışı gerçekleştirilebilmiştir. Bunun sonucunda anahtarlara sürekli bir akım yolu sağlanmıştır.

Fan, buzdolabı, karıştırıcı, öğütücü, klima gibi çeşitli uygulamalarda yaygın kullanılan bir fazlı asenkron motor uygulamalarının neredeyse %80'i frekansta kademeli olarak değişiklik gerektirir. Bu sebeple z-kaynaklı matris çevirici, frekansın kademeli bir şekilde değiştirilebildiği bir fazlı bir asenkron motor sürücüsü olarak kullanılabilir.

Kaynaklar

- [1] Peng, F. Z. (2003). Z-source inverter. IEEE Transactions on industry applications, 39(2), 504-510.
- [2] Pirinççi, N.. “ Tek Fazlı Matris Dönüştürücünün AA-AA Frekans Dönüştürücü ve AA-DA Doğrultucu Olarak Çalışmasının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ. (2016)
- [3] Fang, X., & Liu, J. (2012). Single-Phase Voltage-Fed Z-Source Matrix Converter. In Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems (Vol. 1, No. 2, pp. 46-52). Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems.
- [4] Lakshmi. C. R and Deepa Sankar . “Single Phase Z-Source Matrix Converter with Buck-Boost Capability” International Journal of Engineering Research and Technology” (2016) .

- [5] Nishanthi, S., & Kumar, N. S. (2012, March). Design and simulation of single phase z-source buck boost matrix converter. In 2012 International Conference on Computing, Electronics and Electrical Technologies (ICCEET) (pp. 186-192). IEEE
- [6] Fang, X., & Liu, J. Single-Phase Voltage-Fed Z-Source Matrix Converter. In Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems (Vol. 1, No. 2, pp. 46-52). Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems. (2012).
- [7] Minh-Khai Nguyen, Young-Gook Jung, Young-Cheol Lim and Young-Min Kim “A Single-Phase Z-Source Buck–Boost Matrix Converter” IEEE Transactions On Power Electronics, VOL. 25, NO. 2, February 2010.
- [8] Nguyen, M. K., Jung, Y. G., Lim, Y. C., & Kim, Y. M. (2009). A single-phase Z-source buck–boost matrix converter. IEEE Transactions on Power Electronics, 25(2), 453-462.
- [9] George, H. M., & Rajagopal, R. (2014). Direct AC-AC Z-Source Matrix Converter for Single Phase Induction Motor.
- [10] JBa-Thunya, A. S., Khopkar, R., Wei, K., & Toliyat, H. A. (2001, June). Single phase induction motor drives-a literature survey. In IEMDC 2001. IEEE International Electric Machines and Drives Conference (Cat. No. 01EX485) (pp. 911-916). IEEE.
- [11] Rajaei, A. H., Mohamadian, M., Dehghan, S. M., & Yazdian, A. (2010). Single-phase induction motor drive system using z-source inverter. IET Electric Power Applications, 4(1), 17-25.
- [12] Peng, F. Z., Joseph, A., Wang, J., Shen, M., Chen, L., Pan, Z., ... & Huang, Y. (2005). Z-source inverter for motor drives. IEEE transactions on power electronics, 20(4), 857-863.
- [13] Titus Sigamani, Ram Prakash Ponraj, Vijay Ravindran, “Modified Single Phase Matrix Converter with ZSource for Renewable Energy Systems” Proceedings of the Third International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT 2020) IEEE Xplore Part Number: CFP20P17-ART; ISBN: 978-1-7281-5821-1
- [14] Bakar, M. S., Rahim, N. A., Ghazali, K. H., & Hanafi, A. H. M. (2011, June). Z-source inverter pulse width modulation: A survey. In International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering 2011 (InECCE) (pp. 313-316). IEEE.

Farklı Yönlendirmeli Bina Dış Duvarlarında Faz Değiştiren Malzeme Kullanımının Isı Kazancına Etkisinin Araştırılması

Meral ÖZEL¹, Fethi Ahmet ÇAKMAK^{2*}

¹ Makine Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

² Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Soma MYO, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, Türkiye

¹ mozel@firat.edu.tr, ² fethi.cakmak@cbu.edu.tr

(Geliş/Received: 25/11/2022;

Kabul/Accepted: 21/03/2023)

Öz: Bu çalışmada, farklı yönlerde bina dış duvarlarında geleneksel ısı yalıtım malzemesi yerine faz değiştiren malzeme (FDM) kullanılarak soğutma yükleri ANSYS Fluent programı ile nümerik olarak araştırılmıştır. Analizler iki boyutlu ve zamana bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Elazığ ilinin yaz iklim şartları göz önünde bulundurularak bina dış yüzeyinin 24 saat boyunca değişen güneş ışınımı ve dış ortam sıcaklıklarına maruz bırakıldığı iç yüzeyinin ise sabit sıcaklıkta oda havasıyla temasta olduğu kabul edilmiştir. Bu amaçla 5 farklı duvar modeli belirlenerek ilk olarak duvar kalınlığı boyunca sıcaklık dağılımları ve soğutma yükleri hesaplanmış ve daha sonra ise ısı depolama kapasitelerini temsil eden faz kayması ve sönüm oranları tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar mevcut yalıtım ile kıyaslanmıştır. Sonuç olarak, duvara yalıtım yerine aynı kalınlıkta FDM uygulanarak tüm duvar yönlendirmeleri için dış sıcaklık dalgalanmaları sönümlenip iç yüzey yayılımının en aza indirilmesi sağlanmıştır. Ayrıca duvara FDM uygulanarak maksimum faz kayması ve minimum sönüm oranı açısından duvarın ısı depolama kapasitesinin de arttığı görülmüştür. Faz değiştiren malzemenin dışta kullanılmasının daha verimli olduğu görülmüş ve yalıtımsız duvara göre iç yüzeyde 20C daha düşük sıcaklık elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan UDF (User-defined function) kodu sayesinde her bir saatteki sıcaklık değerleri değişken sınır şartı olarak verilmiştir.

Anahtar kelimeler: Faz değiştiren malzeme, farklı duvar yönlendirmeleri, soğutma yükü, faz kayması ve sönüm oranı.

Investigation Of The Effect Of Using Phase Change Materials On Heat Gain At Building Walls With Different Orientations

Abstract: In this study, cooling loads were investigated numerically with ANSYS Fluent program by using phase change material (PCM) instead of traditional thermal insulation material on the exterior walls of buildings facing different directions. Analyzes were carried out in two dimensions and depending on time. Considering the summer climatic conditions of the Elazığ province, it is assumed that the building's outer surface of the building is exposed to changing solar radiation and outdoor temperatures for 24 hours, and the inner surface is in contact with the room air at a constant temperature. For this purpose, five different wall models were considered and firstly, the temperature distributions and cooling loads were calculated along the wall thickness, and then the time lag and decrement factor represented the thermal storage capacities were determined. The results obtained were compared with the existing insulation. As a result, by applying PCM of the same thickness to the wall instead of insulation, external temperature fluctuations for all wall orientations are reduced and its spread to the interior surface is minimized. In addition, it was observed that the heat storage capacity of the wall increased from the point of view of maximum time lag and minimum decrement factor by applying PCM to the wall. It has been seen that the use of phase change material on the outside is more efficient and 20C lower temperature is obtained on the inner surface compared to the non-insulated wall. Owing to the UDF (User-defined function) code used in the study, the temperature values in each hour are given as variable boundary conditions.

Key words: Phase change material (PCM), different wall orientations, cooling loads, time lag, decrement factor.

1. Giriş

Dünyadaki öncelikli enerji kaynaklarının hızlı bir şekilde tükenmesinden dolayı başta gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler olmak üzere bütün ülkeler enerjiye duyulan ihtiyacı kontrol altına almak ve enerjiyi daha verimli kullanmak için belirli yöntemler geliştirmektedir. Ülkemizde de bu enerji tüketimi başta sanayi olmak üzere konutlarda ve diğer alanlarda her yıl giderek artmaktadır. Özellikle konutlarda bu tüketim daha çok ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarını karşılamak içindir. Bu enerjinin daha verimli kullanılması için bina dış duvarlarına ısı yalıtımının uygulanması önemli bir parametredir.

* Sorumlu yazar: fethi.cakmak@cbu.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-9516-4715, ² 0000-0003-4575-5055

Binalarda ısı yalıtımı, kış aylarında soğuktan yaz aylarında ise sıcaktan korunmak için yapılmaktadır. Isı yalıtımı sayesinde yaz ve kış şartlarında ısı konforu sağlamak için tüketilen enerji azaltılmış olur. Bunun yanı sıra, ısınmak için fosil yakıt tüketiminden kaynaklanan emisyonları azaltıp hava kirliliğinin azalmasına da önemli rol oynamaktadır [1]. Bu çalışmada, ısı yalıtım malzemelerine alternatif olarak, termal enerji depolama özelliğinden dolayı faz değiştiren malzemeler kullanılmıştır. Faz değiştiren malzemeler termal enerjinin gizli ısı şeklinde depolandığı malzemelerdir. FDM'nin bina uygulamalarında kullanımına tuz hidratlarının bir binada kullanılması ile 1970 yılında başlanmıştır.

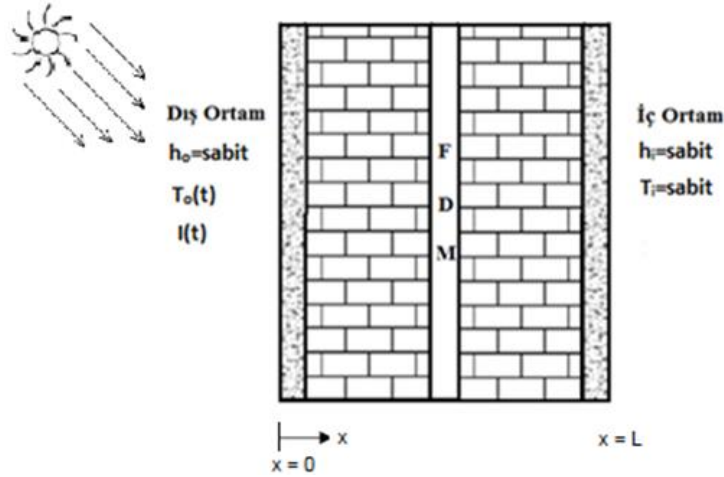
Literatür araştırması yapıldığında FDM'ler ile ilgili deneysel ve sayısal olmak üzere birçok farklı uygulamayla karşılaşmıştır. Bu konu ile ilgili olmak üzere yapılan çalışmalar incelendiğinde Sun vd.[2] pasif alan soğutması amacıyla faz değiştiren malzeme ile donatılmış duvarın analizlerini sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Bu çalışmalarında uygun yalıtım kalınlığı 7 mm olarak saptanmıştır. Ayrıca yalıtımın duvar dış yüzeyine yakın olduğu durumun ısı performans açısından daha makul olduğu görülmüştür. Kürklü vd. [3] serayı dondan korumak amacıyla erime ve donma sıcaklığı sırasıyla 8°C ve 4°C olan faz değiştiren malzemeler kullanılmıştır. Faz değiştiren malzeme kullanılmayan sera ile kıyaslandığında 2°C civarı sıcaklık farkı olduğu görülmüştür. Zhang vd. [4] ılıman iklimin etkisindeki bir bölgede bina duvarında faz değiştiren malzeme kullanılarak ısıtma yükündeki değişimleri sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. FDM'siz klasik duvara göre ısıtma süresinin %89 düşürüldüğü görülmüştür. Tian vd. [5] duvarda faz değiştiren malzeme kullanımının yalıtım performansına etkisini incelemek amacıyla bir deney seti kurmuşlardır. Bu deney seti ile aynı anda klasik duvar ile FDM'li duvar çeşitli hava şartlarına göre test edilmiştir. Deneysel sonuçlarda FDM'nin duvarın dış kısmında kullanılmasının daha uygun olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca iç yüzeyin maksimum sıcaklığının 0.2 °C daha düşük olduğu saptanmıştır. Çevik [6], Türkiye'nin güneydoğusunda duvar yapısının ısı verimini artırmak ve ısı yalıtım alternatifi oluşturmak amacıyla iki özdeş test odası inşa etmiştir. Test odalarından birinin duvarı FDM doldurulmuş polikarbonat malzeme ile kaplanmıştır. Deneysel sonuçlarda FDM ile kaplanan duvarın kaplanmayana göre daha iyi ısı yalıtım etkisi yaptığı görülmüştür. Tokuç [7], faz değiştiren malzemelerin ısı depolama amacıyla yeni nesil bina malzemesi olarak kullanımının enerji kazanımı sağlayacak bir yöntem geliştirmesini amaçlamıştır. Kullanılan yöntem ile elde edilen sonuçlarda FDM ile geliştirilen yapı bileşenlerinin binalarda kullanımına yardımcı olabilecek veriler tartışılmış ve sonraki çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

Örengül [8], yapıların FDM içeren tavanın ısı yalıtımına olan etkisini deneysel olarak araştırmıştır. Bu amaçla iki özdeş yapı inşa etmiştir. Yapıların birinin tavanı FDM doldurulmuş delikli tuğlayla örülmüştür. Sonuç olarak FDM kullanılan tavanın diğerine göre daha iyi bir günlük ısı yalıtımı sağladığı saptanmıştır. Konuklu [9], faz değiştiren malzemelerinin mikrokapsüllenecek enerji depolama özelliğinin binalarda sağlayacağı enerji tasarrufunu incelemiştir. Sonuçlar uygulamanın; kış şartlarında ısıtma için %10-15 arası ve yaz şartlarında soğutma için %5-10 arası verim sağladığını göstermiştir. Kurt [10], beton karışımlarında faz değiştiren malzeme kullanarak dayanımı bozmadan ısı performansını artırmayı amaçlamıştır. Bu amaçla faz değişim sıcaklığı 23-26 °C olan 110 J/g gizli ısıya sahip parafin kullanmıştır. FDM kullanılan betonun kullanılmayana göre daha yüksek bir ısı performansına sahip olduğunu göstermiştir. Quanying vd. [11], duvarlara farklı şekilde yerleştirilmiş faz değiştiren malzemelerin termal özelliklerini incelemek için parafin kullanmıştır. Faz değiştiren malzeme kullanılan duvar ile klasik beton duvar karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre doğrudan karıştırma yöntemine nazaran laminasyon enterpolasyon yöntemi ile hazırlanan duvardaki enerji tasarrufu daha iyi olmuştur. Bu yöntem ile hazırlanan faz değişim malzemesinin gizli ısı depolama kapasitesi ve daha belirgin enerji tasarrufu sağladığı görülmüştür. Laminasyon yönteminin karmaşık ve uygulanabilirliğinin zorluğu vurgulanmıştır. Hasana vd. [12], yalıtım olarak faz değiştiren malzeme kullanımını deneysel olarak incelemişler. Bu çalışma için standart ve FDM kullanılan iki ayrı oda inşa ederek faz değiştiren malzeme olarak 44°C erime sıcaklığına sahip olan parafin kullanmışlar. Çalışma sonucunda FDM kullanılan odanın standart odaya kıyasla enerji tasarrufu açısından daha avantajlı olduğu görülmüştür. Kandasamy vd. [13], taşınabilir elektronik cihazların termal yönetimi için bir FDM paketini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmayı çeşitli şartlar altında gerçekleştirip sayısal sonuçlarla karşılaştırdıklarında FDM tabanlı tasarımlar için uygulanabilir olduğunu önermişlerdir. Yukarıda görüldüğü gibi literatürde FDM kullanımıyla ilgili çalışmaların çoğunun deneysel olduğu ve enerjinin depolanarak ortamın ısıtılması amaçlandığı görülmektedir. Ortamın soğutma yükünün azaltılmasıyla ilgili olan çalışmalar daha sınırlıdır ve duvar yönleri dikkate alınmamıştır.

Bu çalışmada ise farklı yönlerde bakan bina dış duvarlarında, geleneksel ısı yalıtım malzemesi yerine FDM kullanımının etkisi yaz şartları göz önünde bulundurularak soğutma yüklerinin hesaplanması suretiyle incelenmiştir. Analizler güney, kuzey, doğu ve batı yönleri için ANSYS Fluent programı ile gerçekleştirilmiştir. Gerçek şartlara yakın bir analiz gerçekleştirmek için bina dış yüzeyinin gün boyunca değişen güneş ışınımı ve dış ortam sıcaklıklarına maruz kaldığı göz önünde bulundurulmuştur. Bu amaç için Elazığ ilinin yaz iklim şartları göz önünde bulundurularak ve 5 farklı duvar yapısı ele alınarak ilk olarak duvar kalınlığı boyunca sıcaklık dağılımları ve soğutma yükleri hesaplanmıştır. Sonrasında ısı depolama kapasitelerini temsil eden faz kayması ve sönüm oranları tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar mevcut yalıtım ile kıyaslanmıştır.

2. Matematiksel Metot

FDM içeren katmanlı duvarın Şekil 1’de gösterildiği gibi dış yüzeyi 24 saat boyunca değişen güneş ışınımı ve dış ortam sıcaklıklarının etkisinde olduğu ve iç yüzeyinin ise sabit sıcaklıktaki iç ortam havası ile temasta olduğu kabul edilmiştir. Duvar iç ve dış yüzeyde 2 cm kalınlığında sıva, 2 cm FDM ve 20 cm tuğla olmak üzere toplam 26 cm’dir. Tuğla ve sıva katmanları için fiziki özelliklerin sıcaklıkla değişmediği ve homojen olduğu kabul edilmiştir. Duvar katmanları arasındaki temas direnci dikkate alınmamıştır.



Şekil 1. FDM’ li çok katmanlı duvar yapısı

Ortamın ısı kazancını hesaplayabilmek için duvarın iç yüzey sıcaklığını bilmek gerekir. Katmanlı düzlem duvarlarda sıcaklık dağılımı aşağıda verilen geçici rejimde bir boyutlu ısı iletiminin uygun sınır şartları kullanılarak çözülmesi ile elde edilir. Yapı elemanının yüksekliği ve genişliği kalınlığına göre daha büyük olduğu için duvar boyunca ısı geçişinin x yönünde bir boyutlu olarak gerçekleştiği kabul edilmiştir.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

burada ısı yayılım katsayısı $\alpha=k/(\rho c_p)$ olup k duvar malzemesinin ısı iletkenliği, ρ yoğunluğu ve c_p ısı kapasitesidir. İç ve dış yüzeydeki sınır şartları ise aşağıdaki gibidir [14].

$x=L$ için

$$-k \frac{\partial T(L, t)}{\partial x} = h_i (T_{x=L} - T_i) \quad (2)$$

$x=0$ için

$$-k \frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = h_o (T_e - T_{x=0}) \quad (3)$$

burada T_e eşdeğer çevre sıcaklığı olup dış ortam sıcaklığı T_o , iç ortam sıcaklığı T_i , güneş ışınımı şiddeti I , duvarın güneş ışınımı emiciliği α ve dış yüzeyin taşınım katsayısı h_o ’a bağlı olarak dik duvar yüzeyleri için aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır. h_i ve h_o sırasıyla iç ve dış duvar yüzeylerindeki birleşik ısı transfer katsayılarıdır. Bu katsayılar, taşınım ve ışınım bileşenlerinin toplamı olup, 8 ve 23 W/m²K olarak alınmıştır [15].

$$T_e = T_o + \frac{\alpha_0 I}{h_o} \quad (4)$$

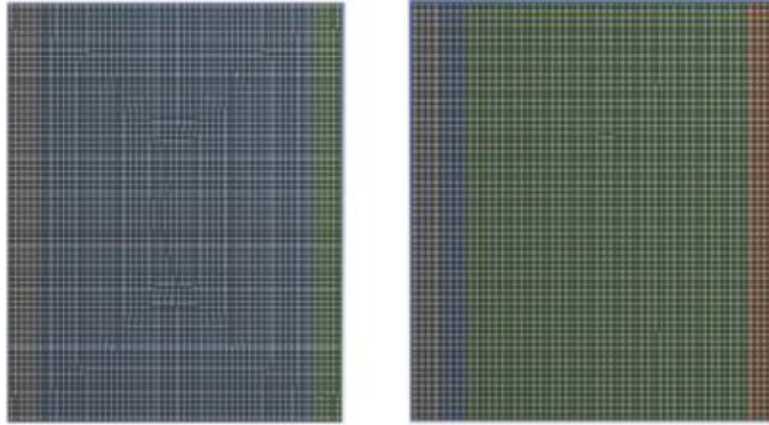
burada α_0 duvarın güneş ışınımı emiciliği olup 0.9 olarak alınmıştır. FDM 'nin katı-sıvı ara yüzeyi için aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır [16].

$$k_k \frac{\partial T_k}{\partial x} - k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} = \rho L \frac{\partial S_{(t)}}{\partial t} \quad (5)$$

2.1. Sayısal Yöntem

Bu çalışmada, farklı yönlere bakan bina dış duvarlarında geleneksel yalıtım malzemesi yerine FDM kullanımının etkisi yaz şartları göz önünde bulundurularak soğutma yükleri açısından sayısal olarak hesaplanmıştır. Analizler güney, kuzey, doğu ve batı yönleri için ANSYS Fluent programı ile gerçekleştirilmiştir. Program aşamaları aşağıda sıralanmıştır;

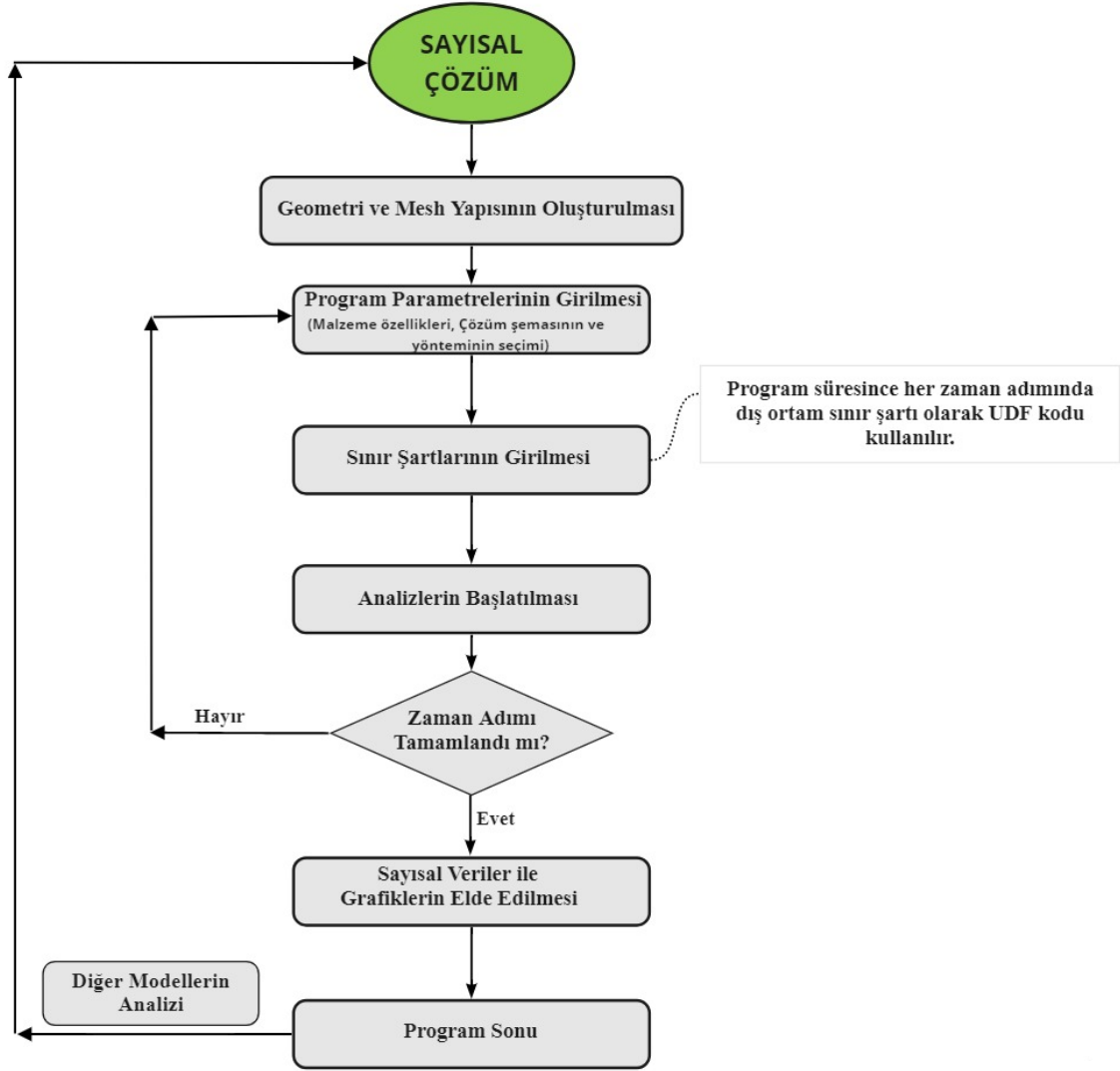
- *Geometri*: Bu aşamada yalıtımsız duvar ve FDM'nin içte, dışta, ortada olduğu duvar ile cam yünü ile ortadan yalıtılmış duvar modelleri için iki boyutlu beş farklı geometri çizilmiştir.
- *Ağ yapısı (mesh)*: ANSYS Fluent programında analizlerin düzgün yapılabilmesi için daha önce çizilen duvar modelleri üzerine ağ yapılarının atanması gerekmektedir. Analizlerin doğru bir şekilde yapılmasındaki en önemli parametrelerden birisi ağ yapısıdır. Bu çalışmada kare şeklinde ağ yapısı kullanılmıştır. Yalıtımsız duvar modelinde eleman sayısı 3808, düğüm sayısı ise 4067 olarak belirlenmiştir. FDM ve cam yünü ile yalıtılan duvar modellerinde ise eleman sayısı 3696, düğüm sayısı 4014 olarak belirlenmiştir. Yalıtımsız ve dıştan yalıtılmış duvar modellerine ait ağ yapıları Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Ağ yapıları (mesh) (a) Yalıtımsız duvar modeli (b) Yalıtımın dışta olduğu duvar modeli

- *Çözüm adımları*: Bu adımda daha önceden geometrileri oluşturulup ağ yapıları atanan modeller için malzeme özellikleri, sınır şartları, çözüm metodları, iterasyon sayıları ve yakınsama değerleri programa girilmektedir. Sistem başlangıç sıcaklık değeri 18 °C olarak belirlenmiştir. Yakınsama değeri continuity= 1e-03, x-y velocity = 1e-03 ve energy = 1e-06 olarak girilmiştir. İterasyon sayısı 1000 olup her 3600 saniyede bir tüm değerler kayıt altına alınmıştır.

Bina dış yüzeyi 24 saat boyunca değişen dış ortam sıcaklığı ve güneş ışınımına maruz kaldığı için 24 farklı eşdeğer sıcaklık hesaplanmıştır. Değişken sıcaklık şartı kullanıcı tanımlı bir fonksiyon yardımı ile programa girilmektedir. Bunun için User Defined Function (UDF) sekmesi kullanılmıştır. Sıcaklıkların değişken sınır şartı şeklinde kullanılması amacıyla bir C kodu oluşturulmuştur. Bu kod sayesinde her bir saatin sıcaklığı farklı olacak şekilde ardıl günlerde tekrarlı olacak şekilde yazılmıştır. Bu sayede üç günlük bir süreçte her bir saatin değeri kendi zamanı geldiğinde sınır şartı olarak otomatik uygulanmıştır. ANSYS Fluent' de gerçekleştirilen bu programın akış şeması Şekil 3'de görülmektedir.

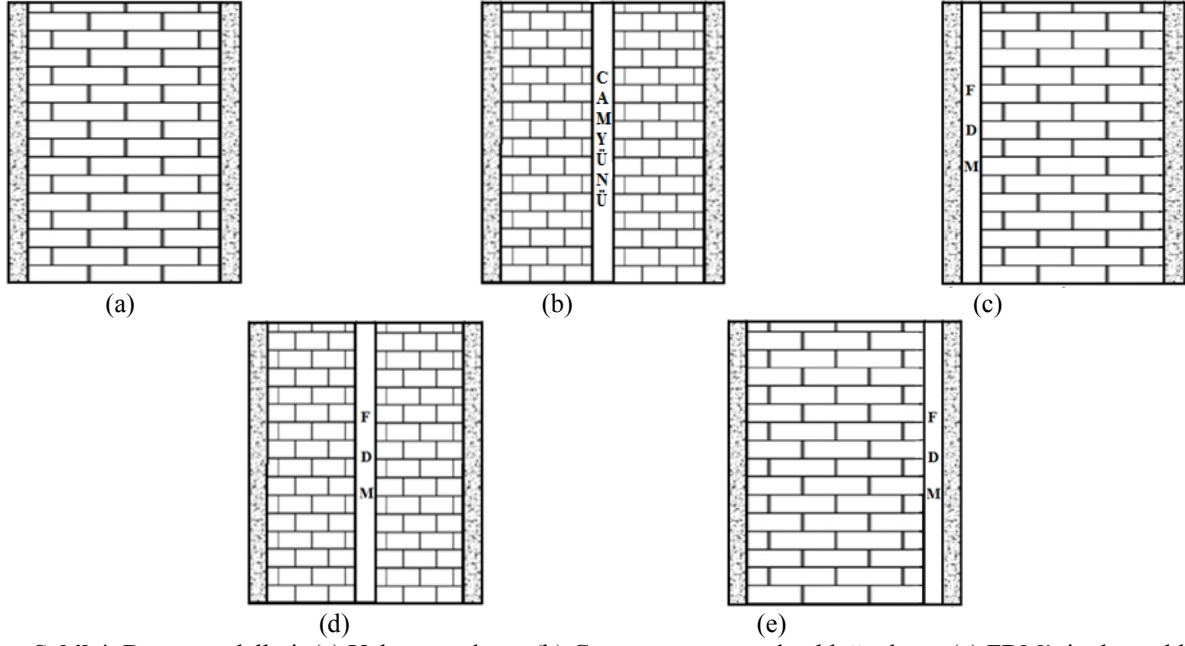


Şekil 3. ANSYS' de hazırlanan programın akış şeması

2.2. Duvar Modelleri

Bu çalışmanın ana amacı geleneksel ısı yalıtım malzemesi yerine FDM'nin kullanılması ve mevcut yalıtım ile kıyaslanmasıdır. Bu amaçla Şekil 4'de gösterilen 5 farklı duvar modeli belirlenmiş ve her bir duvar modeli için sıcaklık dağılımları ve ısı kazançları farklı duvar yönlendirmelerine göre hesaplanmıştır. Tüm duvar modellerinde duvar, iç ve dış yüzeyde 2 cm kalınlığında sıva, 2 cm FDM ve 20 cm tuğla olmak üzere toplam 26 cm'dir. Ayrıca cam yünü yalıtım malzemesinin kalınlığı da 2 cm olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada faz değiştiren malzeme olarak 28-30 oC aralığında erime özelliği olan parafin bazlı RT-27 seçilmiştir. FDM'nin erime katılma süresince gizli ısı özelliğini gösterebilmesi için uygun sıcaklık aralığında olması gerekir. Duvarın maruz kaldığı sıcaklıklar dikkate alındığında uygun erime sıcaklık değerinden dolayı Parafin bazlı RT-27 kullanılmıştır. Duvar yapısında kullanılan diğer malzemelerin ve seçilen FDM'nin termofiziksel özellikleri ise Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 4. Duvar modelleri: (a) Yalıtımsız duvar (b) Cam yününün ortada olduğu duvar (c) FDM'nin dışta olduğu duvar (d) FDM'nin ortada olduğu duvar (e) FDM'nin içte olduğu duvar

Tablo 1. Duvar yapısında kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri [17]

	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kgK)	k (W/mK)
Tuğla	1800	840	0.62
Sıva	1865	840	0.72
Cam yünü	105	795	0.036

Tablo 2. RT-27'nin termofiziksel özellikleri [18]

Erime aralığı	28 - 30 °C
Gizli Isı	179 kJ/kg
Katı haldeki ısı depolama kapasitesi	1800 J/kgK
Sıvı haldeki ısı depolama kapasitesi	2400 J/kgK
Katı haldeki termal iletkenliği	0.24 W/mK
Sıvı haldeki termal iletkenliği	0.15 W/mK
Katı haldeki sabit yoğunluğu	870 kg/m ³
Sıvı haldeki sabit yoğunluğu	760 kg/m ³
Sıvı haldeki dinamik viskozitesi	3.42x10 ⁻³ kg/ms

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Çevresel Şartlar

Bu çalışmada, yazın iç ortam sıcaklığının sabit 24°C, iç yüzey taşınım katsayısının ise yine sabit 8 W/m²K olduğu kabul edilmiştir. Dış ortamda ise taşınım katsayısı 23 W/m²K olarak kabul edilip dış ortam sıcaklığının ve güneş ışınımının gün boyunca değiştiği göz önünde bulundurularak 24 saat için eşdeğer çevre sıcaklığı belirlenmiştir. Bu sıcaklıklar güney, kuzey, doğu ve batı yönleri için sırasıyla Tablo 3-6'da gösterilmiştir.

Tablo 3. Yaz şartlarında güneye bakan duvarın eşdeğer çevre sıcaklıkları

t (saat)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T _e (°C)	24.28	22.90	22.20	20.80	20.63	22.46	27.63	31.21	37.36	42.49	46.52	48.40
t (saat)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
T _e (°C)	48.82	47.89	45.26	41.41	39.63	37.35	33.93	31.00	29.00	27.20	26.28	25.30

Tablo 4. Yaz şartlarında kuzeye bakan duvarın eşdeğer çevre sıcaklıkları

t (saat)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T _e (°C)	24.28	22.90	22.20	20.80	24.76	27.08	30.42	31.17	34.51	37.44	40.15	41.54
t (saat)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
T _e (°C)	42.45	42.84	42.41	41.37	41.42	41.98	38.06	31.00	29.00	27.20	26.23	25.30

Tablo 5. Yaz şartlarında doğuya bakan duvarın eşdeğer çevre sıcaklıkları

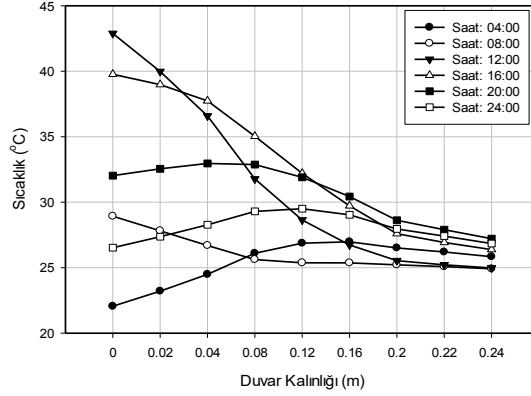
t (saat)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T _e (°C)	24.23	22.90	22.20	20.80	24.75	37.42	45.78	49.38	50.00	48.45	45.82	41.54
t (saat)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
T _e (°C)	42.45	42.84	42.41	41.37	39.63	37.36	33.93	31.00	29.00	27.20	26.22	25.30

Tablo 6. Yaz şartlarında batıya bakan duvarın eşdeğer çevre sıcaklıkları

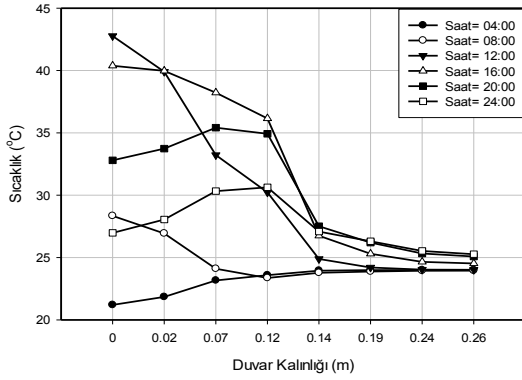
t (saat)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T _e (°C)	24.28	22.90	22.20	20.80	20.63	22.46	27.63	31.17	34.51	37.44	40.15	41.54
t (saat)	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
T _e (°C)	48.12	53.85	57.91	59.58	57.78	52.32	38.06	31.00	29.00	27.20	26.28	25.30

3.2. Duvar Kalınlığı Boyunca Sıcaklık Dağılımları

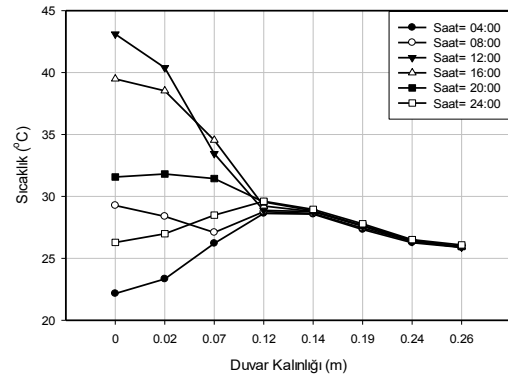
Bu çalışmada ilk önce güneye bakan duvar için sıcaklık dağılımları 5 farklı duvar yapısı göz önünde bulundurularak ayrı ayrı hesaplanmıştır. Şekil 5 yalıtımsız duvar modeli için duvar kalınlığı boyunca zamana bağlı sıcaklık değişimini göstermektedir. Şekil 6 (a – b) Cam yünü ve FDM' nin ortada olduğu duvar modelleri için sıcaklık dağılımını göstermektedir. FDM'nin içte ve dışta olduğu duvar modelleri için ise Şekil 7 (a – b)'de gösterilmiştir.



Şekil 5. Güneye bakan yalıtımsız duvar modeli için duvar kalınlığı boyunca zamana bağlı sıcaklık değişimi

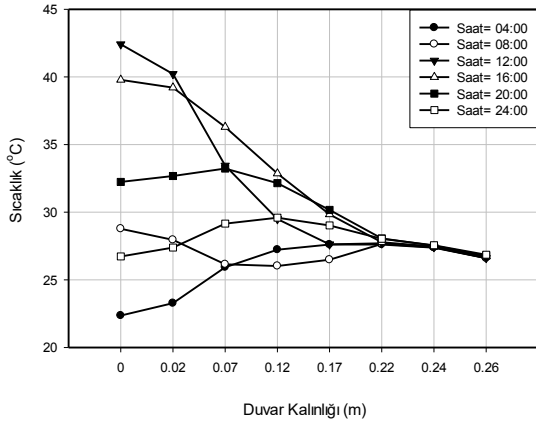


a) Cam yünü ile ortadan yalıtımlı

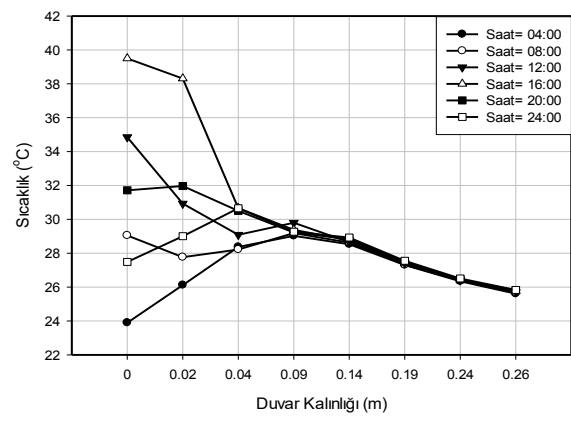


b) FDM ile ortadan yalıtımlı

Şekil 6. Güneye bakan cam yünü yalıtımlı duvar modeli ile FDM ile ortadan yalıtımlı duvar modeli için duvar kalınlığı boyunca zamana bağlı sıcaklık değişimleri



a) FDM ile içten yalıtımlı



b) FDM ile dıştan yalıtımlı

Şekil 7. Güneye bakan FDM ile içten ve dıştan yalıtılmış duvar modelleri için duvar kalınlığı boyunca zamana bağlı sıcaklık değişimleri

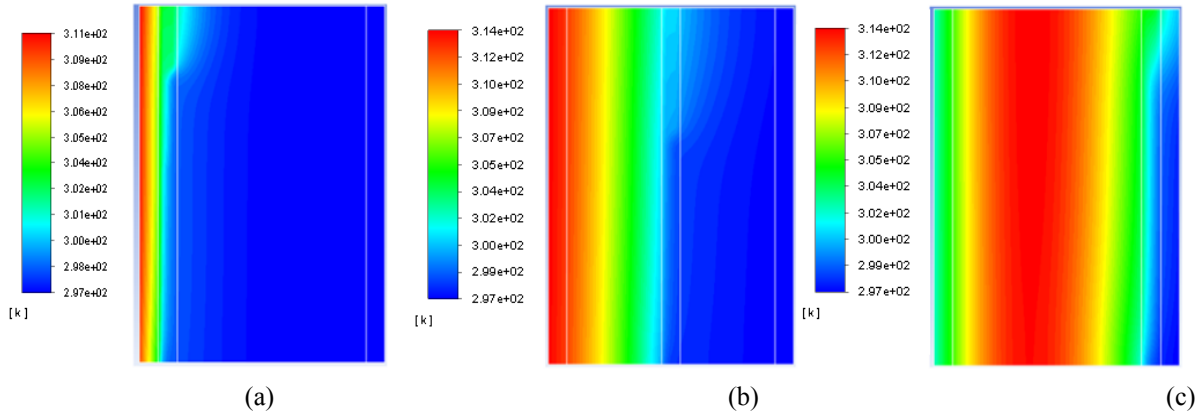
Yalıtımsız duvar hariç diğer tüm duvar modellerinde duvar kalınlığı 26 cm'dir ve grafiklerde 4'er saatlik aralıklarla duvar kalınlığı boyunca sıcaklık dağılımları görülmektedir. Yaz şartları için yalıtımsız duvarda, duvarın kalınlığı boyunca sıcaklık dalgalanmalarının oldukça fazla olduğu görülmektedir. Grafiklere bakıldığında duvarın

dış yüzeyinde minimum sıcaklık saat 04:00'da elde edilirken maksimum sıcaklık saat 12:00'da elde edilmektedir. Bunun nedeni güneye bakan duvarda maksimum güneş ışınımının öğlen saatinde elde edilmesidir. 20:00 ve 24:00 gibi gece saatlerinde sıcaklık duvar içerisinde önce artarken daha sonra azalmaktadır. Bunun nedeni ise sıcaklığın duvar içerisinde gece boyunca depolanması yüzünden dış yüzeyden iç yüzeye doğru giderek azalmasıdır. Yazın güneye bakan duvarın dış yüzeyinde yaklaşık olarak 22°C ile 43°C arasında sıcaklık dalgalanması olduğu görülmektedir. Bu dalgalanma duvarın dış yüzeyinden iç yüzeyine doğru biraz azalsa da, duvarın iç yüzeyinde yeterince azalmadığı görülmektedir. Bu nedenle duvara yalıtım veya FDM uygulanarak dış sıcaklık dalgalanmalarını sönmüleyip iç yüzey yayılımının en aza indirilmesi amaçlanmıştır. Elde edilen bu sonuçların ANSYS' de daha önce FDM'siz duvar yapıları için yapılan başka çalışmaların sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür[19-20].

Duvarın ortasına cam yünü yalıtım uygulandığında yalıtım tabakasının etkisiyle sıcaklık dalgalanmalarının oldukça azaldığı görülmektedir. Ancak duvara aynı kalınlıkta FDM yerleştirildiğinde bu azalmanın daha fazla olduğu görülmüştür. Duvarda yalıtım malzemesi olarak faz değiştiren malzeme kullanılması ile duvar içerisindeki sıcaklık salınımları oldukça fazla sönmülenerek birbirine yakın sıcaklık değerleri elde edilmiş ve sıcaklık duvar içerisinde hemen hemen sabit kalmıştır. FDM'nin dışta olması durumunda en az sıcaklık dalgalanmalarının olduğu görülmüştür. Yani FDM'nin duvarın dışına yerleştirilmesinin duvar kalınlığı boyunca sıcaklık dalgalanmalarını en aza indirdiği tespit edilmiştir.

Grafiklere bakıldığında yaz şartlarında güneye bakan yalıtımsız duvarın iç yüzeyinin gün sonunda 27.84°C sıcaklıkta olduğu görülmektedir. FDM'nin dışta ve ortada olduğu duvarların iç yüzey sıcaklıkları ise 25.83°C ve 26.08°C sıcaklıkta olduğu görülmektedir. Yalıtımın konumu olarak FDM'nin dışta olduğu duvar modelinin iç yüzey sıcaklığının daha düşük bir seviyede olduğu ve yalıtımsız duvar ile karşılaştırıldığında yaklaşık olarak 2°C'lik bir fark olduğu görülmektedir.

Güney yönüne bakan duvarda FDM'nin dışta, ortada ve içte olduğu duvar modelleri için 11. saat sonundaki sıcaklık dağılımları Şekil 8'de verilmiştir. FDM'li duvar modellerine ait sıcaklık değişimlerinde erime meydana geldiği zaman sıcaklıktaki değişim şekillerde görülmektedir. Bu değişimler düzenli bir şekilde ilerleyen sıcaklık dağılımının erimenin başlamasıyla dalgalı bir hal almasına sebep olmuştur. Yalıtımsız ve cam yünü ile yalıtılmış duvar modellerinin sıcaklık dağılımlarında erime ve katılaşma olmadığından böyle bir durum gözlemlenmemiştir.



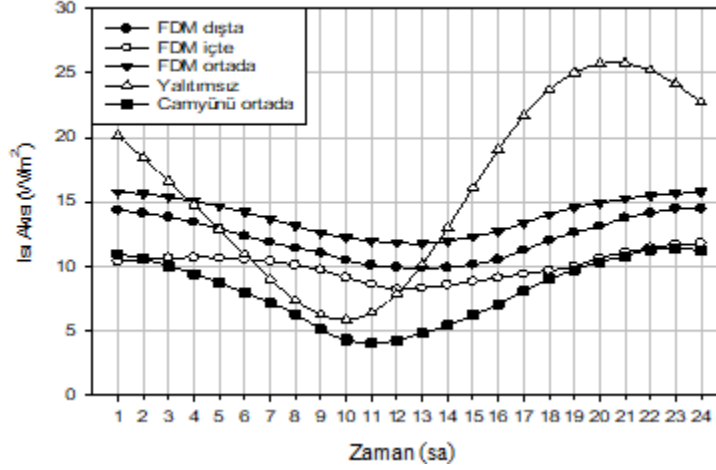
Şekil 8. Duvar boyunca sıcaklık dağılımları (a) FDM'nin dışta olduğu duvar modeli (b) FDM'nin ortada olduğu duvar modeli (c) FDM'nin içte olduğu duvar modeli.

3.3. Soğutma Yükleri

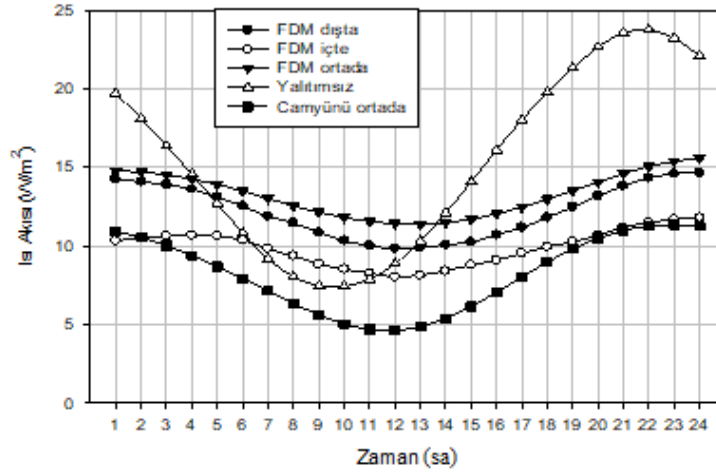
Bu çalışmada ele alınan 5 farklı duvar modeli için ısı akılarının zamana göre değişimleri ise güney ve kuzey yönlendirmeler için sırasıyla Şekil 9 ve 10'da gösterilmiştir.

Duvar iç yüzey ısı akısının maksimum ve minimum değerleri arasındaki fark ısı akısındaki dalgalanmayı verir. Dalgalanma ne kadar az olursa iç yüzeye geçen ısı o kadar az olur. Güneye bakan duvarda ısı akısındaki en fazla dalgalanma grafikten de görüldüğü gibi yalıtımsız duvarda meydana gelirken duvarın yalıtılmasıyla bu dalgalanma azalmaktadır. Yalıtımsız duvar için maksimum ve minimum ısı akısındaki fark 19.91 W/m² olurken, cam yünü yalıtım malzemesinin kullanılmasıyla bu farkın yazın 7.37 W/m² değerine düştüğü görülmüştür. FDM'nin kullanılmasıyla bu dalgalanmanın bir miktar daha azaldığı görülmektedir. FDM'nin dışta, içte ve ortada olmasına göre maksimum ve minimum ısı akısındaki farkın sırasıyla 4.44 , 4.29 ve 4.91 W/m² olduğu ayrıca

görülmektedir. FDM'nin cam yünü ile yapılan yalıtımdan çok daha etkili olduğu görülmüştür. Böylece FDM'nin kullanılmasıyla duvar iç yüzeyinin dış sıcaklık dalgalanmalarından en az etkilendiği görülmektedir.

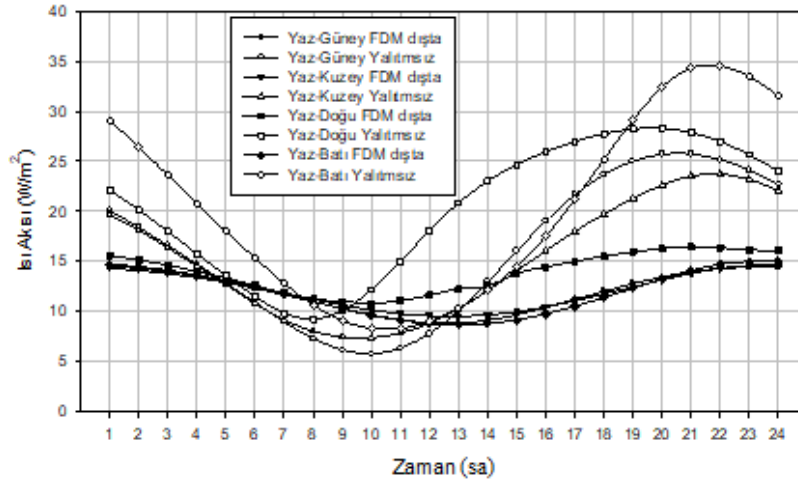


Şekil 9. Güneye bakan farklı duvar modelleri için ısı akısının gün boyunca değişimi



Şekil 10. Kuzeye bakan farklı duvar modelleri için ısı akısının gün boyunca değişimi

Şekil 11 bütün duvar yönlerine göre yalıtımsız ve FDM'nin dışta olduğu duvar modelleri için ısı akısının zamana göre değişimini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi tüm yönlendirmeler için FDM'li duvarın maksimum ve minimum ısı akıları arasındaki farkın yalıtımsız duvara göre daha düşük olduğu görülmektedir. Yalıtımsız duvar için bu fark bütün yönlendirmelere göre 17-28 W/m² arasında değişirken FDM ile yalıtılmış duvarda söz konusu farkın 5-8 W/m² arasında değiştiği görülmüştür. Yalıtımsız duvarda ısı kazancı açısından yönlendirmenin etkisi büyük olurken FDM'li duvarda bu etkinin azaldığı görülmektedir.



Şekil 11. Güney, kuzey, doğu ve batı yönlerine bakan yalıtımsız ve FDM'nin dışta olduğu duvar modellerine ait ısı akılarının karşılaştırılması

3.4. Faz Kayması ve Sönüm Oranları

Binaların dış duvarlarında ısı depolama kapasiteleri bakımından faz kayması ve sönüm oranı önemli parametrelerdir. Faz kayması iç yüzey sıcaklığı ile eşdeğer dış sıcaklığın maksimum olduğu zaman aralarındaki fark olarak adlandırılır. Sönüm oranı ise bu işlem boyunca genlikte meydana gelen azalma miktarıdır, başka bir deyişle iç yüzey sıcaklığının genliğinin eşdeğer çevre sıcaklığının genliğine oranı olarak adlandırılmaktadır. Faz kayması ve sönüm oranı, yapılarda ısı depolama kapasitelerini hesaplayabilmek için önemli belirleyicilerdir [14].

Çok katmanlı duvar yapılarında katmanların yeri ve boyutlarının faz kayması ve sönüm oranı değerleri üzerine etkisi vardır [21]. Duvarın ısı depolama kapasitesinin yüksek olması, faz kaymasını artırır ve sönüm oranını ise azaltır. İç mekan konforu açısından sönüm oranının küçük, faz kaymasının ise büyük değerlerde olması gerekmektedir. Tablo 7'de yaz şartlarında güney ve kuzeye bakan tüm duvar modellerine ait faz kayması ve sönüm oranı değerleri yer almaktadır. Tablo 7'den görüldüğü üzere FDM ile yalıtılmış duvar modellerine ait değerlerin yalıtımsız ve cam yünü ile yalıtılmış duvar modeline göre ısı depolama kapasitesi açısından daha iyi olduğu söylenebilir.

Tablo 7. Güney ve kuzeye bakan tüm duvar modellerine ait faz kayması ve sönüm oranı değerleri

Duvar yapısı	Güney		Kuzey	
	Faz Kayması (sa)	Sönüm Oranı	Faz Kayması (sa)	Sönüm Oranı
Yalıtımsız	6	0.113	6	0.116
Cam yünü ortada	7	0.103	7	0.108
FDM dışta	11	0.032	10	0.033
FDM içte	9	0.029	10	0.028
FDM ortada	11	0.038	10	0.037

4. Sonuçlar

Bu çalışmada yalıtım yerine FDM kullanmanın soğutma yüküne etkisi dinamik dış iklim şartları göz önünde bulundurularak ve tüm duvar yönlendirmeleri için ANSYS'de sayısal olarak araştırılmıştır. Dış yüzeyin 24 saat boyunca değişen güneş ışınımı ve dış ortam sıcaklıklarına maruz kaldığı göz önünde bulundurularak gerçek şartlara yakın bir analiz gerçekleştirilmiştir. Seçilen FDM'nin uygun bir erime ve katılaşma sıcaklığı aralığında olması gerekmektedir. Bu yüzden bu çalışmada yaz şartlarında 28-30 °C aralığında eriyen parafin bazlı RT-27 kullanılmıştır. Sonuç olarak, duvara yalıtım yerine aynı kalınlıkta FDM uygulanarak tüm duvar yönlendirmeleri için dış sıcaklık dalgalanmaları sönümlenip iç yüzeye yayılımının en aza indirilmesi sağlanmıştır. Ayrıca duvara

FDM uygulanarak maksimum faz kayması ve minimum sönüm oranı açısından duvarın ısı depolama kapasitesinin de arttığı görülmüştür.

Kaynaklar

- [1] Konuklu Y, Paksoy HÖ. “Faz değiştiren maddeler ile binalarda enerji verimliliği”. X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 919-930, İzmir, Türkiye, 13-16 Nisan 2011.
- [2] Sun X, Zhang Y, Xie K, Medina MA. “A parametric study on the thermal response of a building wall with a phase change material (PCM) layer for passive space cooling”. *Journal of Energy Storage*, 47, 103548, 2022.
- [3] Kürklü A, Wheldon AE, Hadley P. “Bir faz değişim maddesinin model bir serada dondan koruma amacı ile kullanılması”. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 3(2): 359-363, 1997.
- [4] Zhang G, Xiao N, Wang B, Razaqpur AG. “Thermal performance of a novel building wall incorporating a dynamic phase change material layer for efficient utilization of passive solar energy”. *Construction and Building Materials*, 317, 126017, 2022.
- [5] Tian G, Lv H, Huang J, Liu P, Feng W. “Experimental study on the heat transfer characteristics of different walls with phase change materials in summer”. *Journal of Building Engineering*, 44, 103354, 2021.
- [6] Cevik M. Faz Değiştiren Maddelerle Duvar Isıl Yalıtımının Deneysel Olarak Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye, 2012.
- [7] Tokuç A. Faz Değişim Malzemelerinin Isıl Enerji Depolama Amacıyla Yapı Elemanı Üretiminde Kullanılması. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye, 2013.
- [8] Örengül F. Gizli Isı Depolamalı Tavan Isıl Yalıtımının Deneysel Olarak Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye, 2010.
- [9] Konuklu Y. Mikrokapsüllenmiş Faz Değiştiren Maddelerde Termal Enerji Depolama ile Binalarda Enerji Tasarrufu. Doktora tezi, Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye, 2008.
- [10] Kurt S. Yeni Nesil Bina Malzemeleri için Faz Değiştiren Madde Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye, 2012.
- [11] Quanying Y, Ran H and Lisha L. “Experimental study on the thermal properties of the phase change material wall formed by different methods”. *Solar Energy*, 3099-3102, 2012.
- [12] Hasan MI, Basher HO, Shdhan AO. “Experimental investigation of phase change materials for insulation of residential buildings”. *Sustainable Cities and Society*, 36 (2018) 42-58, 2018.
- [13] Kandasamy R, Wang QX and Mujumdar SA. “Application of phase change materials in thermal management of electronics”. *Applied Thermal Engineering*, 27, 2822-2832, 2007.
- [14] Özel M. Duvar Yüzeylerinde Periyodik Sıcaklık Değişimi Olan Binalarda Isı Kazanç ve Kayıpların Minimum Yapacak Yöntemlerin Araştırılması. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye, 2003.
- [15] Özel, M. 2022. Impact of glazing area on thermal performance of buildings, *International Journal of Ambient Energy*, Vol. 43, No. 1, 2039-2055.
- [16] Daloğlu A. “Isı Yalıtımında Faz Değiştiren Malzeme Kullanımı”. X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir, Türkiye, 2011.
- [17] Cengel Yunus A and Afshin J Ghajar. "Heat and mass transfer." A practical approach 2007.
- [18] Okcu M. Faz Değiştiren Maddelerde Erime ve Katılaşma Sürecinin Sayısal Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye, 2011.
- [19] M. Özel, N. İlgin, (2013). “Periyodik Sınır Şartlarına Maruz Kalan Çok Katmanlı Duvarlarda Sıcaklık Dağılımının ANSYS’de Analizi”, *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, Sayı 132, 14:49, 27-32.
- [20] N. İlgin, M. Özel ve K. Pıhtılı, “Yalıtımlı Duvarlarda Sıcaklık Dağılımının ANSYS’ te Çözümü” IV. Ege Enerji Sempozyumu 21-23 Mayıs 2008 İzmir.
- [21] Özel M, Çakmak FA, Beyazıt N. “Faz değiştiren malzemeli duvarlarda sıcaklık dağılımının nümerik analizi”. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 12(5), 803-810, 2021

Okuma Anındaki Göz Hareketlerini Görselleştirme ve Analiz Etme

Dilber ÇETİNTAŞ^{1*}, Taner TUNCER²

¹ Bilgi İşlem Daire Başkanlığı, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

² Bilgisayar Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

*¹ dcetintas@firat.edu.tr, ² ttuncer@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 02/09/2022;

Kabul/Accepted: 24/03/2023)

Öz: İnsan davranışlarını değerlendirme alanında göz izleme teknolojisi giderek daha önemli hale gelmektedir. Bu teknoloji ile bilinçdışı gerçekleştirilen göz hareketlerinden konum, odaklanma süresi, göz bebeği boyutu, göz kırpması gibi özellikler elde edilir. Bu özelliklerden yola çıkılarak tüketim modeli, psikolojisi ve ilgi alanı gibi davranışsal bilgilere ulaşılabilir. Ancak göz hareketleri milisaniyelik sürelerde veri ürettiği için bu verilerin değerlendirilmesi ve analiz edilmesi problem olmaktadır. Bu çalışma göz takip cihazı ile alınan karmaşık ve yoğun verileri analiz etme ve değerlendirme aşamasında görselleştirme tekniklerini uygulayarak faydalı ve gizli kalan bilgileri daha görünür yapmayı amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda maliyet nedeniyle sınırlı sayıda alınabilen göz verileri lineer olmayan enterpolasyonla çoğullanıp spektrogram görüntüleri elde edildi. Çoğullanan veriler derin öğrenme ve DVM(Destek Vektör Makine) ardından kullanıcının ne tür doküman okuduğuna dair sınıflandırma yapıldı. Sonuçta önerilen sınıflandırma algoritması ile %95.24 doğrulukla okunan doküman türü belirlendi.

Anahtar kelimeler: Göz izleme, ısı haritası,scatter grafiği, spektrogram, derin öğrenme.

Visualizing and Analyzing Eye Movements During Reading

Abstract: Eye-tracking technology is becoming more and more important in the field of evaluating human behavior. Because with this technology, features such as the position of unconscious eye movements, focusing time, pupil size, and the number of blinks are obtained. Based on these features, behavioral information such as consumption models, psychology, and interests can be reached. However, since eye movements produce data in milliseconds, it is a problem to evaluate and analyze these data. This study aims to make useful and confidential information more visible by applying visualization techniques in the analysis and evaluation phase of complex and dense data obtained with an eye tracker. For this purpose, spectrogram images are obtained by multiplexing the eye data, which can be taken in limited numbers due to cost, by non-linear interpolation. After the multiplexed data are deep learning and DVM (Support Vector Machine) processes, a classification is made about what kind of document the user reads. As a result, the type of document read with 95.24% accuracy was determined with the proposed classification algorithm.

Key words: Eye tracking, heat map, scatter plot, spectrogram, deep learning.

1. Giriş

Görme işlemi kornea katmanına gelen ışınların kırılıma uğrayıp göz merceğine iletilmesi ile başlar. Göz merceğinde ikinci defa kırılan ışınlar retina tabakasındaki sarı leke denilen alana düşer. Bu alanda çok sayıda algılayıcı mevcuttur. Algılayıcılardan kon hücreleri renkleri rom hücreleri cismin şekil yapısını tespit eder. İnsanların tüm kafa ve göz hareketlerinin sebebi bu algılayıcıların bulunduğu alana çok fazla sayıda ışın düşürebilmektir. Hareketlerin kaydedilip değerlendirilmesi göz izleme teknolojisini doğurmuştur.

Göz izleme teknolojisinin temeli gözün algılayamadığı kızıl ötesi ışınların gönderilip yansımalarının kameralarla kayıt altına alınmasına dayanır. Işık demetinin okurun kornea ya da retinasından yansımaları göz bebeği konumu ve hareketlerinin algılama cihazı tarafından alınıp bilgisayara kaydedilmesiyle veriler oluşturulur. Elde edilen bu veriler bakış noktasının koordinatlarını, ne kadar süre nereye odaklandığı, gözün yaptığı sıçrama oranı gibi sayısal değerler içerir. Göz izleme, bir bireyin bakış pozisyonlarını ve göz hareketlerini kaydetmenin yanı sıra tahmin etme sürecidir [1]. Göze bakma bilgisi, elde edilen beş duyu bilgisinin %80'inden fazlasını kaplayacak şekilde diğer duylara göre daha hızlı bir tepki hızına sahiptir. Bu nedenle bakış takibi, kullanıcı ve bilgi ekipmanı arasında etkili bir etkileşim yöntemi olarak kabul edilir [2]. Geliştirilen göz izleme sistemleriyle takip ve etkileşimi en iyi noktaya ulaştırmak hedeflenmektedir.

* Sorumlu yazar: dcetintas@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0003-0710-2280, ² 0000-0003-0526-4526

Mevcut göz izleme sistemleri, göz izleme cihazları video tabanlı ve video tabanlı olmayan olarak tasarlanmıştır. Video tabanlı olmayanlar (Elektrookülografi) bireyler tarafından zorluk oluşturan cihazlar, video tabanlı olanlar (Videookülografi) giyilebilir cihazlardır. Giyilebilir cihazlar veya gözlükler bireylerin günlük hayatlarını devam ettirirken hareket kısıtlılığı olmadan nereye baktığını, ilgisini nelerin çektiğini, dış ortamla etkileşimini kaydedebilmektedir.

1.1 Motivasyon

Göz hareketlerinin görselleştirilmesiyle ilgili çalışmalarda ısı haritası (heatmap), tarama yolu (scanpath), dağılım grafiği (scatter plot), bakış grafiği (gaze plot) teknikleri kullanılmaktadır. Bu makale aşağıdaki açıklamalara cevap bulma arayışı ile gerçekleştirildi.

- Göz hareketlerini görselleştiren yöntemler kısıtlı ve sadece belirli amaçlara yönelik kullanılırlar. Örneğin pazarlama alanında kullanılacaksa ısı haritası tercih edilir ve sadece nerelere odaklandığı (fiyat ya da ürün) ile ilgilenilir. Fakat o sıradaki göz bebeği değişimlerinin eklenmesi ile farklı çıkarımlar yapılabilir mi?
- Göz bebeğinin zamana göre değişim sinyallerini görselleştirip analiz etmek mümkün mü?

2. Göz Hareketleri ve Görselleştirme Teknikleri

Göz hareketlerini kaydetmenin temeli 1800'li yıllara dayansa da 1879 yılında Emile Javal tarafından göz hareketlerinin sabitlemeler (fixation) ve sıçramalar (saccade) olarak tanımlanması başlangıç olmuştur. Sonrasında cihazlara mobilerlik, internete bağlanma özelliği, görüntü işleme özellikleri de eklenerek bugünkü konumuna ulaşmış çok sayıda göz hareketini algılama duruma gelmiştir. Göz hareketlerinden bazıları ve yorumları tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Göz Hareketleri ve Açıklamaları

Göz Hareketleri	Anlam ve Yorumu
Odaklanma	Kullanıcının gözlerini sabitleyerek bakmasıdır. Odaklanma süresinin uzun olması bakılan alanın kullanıcıyı ilgisini çektiği olarak yorumlanır.
Sıçrama	A noktasına bakıldıktan sonra B noktasına geçiş sırasında yapılan harekettir. Örneğin, çok sayıda sıçramanın olması ekran üzerinde bir şeyler arandığı anlamına gelir.
Geri yönlü sıçrama	Sağa doğru ilerleyen metin ya da görsellerde geçilen alanlara geri dönme (sola) davranışıdır. Bu durum dikkat dağınıklığı veya geçilen alanın anlaşılmadığı bilgisine ulaştırır.
Gözbebeği Boyutu	Bilişsel yük ve duygu durum değişikliklerinden etkilenir. Yapılan aktivitenin zorluğu, duygu durum tespiti için kullanılabilir.
Göz Kırpma	Gözü koruma, nemli tutma görevleri bulunan bir reflekstir. Yorgunluk, uykusuzluk çıkarımlarında tercih edilir.
Göz Koordinatları	Gözün eksen üzerindeki bakış noktalarıdır. Bakış alanları incelenerek bireyle ilgili kişisel tercih çıkarımları yapılabilir.

2.1 Görselleştirme Teknikleri

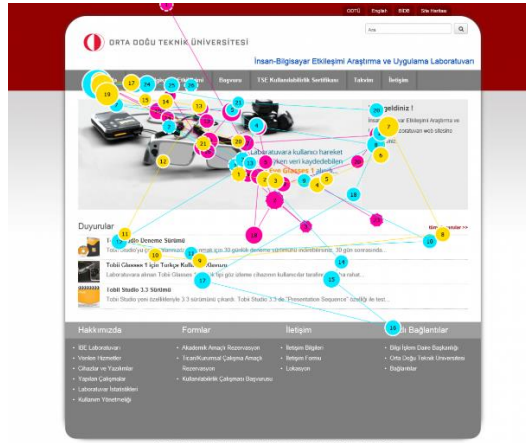
Göz izleme alanındaki gelişmeler 1980'li yıllarda durağanlık yaşamıştır. Verileri analiz etmenin veri toplamaktan daha zor olduğu gözlemlenmiştir. Bilgisayar grafiklerinin gelişimiyle birlikte veriler görselleştirilerek değerlendirme yoluna gidilmiştir. Bu doğrultuda birçok görselleştirme tekniği geliştirildi. Isı haritası, tarama yolu, dağılım grafiği ve bakış grafiği bunlar arasındadır.

Isı Haritası (Heatmap): Göz izleme verilerinde en çok tercih edilen görselleştirme tekniğidir. Bakılan alanları kırmızı ile mavi arasında renklendirir. En çok bakılan alanlar kırmızı, en az bakılan alanlar mavi olarak renklendirilir. Yarı saydam bir renk haritası aracılığıyla odaklanmaların göreceli frekanslarını veya sürelerini görselleştirir. Bir ısı haritasının alternatif versiyonları, ilginç olmayan kısımları karartarak veya bulanıklaştırarak gizler [3][4]. Olumsuz yönü kişiler arasındaki farkı iyi yansıtamamasıdır. Şekil 1 Facebook sayfasında gezinen bir kullanıcıdan elde edilen ısı haritasını göstermektedir.



Şekil 1. Facebook sayfasındaki ısı haritası[5]

Tarama Yolu (Scanpath): Bu teknikte odaklanılan nokta düğüm, sıçrama hareketi ayrıtılarak ifade edilir. Kullanıcının bakış sıralaması ve geçiş güzergahları hakkında bilgi verir. Aynı görsel farklı zamanlarda gösterildiğinde aynı yolu takip edip etmediği gözlemlenebilir. Şekil 2 bir web sitesinde gezinen kullanıcının sırayla baktığı noktaları ve geçiş yolunu göstermektedir.



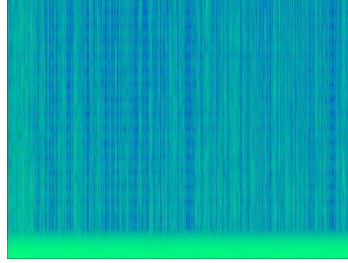
Şekil 2. Odtü sayfası için tarama yolu[6]

Dağılım Grafiği (Scatter Plot): Gözün zamana göre konumsal temsildir. Bakış noktaları arasında bağlantı olup olmadığı ya da göz hareketlerinin hangi konumlar arasında değiştiği çıkarımı yapılabilir.

Bakış Grafiği (Gaze Plot): Kullanıcının odaklandığı noktaların dairelerle temsil edildiği grafiklerdir. Bu grafiklerde bakış süresi uzadıkça daire büyür.

Spektrogram: Spektrogram, bir sinyalin gücünün zaman içindeki görsel bir temsildir. Bir sinyalin frekans içeriğini temsil etmenin görsel bir yoludur. Genellikle ses sinyalleri için kullanılırlar[7,8]. Spektrogram belirli bir zaman diliminde hangi frekansların olduğunu temsil eder. Bu gösterimde, x eksenini boyunca zaman, y eksenini boyunca frekans ve herhangi bir zamanda sinyaldeki enerji miktarı ve frekans renkli bir harita olarak görüntülenir. Daha yüksek genlikler kırmızıdan açık renklerle temsil edilirken, düşük genlikler maviden koyu renklerle temsil edilir. Sinyali spektrograma dönüştürmek için Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü kullanılır. Kısa Zamanlı Fourier

Dönüşümü zaman sinyalinin eşit uzunlukta yeterince küçük parçalara bölünmesiyle hesaplanır, Fourier dönüşümü, her bir daha kısa bölünmüş parça üzerinde ayrı ayrı hesaplanır. Bu süreç, daha kısa bölümler için bir Fourier spektrumu üretir ve daha sonra zamanın bir fonksiyonu olarak tanımlanabilir. Bu çalışmada zamana göre alınan göz hareket sinyalinde belirli parçalar üzerinden Fourier dönüşümü yapılarak spektrogramlar elde edildi. Şekil 3’de gözbebeğinin okuma sırasındaki değişimini gösteren spektrogram verilmektedir.



Şekil 3. Okuma sırasında gözbebeği değişimleri

Sonuç olarak, göz sinyallerini analiz etmek, karşılaştırmak ve görselleştirmek için çok sayıda teknik geliştirilmiştir. Daha fazla bilgiyi görselleştirebilmek amacıyla görselleştirme metodları geliştirilmeye devam etmektedir[9].

2.2 İlişkili Çalışmalar

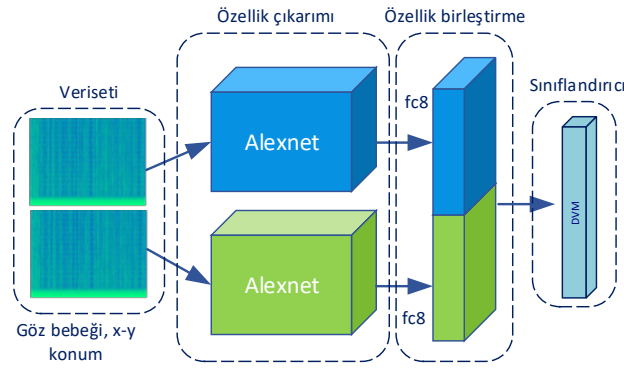
Kasprowski ve Harezlak tarafından gerçekleştirilen çalışmada [10] otizm ve hiperaktivite tanısı alan çocukların göz izleme verileri toplanarak odaklanma problemleri, yorgunluk belirtileri analiz edildi ve teşhis amaçlı kullanıldı. Kubuş ve Çağıltay[11] kamu kurumlarının web sayfalarının kullanılabilirliğini test edip efektif kullanılabilmesi için iyileştirilme çalışmaları gerçekleştirdiler. Djamasbi tarafından yapılan çalışmada [12] Y neslinin (18-31 yaş aralığı) kullanım alışkanlıkları incelenmiştir. Y neslinin ilgisinin daha çok görsel ve daha az metinden yana olduğu çalışmada vurgulandı. [13]’te, oyunlar sırasında gösterilen reklamların ne kadar kalıcı olduğu ve hatırlandığı konusu incelendi. Zinderen ve ark. geleneksel ve infografik gazetecilik arasındaki farkları incelediler. Çalışmada ısı haritası, tarama yolu tekniklerini kullanmış İnfografik alanda %90 başarı sağlanmıştır [14]. Bağcı ve ark. tarafından Türkiye’nin markalaşma sürecindeki tanıtım videolarının dikkat çekicilik düzeyleri EEG ve göz izleme yöntemiyle incelendi ve sonuçta elde edilen veriler analiz edilerek sunuldu [15]. Göz izlemenin bir çok alanda kullanımı mevcuttur. Literatürde görselleştirme tekniklerinin yer aldığı çalışmalar ise şunlardır: Ekran tabanlı göz izleme cihazı ve ısı haritası tekniği kullanılarak kullanıcılara bir dergideki çantalar gösterildiğinde kullanıcıların ilgi duyduğu çantayı bulmada başarılı sonuçlara ulaşıldığı gözlemlendi[16]. Göz hareketlerinin zamansal özelliklerini dikkate alan başka bir çalışmada GSSP adı verilen yeni bir görselleştirme tekniği tanıtıldı. Teknik, zaman serisi analizinde yaygın olarak kullanılan yineleme grafikleri fikrinin bir uzantısıdır. Tekrar eden kalıpları ortaya çıkarmak için zaman serisi analizlerinde sıklıkla kullanılır. Çalışmada ilk adımda alınan i iterasyonu ile ikinci adımdaki j iterasyonu arasındaki uzaklık hesaplanır. Eğer i 'nci odaklanma ve j 'nci odaklanma birbirine yakınsa, görsel üzerindeki bir (i, j) noktası siyah, aksi halde beyazdır. Böylece Göz hareketlerinde elde edilen tekrarlar grafiklerinin kullanılmasının mümkün olduğu gösterildi [17].

Dokuz katılımcının katıldığı ve ısı haritasından farklı olarak üç boyutlu (3B) noktasal bir görsel grafik kullanıldığı [18]’de, amaç diğer yöntemlerde alınamayan döndürme(rotate) ve yakınlaştırma(zoom) özellikleri dikkate alındı. Çalışmada, farklı renkler farklı kullanıcıları temsil etmektedir. Elde edilen sonuçlar 2B çizimlerinden daha etkili olduğunu gösterdi. Birden fazla katılımcının dahil edilebildiği çizimde kullanıcıların paralel ilerleyen ya da farklılaşan göz hareketleri oldukça net fark edildi[18]. Isı haritasına farklı bir bakış kazandırmak için hazırlanan [19]’da iki farklı algoritma sunuldu. Birincisi, ısı haritası verilerini ham sayılara dönüştürmek için ısı haritasına sahip videolar içindir. Algoritma, ısı haritasını içeren videoyu alır ve karelere böler. Her karede, ısı haritasının konumunu şu şekilde belirler: belirli renk değerlerini aramak ve ardından her karede ısı haritasının konumunu görüntülemektir. Algoritma ayrıca sabitleme noktalarını ve videonun tamamı için her bir sabitlemenin ne kadar sürdüğünü hesaplar. İkinci algoritma, birincinin tersini yapmaktır ve bu, göz hareketinin ham verilerini bir ısı haritasına dönüştürmektir. Sonuçta ısı haritalarına ayrıntılı bakış kazandırdı [19]. [20]’de statik veya dinamik bir sahnede bakış sıralamalarının araştırılmasını ve karşılaştırılmasını kolaylaştıran bir göz izleme görselleştirme prototipi olan eSeeTrack ağaç yapısı kullanıldı. Ağaç yapısı cerrahi ve mağaza alanında yapılan incelemelerde durum geçişleri ve sıralı öğeleri görselleştirebileceğini göstermektedir[20]. Özmen ve ark.

göz hareketlerini dikkate alarak e-ticaret süreçlerinde kullanıcıların/müşterilerin gizlilik sözleşmelerine ne ölçüde dikkat ettiklerini ortaya koydular. Z kuşağındaki katılımcıların sözleşme metninin taraflar ve yükümlülükler bölümüne daha fazla odaklandıklarını ortaya koydular. Genel olarak katılımcıların sözleşme metninin son bölümüne daha çok odaklandıkları, orta bölümüne ise odaklanmalarının daha az olduğu gösterildi [21]. Baştuğ ve ark. okuyucuların sesli ve sessiz okuma sırasındaki göz hareketlerini incelediler. Göz kırpması sayısı ve süresi sesli okumada sessiz okumaya göre daha yüksek, duraksama sayısı ve duraksama süre ortalaması sesli okumada, sessiz okumaya göre farklılık olduğunu gösterdiler [22].

3. Metod

Bu makalede, okunan belge tipinin belirlenmesi için Şekil 4'te verilen model kullanıldı. Model göz hareketlerinden elde edilen konum ve göz bebeği boyutunu kullanır. İlk olarak veri seti lineer interpolasyon yöntemi ile çoğullandırılmıştır. Daha sonra konum ve göz bebeği boyut sinyallerinden spektrogram görüntüleri elde edildi. Spektrogram görüntüleri Alexnet mimarisine verilerek özellik çıkarımı yapıldı. Son olarak özellik vektörü DVM ile sınıflandırıldı. Elde edilen sonuçlar aynı modelde Isı haritası ve Scatter grafiklerinin kullanılması ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldı.



Şekil 4. Önerilen Metod.

Adım 1: Başlangıç adımında MPIIDPEye[23] veriseti kullanıldı. 21-45 yaş aralığındaki katılımcılara komedi, gazete ve metin türlerinde farklı oranlarda resim ya da metin içeren dökümanlar okutulmuş video tabanlı olarak göz hareketleri kaydedilmiştir. Okuma öncesinde kalibrasyon işlemi gerçekleştirilmemiş olup ve her bir gönüllü için maksimum 10 dakika okuma süresi verilmiştir. 10 erkek ve 10 kadın olmak üzere 20 katılımcının olduğu çalışmada elde edilen göz hareketleri .csv dosyasına yazılarak ham veriler oluşturulmuştur. Katılımcıların çoğu, çok çeşitli konulardan (örneğin, dil bilimi, psikoloji, işletme, bilgisayar bilimi) ve farklı ülkelerden (örneğin, Hindistan, Pakistan, Almanya, İtalya) gelen lisans ve yüksek lisans öğrencileridir. Tüm katılımcıların göz izleme çalışmaları ile hiç veya çok az deneyimi vardı ve normal veya düzeltilmiş-normal görüşe sahipti. Kayıt için Windows 10 çalıştıran bir masaüstü bilgisayar, 24" bilgisayar ekranı ve bilgisayara USB aracılığıyla bağlanan Oculus DK2 sanal gerçeklik başlığından oluşan aparatlar kullanıldı. Veri setinin tercih edilmesinde hareketlerin zaman damgalı kaydedilmesi etkili oldu. Veri setinde eye-position (X-Y koordinatları), pupil diameter (Göz bebeği boyutu), zaman özellikleri bulunur.

Adım 2: İkinci adımda derin öğrenme ile işlemek için yetersiz olan veriler çoğullandı. Bu adımda ezberleme işleminin önüne geçilebilmesi için formül 1 de belirtilen lineer olmayan denklem tercih edildi.

$$C_{yeni} = (1 - u^2) \times A_1 + u^2 \times B_1 \quad (1)$$

Bu formülde A ve B ardışık iki katılımcıyı temsil ederken u değeri 0 ile 1 arasında 9 değer elde etmemizi sağlayan artan değerdir. Bu işlemin sonunda her bir doküman türü için 20 katılımcıdan $(19 \times 9) + 20 = 191$ veriye ulaşılar.

Adım 3: Üçüncü adım görselleştirme adımdır. Bu adımda ısı haritası, scatter grafiği ve önerilen spektrogram teknikleri kullanıldı.

Adım 4: Görsel veriler Alexnet mimarisine giriş olarak verildi. Bu çalışmada Alexnet özellik çıkarıcı olarak kullanıldı ve fc8 katmanındaki özellikler elde edildi. Göz bebeği ve göz pozisyonu ile görsellerinden elde edilen özellik vektörleri birleştirildi.

Adım 5: Bu adımda tüm göz hareketlerine ait özellikleri içeren görseller sınıflandırma basamağına iletili. DVM(Destek Vektör Makinesi) algoritmasının kullanıldığı bu adımda göz hareketlerinden hangi tür doküman okunulduğu bilgisine ulaşıldı.

4. Değerlendirme ve Tartışma

Çalışmada, verilerin %70'i eğitim %30'u test olarak kullanıldı. Isı haritasına tüm veriler dahil edilirken, Scatter grafiğinde göz koordinatları ve gözbebeği özellikleri ayrı ayrı görselleştirilerek Alexnet fc8 katmanı ile birleştirildi. Scatter için yapılan birleştirme işlemi spektrogram için de yapıldı. Sınıflandırmanın performans değerlendirilmesi için karmaşıklık matrisi kullanıldı. Karmaşıklık matrisi parametreleri tablo 2'deki gibidir. Böylece mevcut özelliklerin yansıtıldığı görseller oluşturuldu. Tablo 3, Tablo 4, Tablo 5 her bir görselleştirme tekniğinin sonuçlarını göstermektedir.

Tablo 2. Karmaşıklık Matrisi

		Tahmin Edilen Sınıflar	
Gerçek Sınıflar	tn	fp	
	fn	tp	

Burada kullanılan TP, doğru-pozitifleri; TN, doğru-negatifleri; FP, yanlış-pozitifleri; FN, yanlış-negatifleri belirtmektedir. Bu metrikler başarı ölçümü için Doğruluk, Kesinlik, F1-Skor değerlerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır.

$$\text{Doğruluk} = \frac{tp+tn}{tp+tn+fp+fn} \quad (2)$$

$$\text{Kesinlik} = \frac{tp}{tp+fp} \quad (3)$$

$$\text{F1 Skor} = \frac{2tp}{2tp+fp+fn} \quad (4)$$

Scatter grafik tekniği ile elde edilen sonuçlara göre %87,83 genel başarı oranı elde edildi. En yüksek başarı düzeyine gazete türünde ulaşıldı.

Tablo 3. Scatter Tekniğinin Sonuçları.

Tür	Doğruluk	Kesinlik	F1-Skor
Komedi	91.01	0.87	0.87
Gazete	94.18	0.90	0.91
Metin	90.48	0.86	0.86

Isı haritası sonuçları gözlemlendiğinde ise oldukça yüksek değerler elde edildi. Genel ortalama %99,42 olarak saptanırken en başarılı değerler yine gazete alanında elde edildi.

Tablo 4. Heatmap Tekniğinin Sonuçları.

Tür	Doğruluk	Kesinlik	F1-Skor
Komedi	99.42	0.98	0.99
Gazete	100	1.0	1.0
Metin	99.42	1.0	0.99

Spektrogram görselleştirme tekniğinde ise genel başarı %95,24 olarak tespit edildi. Diğer görsel grafik yöntemlerinden farklı olarak en yüksek başarı oranına text doküman tiplerinde elde edildi.

Tablo 5. Spektrogram Tekniğinin Sonuçları.

Tür	Doğruluk	Kesinlik	F1-Skor
Komedi	95.24	0.90	0.93
Gazete	96.3	0.97	0.95
Metin	98.94	0.98	0.98

Daha önce yapılan çalışmalarda ısı haritası ve tarama yolu teknikleriyle yapılan infografik çalışmada %90 başarı elde edilirken nitel anlamda farklı bakış açıları sunarak göz hareketlerinin ağaç yapısı olarak temsil edilebileceği, zoom ya da rotate özelliklerinin görsele yansıtılabileceğine yönelik uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışma spektrogram tekniğini göz izleme çalışmalarına uygulayarak nicel değerler üreten ve kıyaslama imkanı sağlayan öncü çalışmalardandır.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada göz izleme çalışmalarında oldukça önemli rolü olan görselleştirme tekniklerine yeni bir öneri spektrogram kullanımı önerildi. Genellikle kullanımı tercih edilen heatmap tekniğinde çoğullanan verilerdeki değerlerin yakın olması sebebiyle küçük farklılıkların renk gradyanına yansıtılmadığı ve bu durumun yüksek sonuçlara ulaşılmasına neden olmaktadır. Göz izleme çalışmalarında sıkça kullanılan bu teknik ile doğruluk %99,42 elde edildi. Kullanılan üç teknikte en başarılı sonuçların metin ağırlıklı olan gazete ve metin türlerinde olduğu gözlemlendi. Komedi alanında yaygın ve dağınık şekilde gerçekleşen göz hareketlerinin görselleştirmede olumsuz etki oluşturduğu sonucuna varıldı. Kullanılan spektrogram görselleştirme yöntemi sayesinde başarılı sonuçlar elde edildi. Daha önce göz izleme uygulamalarında hiç kullanılmayan spektrogram tekniğinin başarılı olduğu kanıtlandı ve %95,24 doğruluk değeri elde edildi.

Göz çalışmalarında maliyet faktörü etkili olduğu için katılımcı sayısı sınırlı tutulmaktadır. Bu durum araştırmacıları makine öğrenmesi çalışmalarına yönlendirmektedir. İnterpolasyon yöntemi ile verileri çoğullayarak incelenen probleme çözüm önermekteyiz.

Kaynaklar

- [1] S. V. Kulkarni and K. Sangeeta, "Techniques for Visual Analysis of Eye Tracking Data," 2018 Second International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT), 2018, pp. 525-530, doi: 10.1109/ICGCIoT.2018.8753026.
- [2] T. E. Hutchinson, K. P. White, W. N. Martin, K. C. Reichert, and L. A. Frey, "Human-computer interaction using eyegaze input", IEEE Trans., Syst. Man Cybern. Vol. 19, No. 6, 1527-1534, 1989.
- [3] O. Špakov and D. Miniotas. "Visualization of Eye Gaze Data using Heat Maps", Electronics and Electrical Engineering, 2:55-58, 2007.
- [4] D.S. Wooding. "Fixation Maps: Quantifying Eye-movement Traces", Proc. Eye tracking Research & Applications, pp. 31-36, 2002.
- [5] <https://listelist.com/goz-takibi-arastirmasi/>. [Erişim Tarihi:05/12/2022].
- [6] <https://hci.cc.metu.edu.tr/tr/goz-izleme/>. [Erişim Tarihi:05/12/2022].
- [7] Saunders F. A., Hill W. A. and Franklin B., "A Wearable Tactile Sensory Aid for Profoundly Deaf Children," Journal of Medical Systems, vol. 5, no. 4, pp. 265-270, 1981.
- [8] Deller J. R., Proakis J. G. and Hansen J. H., Discrete Time Processing of Speech Signals, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 1993.
- [9] H. Y. Tsang, M. Tory and C. Swindells, "eSeeTrack—Visualizing Sequential Fixation Patterns," in IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 16, no. 6, pp. 953-962, Nov.-Dec. 2010, doi: 10.1109/TVCG.2010.149.
- [10] P. Kasproski and K. Harezlak, "VisDaT – Vision Diagnostics and Treatment System for Children with Disabilities," 2017.
- [11] O. Kubus and K. Çağıltay, "E-Devlet Siteleri Görme Engelliler için Erişilebilir mi?," in TBD Bilişim Kurultayı, 2006.
- [12] S. Djamasbi, M. Siegel, and T. Tullis, "Generation Y, web design, and eye tracking," Int. J. Hum. Comput. Stud., vol. 68, no. 5, pp. 307–323, 2009.

- [13] Akcan D., "Flow Experience And Achievement Of Advergemes On Software Developers: An Eye-Tracking Analysis", Çankaya Üniversitesi,2019.
- [14] ZİNDEREN, A. Veri Gazeteciliğinde Görsel Hikâye Anlatımı: Haberde Görselleştirme ve İnfografik Tasarım Üzerine Bir Göz İzleme Çalışması. MANAS Sosyal Araştırmalar Dergisi, 10(3), 1861-1877.
- [15] Bağcı E., "Türkiye Temali Tanıtım Filmlerinin Tüketici Zihninde Yarattığı Etkilerin Nörobilim Araçları İle Analizi: (Eeg Ve Göz İzleme)", Adnan Menderes Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, 2022.
- [16] Lee, J. Cha, J. Seo and O. Kwon, "User interest visualizing and analysing system using eye gaze," 2015 17th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), 2015, pp. 275-278, doi: 10.1109/ICACT.2015.7224802.
- [17] P. Kasprowski and K. Harezlaky, "Gaze self-similarity plots as a useful tool for eye movement characteristics analysis," 2016 IEEE Second Workshop on Eye Tracking and Visualization (ETVIS), 2016, pp. 6-10, doi: 10.1109/ETVIS.2016.7851157.
- [18] S. V. Kulkarni and K. Sangeeta, "Techniques for Visual Analysis of Eye Tracking Data," 2018 Second International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT), 2018, pp. 525-530, doi: 10.1109/ICGCIoT.2018.8753026.
- [19] Othman, Youssef & Khalaf, Mahmoud & Ragab, Ahmed & Salaheldin, Ahmed & Ayman, Reham & Sharaf, Nada. (2020). Eye-To-Eye: Towards Visualizing Eye Gaze Data. 729-733. 10.1109/IV51561.2020.00128.
- [20] H. Y. Tsang, M. Tory and C. Swindells, "eSeeTrack—Visualizing Sequential Fixation Patterns," in IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 16, no. 6, pp. 953-962, Nov.-Dec. 2010, doi: 10.1109/TVCG.2010.149.
- [21] E. Özmen, E. Karaman, "E-Ticaret Sitelerindeki Gizlilik Sözleşmelerinin Göz Hareketlerini İzleme Yöntemiyle İncelenmesi", Journal of Business in The Digital Age , 3 (2) , 108-116, 2020.
- [22] M. Baştuğ, K. Keskin, İ. Şimşek, "Sesli ve Sessiz Okumada Göz Hareketleri: Bir Göz İzleme (Eye Tracking) Çalışması",. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi , Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi Armağan Özel Sayısı , 327-337, 2019
- [23] Julian Steil, Inken Hagedstedt, Michael Xuelin Huang, and Andreas Bulling. 2019. Privacy-aware eye tracking using differential privacy. In Proceedings of the 11th ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications (ETRA '19). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 27, 1–9. DOI:https://doi.org/10.1145/3314111.3319915.



Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Telif Hakkı Devir Formu / Copyright Form

Biz aşağıda gerekli bilgileri bulunan,

[Yazarların Adı / Author names]

.....tarafımızdan yazılmış,

[Makale Adı / Article title]

.....

başlıklı makale içeriği, sunduğu sonuç, bilgi, bulgu ve yorumları konusunda, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Editörlüğü'nün hiç bir sorumluluk taşımadığını kabul ederiz.

Sunduğumuz makalenin orijinal olduğunu; herhangi bir başka dergiye yayınlanmak üzere gönderilmediğini; daha önce yayınlanmadığını; tümüyle yada bir bölümü herhangi bir kongre/sempozyum da sunulup fakat tam metin olarak basılmadığını ve orijinal telif hakkı devri formu ile birlikte Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Editörlüğü'ne gönderildiğini garanti ederiz.

Makalenin telif hakkından feragat etmeyi kabul ederek sorumluluğu üstlenir ve imza ederiz. Bu vesileyle makalenin telif hakkı Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü' ne devredilmiştir. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Editörlüğü makalenin yayınlanabilmesi konusunda yetkili kılınmıştır. Bununla birlikte yazarların aşağıdaki hakları saklıdır:

Aşağıdaki ve diğer bütün durumlarda makalenin Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi tarafından yayımlandığına dair referans verilmelidir.

1. Telif Hakkı dışında kalan patent v.b. bütün tescil edilmiş haklar.
2. Makaleyi satmamak koşulu ile kendi amaçları için çoğaltma hakkı.
3. Yazarın gelecekteki kitaplar ve dersler gibi çalışmalarında; makalenin tümü ya da bir bölümünü ücret ödemeksizin kullanma hakkı.

Bütün yazarlar tarafından imzalanması gerekiyor: (Sorumlu yazar/Corresponding author*)

Yazarın Adı ve Soyadı / Author Names

İmzası / Signature

Tarih / Date

1

2

3

4

5

NOT: Eksik imza durumunda sorumluluk imzalayan yazarlara aittir. Lütfen formu doldurunuz, imzalayanız ve aşağıdaki adrese metinle birlikte gönderiniz.

Adres: Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Editörlüğü, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 23119-Elazığ.