



Institute of Pure and Applied Sciences

International Journal of Advances
in Engineering and Pure Sciences

MARMARA JEPS



In the name of Rectorate of Marmara University, Rector
Prof. Dr. Mustafa KURT

In the name of Directory of Institute of Pure and Applied Sciences, Director
Prof. Dr. Bülent MERTOĞLU

Editor-in-Chief

Asst. Prof. Dr. Merve ER

Associate Editors

Prof. Dr. Bülent EKİCİ, Prof. Dr. Hayriye KORKMAZ

Editorial Boards

Prof. Dr. Bülent AKKOYUNLU,
Physics

Assoc. Prof. Dr. Ali DOĞRUL,
Naval Architecture and Marine Engineering

Prof. Dr. Mustafa Taylan ŞENGÜL,
Mathematics

Assoc. Prof. Dr. Duygu AKYÜZ ÇUBUKÇU,
Chemistry

Assoc. Prof. Dr. Berçem KIRAN YILDIRIM,
Chemical Engineering

Assoc. Prof. Dr. Hüseyin Avni ES,
Industrial Engineering

Assoc. Prof. Dr. Ömer KORÇAK,
Computer Science and Engineering

Asst. Prof. Dr. Gözde BAKİOĞLU DOĞANYILMAZ,
Architectural and Civil Engineering

Assoc. Prof. Dr. Arzum ÖZGEN,
Industrial Engineering

Asst. Prof. Dr. Mustafa Alparslan ZEHİR,
Electrical and Electronics Engineering

Assoc. Prof. Dr. Beste TURANLI,
Bioengineering

Dr. Mehmet Emin AYDIN,
Computer Science

Doç. Dr. Ali İmran AYTEN,
Mechanical Engineering

Assoc. Prof. Dr. Sümeyra GÜRKÖK,
Biology

Publishing Editor

Oğuz Eren SÜSLÜ

Correspondance and Communication

Merve ER
Industrial Engineering, Faculty of
Engineering, M5-233 Maltepe
/ISTANBUL

Tel: +90 216 777 0 777
merve.er@marmara.edu.tr

Publisher

Marmara University Press
Göztepe Kampusu 34722
Kadıkoy/ISTANBUL

Tel: +90 216 777 1408
yayinevi@marmara.edu.tr

Marmara Üniversitesi Rektörlüğü adına, *Rektör*
Prof. Dr. Mustafa KURT

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü adına, *Müdür*
Prof. Dr. Bülent MERTOĞLU

Editör

Dr. Öğr. Üyesi Merve ER

Yardımcı Editörler

Prof. Dr. Bülent EKİCİ, Prof. Dr. Hayriye KORKMAZ

Editörler Kurulu

Prof. Dr. Bülent AKKOYUNLU,
Fizik

Assoc. Prof. Dr. Ali DOĞRUL,
Gemi İnşaatı ve Gemi Mühendisliği

Prof. Dr. Mustafa Taylan ŞENGÜL,
Matematik

Doç. Dr. Duygu AKYÜZ ÇUBUKÇU,
Kimya

Doç. Dr. Berçem KIRAN YILDIRIM,
Kimya Mühendisliği

Doç. Dr. Hüseyin Avni ES,
Endüstri Mühendisliği

Doç. Dr. Ömer KORÇAK,
Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği

Dr. Öğr. Üyesi Gözde BAKİOĞLU DOĞANYILMAZ,
Mimarlık ve İnşaat Mühendisliği

Doç. Dr. Arzum ÖZGEN,
Endüstri Mühendisliği

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Alparslan ZEHİR,
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği

Doç. Dr. Beste TURANLI,
Biyomühendislik

Dr. Mehmet Emin AYDIN
Bilgisayar Bilimleri

Doç. Dr. Ali İmran AYTEN,
Makine Mühendisliği

Doç. Dr. Sümeyra GÜRKÖK,
Biyoloji

Yayın Editörü Oğuz Eren SÜSLÜ

Yazışmalar ve İletişim

Merve ER
Endüstri Mühendisliği,
Mühendislik Fakültesi, M5-
233 Maltepe /İSTANBUL
Tel: +90 216 777 0 777
merve.er@marmara.edu.tr

Yayıncı

Marmara Üniversitesi Yayınevi
Göztepe Kampusu 34722
Kadıkoy/İSTANBUL
Tel: +90 216 777 1408
yayinevi@marmara.edu.tr

İÇİNDEKİLER/ CONTENTS

Araştırma Makaleleri/ Research Articles

1. Dizel Jeneratörlerde V-Tip Akustik Hava Panjuru Geometrisinin Gürültü Azaltımına Etkileri
Murat UYSAL, Yalçın DOĞAN, Ahmet FEYZİOĞLU, Ahmet Gürkan ZENGİN, İbrahim ÇAKICI, Tolga ALTIPARMAK
Sayfa/Page: 301 - 311
2. Arıtılmış Atık Suyun Çimento Esaslı Sistemlerde Karma Suyu Olarak Kullanılmasının Araştırılması
Serhan ULUKAYA
Sayfa/Page: 312 - 319
3. Narrow Bandwidth and Tunable Mid-Infrared Thermal Emitter Design Based on Double Asymmetric Dielectric Metasurfaces
Osman Safa ÇİFÇİ
Sayfa/Page: 320 - 325
4. Çekişmeli Üretici Ağlar Kullanılarak Medikal Görüntülerin Sanal Hematoksilin ve Eozin (H&E) Boyanması
Musa AYDIN
Sayfa/Page: 326 - 336
5. Comparison of Sound Insulation Performance of Water Drop and Trapezoidal Sound Barriers
Arif DOĞAN, Ahmet ASLANDAĞ, Paşa YAYLA
Sayfa/Page: 337 - 347
6. Vegetable oil-based Composite Vitrimers containing Dynamic Bonds of Amide-Imide and Boronic Ester
Burcu OKTAY
Sayfa/Page: 348 – 353
7. The Parameter Optimization of Support Vector Machine with Genetic Algorithm in Risk Early Warning Models
Muhammed IŞIK
Sayfa/Page: 354 - 366

İÇİNDEKİLER/ CONTENTS

Araştırma Makaleleri/ Research Articles

8. OECD Ülkelerinde Lojistik Performans ve Küresel Yetenek Rekabet Gücü: Entegre MEREC-AHP-TOPSIS Yaklaşımıyla Bir Analiz

Burak ÇİFTÇİ, Umut AYDIN

Sayfa/Page: 367 - 395

9. Yetişkin Öğrenmesinde Andragojik Yaklaşımlar: Otomotiv Sektöründe İş Sağlığı Güvenliği Eğitiminde Oyunlaştırma Uygulamaları

Sude Nur CİVCİVOĞLU, Sevil ÇIRAKOĞLU KELLEÇİ

Sayfa/Page: 396 - 406

10. PMMA Nanokapsüllerin Çeşitli Formülasyon Değişkenlerinin Boyut, Morfoloji ve Zeta Potansiyel Üzerine Etkisinin İncelenmesi

Banu İYİSAN

Sayfa/Page: 407 - 415

11. Kullanılmış Kızartma Yağlarından Üretilen Sıvı Sabunların Hijyen Etkinliğinin İncelenmesi

Ayşegül SİPAHİ, Güler DARTAN

Sayfa/Page: 416 - 424

Dizel Jeneratörlerde V-Tip Akustik Hava Panjuru Geometrisinin Gürültü Azaltımına Etkileri

Impacts of V-Type Acoustic Air Louvre Geometry on Noise Reduction in Diesel Generators

Murat UYSAL ¹, Yalçın DOĞAN ¹, Ahmet FEYZİOĞLU ², Tolga ALTIPARMAK ¹,

İbrahim ÇAKICI ¹, Ahmet Gürkan ZENGİN ¹

¹Teksan, İstanbul, Türkiye

²Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Öz

Gürültü kirliliği, insanları fiziksel ve psikolojik olarak etkileyen başlıca çevresel faktörlerden biri olarak kabul edilmektedir. Teknolojinin hızla ilerlemesi ile gürültü kaynakları ve etki dereceleri hızla artmıştır. Günümüzün kuşkusuz en vazgeçilmez ihtiyaçlarından birisi de elektrik enerjisidir. Bu çalışmada elektrik enerjisi üretiminde yaygın olarak kullanılan dizel jeneratör setlerinin ses izolasyon kabinleri üzerindeki v-tipi akustik hava panjurları ele alınarak bu panjurların sahip oldukları geometrinin gürültü azaltımına etkileri sayısal olarak incelenmiştir. V-tip akustik hava panjuru performansının sayısal olarak incelenmesi sonlu elemanlar ve sonlu hacimleri yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş olup analizler için ise ticari yazılımlardan yararlanılmıştır. V-tip akustik panjur için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizlerinin çözümlenmesinde Ansys Fluent kullanılmıştır. Akustik analizler için de Ansys Workbench ortamında Harmonik Akustik modülü kullanılmıştır. Akış analizleri ile akustik hava panjurunda yaşanan basınç kaybı sonucu, akustik analizlerle de panjurda gürültünün ne kadar düştüğüne dair sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar görsel ve grafiklerle desteklenerek açık bir şekilde paylaşılmıştır. Sonuç olarak akustik panjur yaprak açısı ile akustik performans arasında bir korelasyon ortaya konulmuştur. Akustik panjurlarda yaprak açısının değişmesi ile sönümlenecek gürültünün 1/3 oktav bandında frekansları incelendiğinde her bir frekans bandında farklı performans gösterdiği görülmüştür. Bu çalışmada ham gürültü kaynaklarının frekanslarına uygun yaprak açısının tasarım aşamasında belirlenmesinin soğutma performansı ve gürültü azaltımı yönünden oldukça önemli olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: V Tip Panjur, Akustik Panjur, Gürültü Azaltımı, Dizel Jeneratör, Akış Analizi, Basınç Kaybı, Ansys Simülasyon, Radyatör Fanı, Soğutma Verimi, Gürültü Sönümleme, Jeneratör Ses Kontrolü, Endüstriyel Ses Kontrolü, Akustik Yalıtım, İletim Kaybı

Abstract

Noise pollution is accepted as one of the main environmental factors which affects people physically and psychologically. Noise sources and their effect levels have been increased because of rapid progress in technology. Electrical energy is the most indispensable need without doubt nowadays. In this study, V type acoustic air louvres which are placed on noise insulation cabin of diesel generators generating electricity extensively is discussed and impacts of geometry of these louvres on noise reduction is examined numerically. Numerical analysis of v-type acoustic air louver performance was carried out using the finite element and finite volume method, and commercial software was used for the analysis. Ansys Fluent was used to perform Computational Fluid Dynamics (CFD) for V-type acoustic Louvre. Harmonic acoustic module was used to perform acoustic analysis under frame Ansys Workbench. Pressure loss occurred in air louvres is obtained by means of flow analysis and results are obtained by means of acoustic analysis on how much noise is reduced in the louver. Results are shared and supported with pictures and graphs. Consequently, a correlation between acoustic louver leaf angle and acoustic performance has been revealed. When the frequencies of the noise to be damped with the change of leaf angle in acoustic louvres are examined in the 1/3 octave band, it is seen that it performs differently in each frequency band. In this study, it is retained that determination of leaf angle suitable to frequencies of raw noise sources in the stage of design is quite important in terms of cooling performance and noise reduction.

Keywords: V Type Louvre, Acoustic Louvre, Noise Reduction, Diesel Generator, Computational Fluid Analysis, Pressure Loss, Ansys Simulation, Radiator Fan, Cooling Efficiency, Noise Absorbition, Generator Noise Control, Industrial Noise Control, Acoustic Insulation, Transmission Loss

I. GİRİŞ

Dizel jeneratörlerde çok sayıda gürültü yaratan ekipman olması ile birlikte en baskın gürültü kaynağı olarak egzoz sistemlerini, radyatör fanlarını ve motor-alternatör ekipmanlarını sayabiliriz. Egzoz sistemi kaynaklı gürültüler yanma işlemi sonrasında yüksek basınca ulaşan gazların atılması sırasında oluşurken, motor-alternatör kaynaklı gürültüler gövdeden yayılan ve çoğunlukla yapısal kaynaklı olan gürültülerdir. Radyatör fanı kaynaklı gürültüler ise fanların sahip oldukları kanat geometrilerinden dolayı, yüksek devirlerde dönmeleri esnasında meydana gelen hava-kanat etkileşiminden kaynaklanan gürültü olarak karşımıza çıkmaktadır.

Dizel jeneratörlerde içten yanmalı dizel motorun ihtiyacı olan taze havayı karşılamak ve motor bloğu içerisinde devir daim olan sıvı akışkanın tekrar soğutulması için mahfaza içerisine belirli miktarda ve belirli yoğunlukta taze hava alınması gerekmektedir. Bu nedenle giriş hava basıncını yönetmek güç yoğunluğu için kritiktir. Dizel motorlarda düşük yanma veriminden dolayı turbo şarj sistemleri yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Yaptıkları iş açısından turbo şarjlar dizel motorun düşük yanma veriminin getireceği düşük güç yoğunluğunu artırmaya yaramaktadır [1, 2]. Nüfusun artışıyla paralel olarak enerji ihtiyacı da her geçen gün artmakta; bu artışın büyük bir bölümü de sınırlı ömürlü fosil yakıtlar olan petrol, kömür ve doğalgaz gibi kaynaklar kullanılarak karşılanmaktadır. Fosil yakıtların kullanımının sonuçları arasında hava kirliliği ve asit yağmurları gibi çevresel zararların yanı sıra sera gazlarının birikimi ve sonucunda dünya yüzeyindeki sıcaklık dengesinin değişimi de bulunmaktadır [3].

Radyatör fanı sayesinde mahfaza içerisine çekilen bu havanın bir kısmı yakılmak üzere motorun emme manifolduna gönderilirken bir kısmı da motor bloğundan yayılan ve radyatör peteklerinde oluşan ısı enerjisini üzerine alarak radyatörün soğutma kapasitesini artırır. Isı enerjisini üzerine alan havanın ısınmasının ardından hava yine fan sayesinde mahfazadan dışarıya atılır. Taze hava girişi ve sıcak hava atışı jeneratör mahfazası üzerindeki açıklıklardan sağlanır. Bununla birlikte bu açıklıklardan dolayı mahfaza içerisinden oluşan farklı frekanslardaki gürültüler ortama yayılarak istenmeyen bir durum oluştururlar. Ortama yayılan bu gürültülerin giderilmesi için farklı geometrilerde hava emiş ve atış panjuruları kullanılmaktadır.

Mahfaza içerisindeki dizel jeneratör setine ait içten yanmalı motorun gücü ve silindir sayısının yanı sıra

kullanılan radyatör fanının çapı, kanat sayısı ve devir sayısı gibi özelliklerinin değişmesi ile jeneratör setinin ortama yaydığı gürültü seviyesi değişmektedir.

Farklı endüstrilerde kullanılmakta olan ve çeşitli geometrilerle sahip çok sayıda akustik hava panjuru mevcuttur. Genel itibarı ile bu panjurularda havanın geçişine müsaade edilirken ses dalgalarının panjur yaprağı yüzeylerine çarparak sönümlenmesi beklenir. Sönümlenme işleminin meydana gelebilmesi için akustik panjurun yapraklarında ses dalgalarını karşılayan akustik yalıtım malzemeleri kullanılmaktadır. Çeşitli teknik özelliklere sahip çok sayıda yalıtım malzemesi olmasına karşın jeneratör sektöründe en yaygın kullanıma sahip olanları kimyasal emdirilmiş süngerler ve taş yünü olarak adlandırılan malzemelerdir.

Literatürde aktif ve pasif akustik panjurların akustik performansları ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır. 2014 yılında yapılan bir çalışmada aktif akustik panjurların düşük frekanslarda 20 dB'e varan iletim kaybı sağladığı ve bu performansıyla yüksek frekanslarda pasif panjurların sağladığı performansa ulaştıkları vurgulanmıştır [4].

Performans açısından uygun bir v-tip akustik hava panjuru elde etmek için jeneratör setinin konumlandırılacağı bölgenin iklim koşulları, dizel motorun teknik gereksinimleri, arzu edilen jeneratör ses seviyesi ve kullanılacak akustik yalıtım malzemesinin teknik kapasitesi birlikte ele alınmalıdır. Bu parametrelerden doğan sınır koşulları uygun analiz programlarına girilerek hava panjurunun akış analizleri ve akustik analizleri gerçekleştirilmeli, sonuçlar objektif bir şekilde değerlendirilerek optimum tasarıma karar verilmelidir.

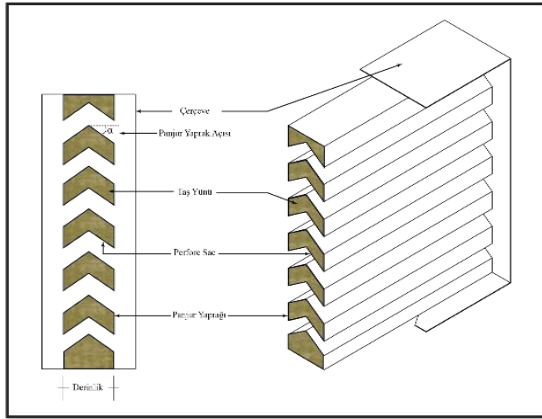
1.1. Akustik Panjur Dizaynı

Akustik panjurular, genellikle aktif ve pasif olarak iki farklı uygulaması olan ve üzerinde açıklıklar bulunan, kapalı alanların içerisinde yer alan mekanik ekipmanların çalışmasıyla üretilen yüksek ve düşük frekanslı ses enerjisinin bu açıklıklardan dış ortama iletimini zayıflatmaya yarayan sistemlerdir. Akustik panjurular bu zayıflatma işlemini yapılarında kullanılan, viskoz ve ısıl açıdan dağıtıcı özelliklere sahip gözenekli ses emici yalıtım malzemelerinin akustik enerjiyi ısıl enerjiye dönüştürmeleri sayesinde gerçekleştirir.

Akustik panjuruların akustik ve aerodinamik performansları panjur tasarımına göre değişkenlik göstermektedir. Özellikle panjurda meydana gelecek basınç kaybı seviyesi, panjurun yağmur suyu girişine

göstereceği direnç, gürültü seviyesini en aza indirirken aynı zamanda hava geçişine de müsaade etmesi gibi temel işlevler tasarım aşamasında panjurun alacağı boyutlarla doğrudan ilintilidir. Akustik panjurlarda gürültü seviyesinin azaltılmasının altında yatan prensipler şu şekilde tanımlanabilir:

- Ses dalgalarının enerjisi sesin geldiği kaynağa geri yansıtılır. Bu yansımanın oranı ise panjur yapraklarının kütlelerine bağlıdır.
- Havanın akustik panjur içerisindeki kanatlar ve açıklıklar arasındaki hareketi sırasında oluşan parazit ikincil bir ses kaynağı olarak kabul edilebilir.
- Akustik panjurlarda gürültü düşümü ses dalgalarının ses emici materyalden geçerken enerjilerinin ısı enerjisine dönüşmesi ile oluşur [5].



Şekil 1. V-tip akustik hava panjuru

1.2. V Tip Akustik Panjur Dizaynı

Şekil 1.de de değinildiği üzere akustik panjurlar, üzerlerinde hava emiş açıklıkları bulunan kapalı alanların içerisinde yer alan mekanik sistemlerin çalışmasıyla üretilen farklı frekanslardaki ses enerjisinin bu açıklıklardan dış ortama aktarılmasını önleyen ekipmanlardır. Dizel jeneratörlerde de aynı amaçla kullanılan akustik panjurlar, sistemin ihtiyacı olan yeterli temiz havanın sisteme ulaşmasını sağlarken akustik açıdan da performans göstermelidir. Ancak bu iki fenomen çoğunlukla kullanıldığı dizel jeneratör setlerinde birbiri ile teknik çelişki oluşturmaktadır. Şöyle ki; dizel jeneratörlerde sistemin ana ekipmanlarından olan dizel motorların verimli çalışabilmesi için taze havaya ihtiyaç vardır. Bu taze havanın mahfaza içerisine alınması için mahfaza üzerine hava giriş açıklıkları yerleştirilir. Bu açıklıkların alanı arttıkça mahfaza dışına sızan gürültü artarken bu alan azaldıkça soğutma sisteminde yer alan fan üzerindeki basınç seviyesi artmaktadır. Bu makalede dizel jeneratör setlerinde kullanılan sabit derinliğe ve sabit hava geçiş boşluğuna sahip v-tip

akustik bir panjurda, panjur yapraklarındaki açı değişiminin geri basınç ve akustik üzerine etkileri incelenmiştir. Tasarım aşamasında kullanılan parametreler Tablo 1’ de belirtilmiştir.

Tablo 1. V-tip akustik panjur tasarım parametreleri

Sıra No	Parametre	Birim	Durum 1	Durum 2	Durum 3	Durum 4
A	Panjur yaprak açısı	°	30°	35°	40°	45°
B	Panjur yaprak derinliği	mm	150	150	150	150
C	Panjur yaprak uzunluğu	mm	700	700	700	700
D	Panjur yaprak kalınlığı	mm	50	50	50	50
E	Panjur yaprak adedi	adet	5	5	5	5
F	Hava geçiş aralığı	mm	50	50	50	50
G	Sac kalınlığı	mm	2	2	2	2

II. DİZEL JENERATÖRLERDE YALITIM MALZEMESİ

Genel olarak ses iki yolla giderilebilir. Bunlar sesin yutulması ve yalıtımı şeklindedir. Ses yutumu, ses dalgalarının ısı enerjisine dönüşümünü ifade eder. Ses yalıtımı ise ses dalgalarının, içinde hareket ettiği ortamın yoğunluğundan farklı bir yoğunlukla (yalıtım malzemesi) karşılaştığında enerjilerinin bir kısmının yansıma ve ısıya giderken bir kısmının da farklı yoğunluktaki ortamdan geçişini tamamlamasıdır. Buna örnek olarak bina dış cephelerinde kullanılan ve belirli oranda ses geçişini azaltan yalıtım malzemeleri verilebilir [6, 7].

Bir mahfaza içerisine yerleştirilen dizel jeneratör setlerinde sistemin gürültü seviyesini düşürmek adına mahfaza duvarlarında ve panjur yapraklarının iç kısımlarında akustik malzeme kullanılarak ses yalıtımı kavramı hayata geçirilir. Literatürde ve endüstriyel uygulamalarda çok çeşitli yalıtım malzemesi tipi mevcut olmasına karşın jeneratör sektöründe en yaygın kullanım alanına sahip olanları akustik sünger ve taş yünü uygulamalarıdır.

Lifli veya açık gözenekli bir yapıda olan izolasyon malzemeleri ses izolasyonu için daha uygundur. Ses dalgaları lifli materyallerle temas ettiği zaman liflerin arasında kalan boşluklardaki hava molekülleri bir miktar ses dalgasını ısı enerjisine çevirir. Bu da ses izolasyonunun sağlanması anlamına gelmektedir. Ayrıca bu lifli yapılar ne kadar ince ve sık bir iç yapıya

sahip olurlarsa ses yutum katsayısının büyüklüğü de aynı oranda artar [6, 7].

İnorganik ham maddeler, 1350°C ile 1400°C sıcaklıkları arasında eritilerek elyaf haline getirilir ve bu işlem sonucunda taş yünleri oluşur. Kullanım yeri ve amacına bağlı olarak, değişik boyutlarda ve farklı teknik özelliklere sahip şekillerde üretilebilen bu materyal, çeşitli kaplama malzemeleri kullanılarak farklı varyasyonlarda üretilebilir. Isı, ses ve akustik yalıtımın yanı sıra yangın karşısında da güvenlik sağlamaktadır. Lifli ve gözenekli iç yapılarından dolayı bu çalışmada panjur yaprakları içerisinde taş yünü kullanılmıştır.



Şekil 2. Taş yünü

Özellikle radyatör hava atışında v-tip panjur kullanımında dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta vardır. Şekil 2.'de gösterilen taş yünü, panjur yaprağının içerisine yerleştirildikten sonra taş yünü sabitlemek amacı ile üzerine perfore sac gelecek şekilde kullanılmalıdır. Burada amaç, panjur yaprağı içerisinde belirli bir hava basıncına maruz kalan taş yünlerinin yapıları itibari ile bütünlüğünü kaybedip dağılmasını engellemektir. Perfore sac kullanımı ile bunun önüne geçilmektedir. Ayrıca taş yünlerinin temel çalışma prensibi ses dalgalarının taş yünü'nün gözenekli yapısına temas ederek enerjisini ısıya dönüştürmesine dayanır. Bu noktada, perfore sac üzerindeki delikli yapı sayesinde ses dalgalarının taş yünü ile teması sağlanırken hava basıncı etkisi ile yapısının bozulup çevreye dağılmasının önüne geçilmiş olur. Analizde modellenen taş yününe ait özellikler Tablo 3'te belirtilmiştir.

Tablo 3. Yalıtım malzemesi teknik parametreleri

Sıra No	Parametre	Birim	Durum 1	Durum 2	Durum 3	Durum 4
A	Panjur yaprak açısı (α)	°	30°	35°	40°	45°
B	Yalıtım malzemesi türü	-	Taş yünü	Taş yünü	Taş yünü	Taş yünü
C	Yalıtım malzemesi kalınlığı	mm	50	50	50	50
D	Yalıtım malzemesi yoğunluğu	kg/m ³	40-45	40-45	40-45	40-45

Tablo 3. Yalıtım malzemesi teknik parametreleri (devamı)

E	Isı iletkenliği	W/mK	0,035-0,04	0,035-0,04	0,035-0,04	0,035-0,04
F	Çalışma sıcaklığı	°C	0,0769	0,0769	0,0769	0,0769
G	Ergime sıcaklığı	°C	>1000	>1000	>1000	>1000

III.V-TİP AKUSTİK PANJURLARDA AKIŞ ANALİZİ ve BASINÇ KAYBI

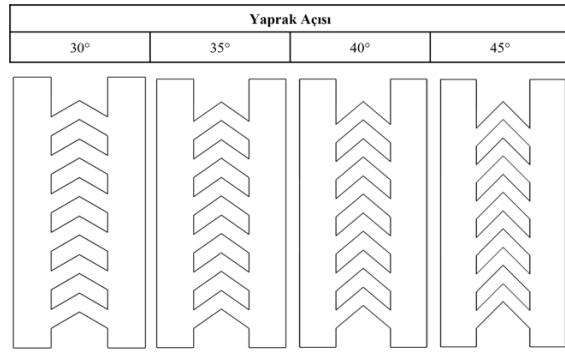
Dizel jeneratörlerde radyatör hava atış tarafında kullanılan panjurlar teorik olarak radyatör fanının bastığı havaya maruz kalmaktadır. Optimum tasarıma sahip olmayan bir hava atış panjuru iki farklı şekilde sistemi olumsuz etkilemektedir. Hava akışını gereğinden fazla kısıtlayacak şekilde tasarlanan bir hava atış panjurunda oluşacak basınç kaybı gerek radyatör fanı üzerindeki basıncı artırarak gerekse mahfaza içindeki ısınan havanın tahliyesini engelleyerek soğutma verimini düşürecektir. Hava akışının çok rahat gerçekleştiği bir tasarım ise gürültünün mahfaza dışına daha fazla iletilmesi anlamına gelecektir.

Uygun tasarımın belirlenmesi noktasında akustik hava panjuru için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler, sonlu hacimler yöntemini kullanarak çözümleme yapabilen ANSYS Fluent çözücüsünün 2024 R1 sürümünde gerçekleştirilmiştir. Denklem takımlarının çözümlenmesi "Intel® Core™ i9-10900X CPU @ 3.70GHz (10 CPUs)" işlemci mimarisi ve 64 GB bellek yapısına sahip donanım kaynağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. V-tip akustik panjurun Tablo 1'de paylaşılan 30, 35, 40 ve 45 derecelik yaprak açılımlarına sahip durum senaryolarının basınç kaybı hesaplamaları, HAD yöntemi ile ön işlem, çözümleme ve işlem sonrası olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmiştir.

3.1. Ön işlem

Sayısal çözümler için matematiksel modelin aşamaları olan akış hacmi oluşturma, sınır koşullarının belirlenmesi ve çözüm ağ örgüsünün bağımsızlaştırılması gerçekleştirilmiştir.

Bilgisayar destekli tasarım aracı olan ANSYS SpaceClaim yazılımının 2024 R1 sürümü kullanılarak sayısal çözümlerinin gerçekleştirileceği akış hacmi, katı geometri sınırları dahilinde oluşturulmuştur. Akış hacmi üzerinde sınır tabaka sayısal çözüm ağının oluşturulabilmesi için paylaşımlı topoloji çalışılmıştır. Farklı yaprak açılımlarına göre oluşturulan akış hacimlerinin iki boyutlu görseli Şekil 3'te paylaşılmıştır.



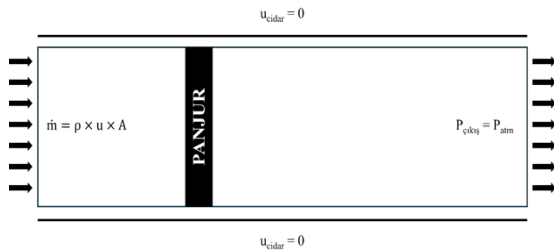
Şekil 3. Yaprak açılarına göre oluşturulan akış hacimleri

HAD analizlerinde akış hacminin sınır koşulları belirlenmiştir. Akış hacminde akışkan olarak hava kullanılmıştır. Havanın, 60 °C sıcaklık ve 101325 Pa deniz seviyesindeki atmosfer basıncı altında sahip olduğu fiziksel özellikler Tablo 4'te paylaşılmıştır.

Tablo 4. Havanın fiziksel özellikleri (60 °C @ 1 atm)

Yoğunluk	1,06	kg/m ³
Dinamik viskozite	0,0000191	kg/m.s
Kinematik viskozite	0,00001886	m ² /s

Motor modelinin veri yaprağından motorun maksimum yükteki fan hava debisi tespit edilmiştir. Akış hacmine saatte 78 m³ hava girişi olacaktır. Sıcaklığın değişimi, akışkanın viskozite ve yoğunluk değerlerinin değişimine sebep olacağı için bu da karşı basınç değerini büyük ölçüde etkiler. Bu nedenle, radyatörden atılan havanın sıcaklığı 60 °C olarak belirlenmiştir ve akışkan sıcaklığı olarak kabul edilmiştir. Akış hacmi birden fazla senaryoda kullanılacağı için geometrik bağımsızlığı oluşturacak hacim, akışın sayısal çözümleme hata mertebelerini en aza indirecek şekilde rüzgâr tüneli şeklinde kurgulanmıştır [16]. Panjur geometrisi dahil akış hacmi cidarlarında kaymama koşulu kullanılmıştır. Sayısal çözümlemesi gerçekleştirilecek akış hacminin sınır koşulları Şekil 4'te paylaşılmıştır.



Şekil 4. Panjur akış hacmi sınır koşulları

HAD analizleri için panjurun yaprak açısına göre farklılık gösteren dört farklı akış hacmi oluşturulmuştur. Bunlar; 30, 35, 40 ve 45 derecelik yaprak açılarına göre YA30, YA35, YA40 ve YA45 akış hacimleridir. Tüm bu akış hacimleri kullanılarak HAD analizleri ile basınç kaybı hesaplamaları yapılacağı için analiz sonuçlarının doğruluğunu arttırmak ve sayısal kararsızlığı azaltmak adına çözüm sonuçları ağ örgüsünden bağımsız hale getirilmiştir. Çözüm ağ örgüsünün bağımsızlaştırılması YA30 akış hacmi üzerinden gerçekleştirilmiştir. Çözüm ağ örgüsünün bağımsızlaştırılması için sekiz farklı HAD analizi gerçekleştirilmiştir (Tablo 5).

Çözüm hacmi ağ örgüsü, ANSYS Mechanical ortamında 2024 R1 sürümünde dört yüzlü ağ yapısı ile oluşturulmuştur ve sonrasında ANSYS Fluent ortamında çok yüzlü ağ yapısına dönüştürülmüştür. Çok yüzlü ağ yapısına dönüştürülmesinde, HAD analizlerinde hızlı ve doğru çözümler elde etmek amaçlanmıştır.

Basınç kaybı hesabı, çözüm hacmi giriş ve çıkış yüzeylerinden hesaplanan alan ağırlıklı basınç değerlerinin oluşturduğu fark ile yapılmıştır.

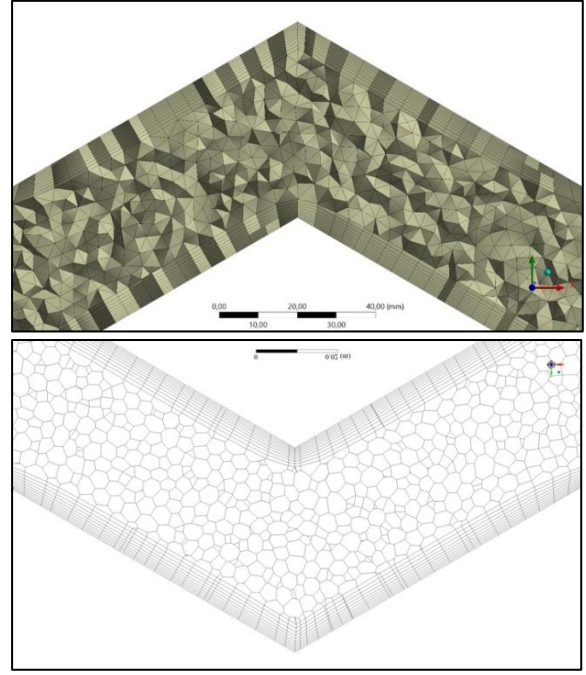
Tablo 5. Çözüm hacminin ağ örgüsünden bağımsızlığı için oluşturulan senaryolar

Çözüm hacmi	Dört yüzlü ağ örgüsü bütünsel eleman boyutu (mm)	Dört yüzlü ağ yapısı sayısal verileri		Çok yüzlü ağ yapısı sayısal verileri		Basınç Kaybı (Pa)
		Hücre sayısı	Düğüm sayısı	Hücre sayısı	Düğüm sayısı	
YA30M1	100	248412	79729	237405	465300	74,58
YA30M2	75	533469	166882	409747	881009	78,76
YA30M3	50	1426394	408273	611682	1817675	84,35
YA30M4	37,5	2917716	788128	1095439	3474358	89,46
YA30M5	25	8245786	2045253	2460944	9217876	92,34
YA30M6	20	14708682	3437527	3927396	15997530	93,28
YA30M7	18	19576032	4501778	5039202	21069532	93,68
YA30M8	15	31597225	7030315	7706679	33607450	93,57

Tablo 5’te paylaşılan bilgilere istinaden basınç kaybının 20, 18 ve 15 mm dört yüzlü ağ örgüsü bütünsel eleman boyutlarında değişmediği ancak 10^{-1} hassasiyette değiştiği görülmüştür. YA30M8 çözüm hacmi, donanım kaynağından 55 GB bellek kullanmıştır, bu sebeple donanım kaynağı sınırlarından ötürü farklı yaprak açıların basınç kaybı hesaplamaları HAD analizlerinde 20 mm bütünsel eleman boyutu kullanılmıştır. M6 çözüm hacmi ağ örgüsünde en büyük asimetri kalite metriği 0,75’tir ve ortalama 0,21’dir.

V-tip akustik panjurların yaprak açıları akışkan akışı sırasında akış ayrılmalarına sebep olacaktır. HAD analizlerinin doğru çözümlenebilmesi ve akış ayrılmalarını tespit edebilmek amacıyla panjur cidarlarında sınır tabaka ağ örgüsü ve çözüm hacminde SST k-Omega türbülans modeli kullanılmıştır. SST k-Omega türbülans modeli, cidar yakınındaki türbülanslı akışlarla sınır tabaka ayrılması ve yeniden bağlanması gibi karmaşık akışları modellemek için uygundur. SST k-Omega türbülans modeli, kayma gerilmesi taşınımını doğru bir şekilde hesaplayarak yüksek gerilimli bölgelerde daha doğru sonuçlar üretmektedir. SST k-Omega modeli, k-Omega ve k-Epsilon modellerinin avantajlarını birleştirerek daha hassas ve stabil sonuçlar sağlar.

Akış ayrılmalarının doğru tespit edilebilmesi için sınır tabakanın viskoz alt katmanındaki baskın viskoz etkileri çözümlenmelere dahil edilmiştir. Bunun için y+ hesaplamaları yapılmıştır. Cidardaki yüzey sürtünme katsayısı, kayma gerilmesi ve sürtünme hızı hesaplanarak cidardaki sınır tabaka ağ örgüsünün ilk hücre yüksekliği 0.4 mm olarak tespit edilmiştir. İlk hücre yüksekliği baz alınarak %10 büyüme oranı ile 10 katman olacak şekilde sınır tabaka ağ örgüsü oluşturulmuştur. Panjur cidarlarına uygulanan sınır tabaka ağ örgüsü Şekil 5’te paylaşılmıştır. İlk hücre yüksekliği hesaplamalarında, SST k-Omega türbülans modeli baz alındığında y+ değeri 10’dan küçük olacak şekilde kurgulanmıştır. Çözüm hacmi giriş sınır koşulunda, akışkan akışının reynolds sayısı ve hidrolik çap değerleri baz alındığında türbülans yoğunluğu %3,78 ve türbülans uzunluk ölçeği 0.049 m olarak kullanılmıştır [17].



Şekil 5. YA30M6 sınır tabaka ağ görseli (20 mm bütünsel eleman boyutu)

3.2. Çözümleme

30, 35, 40 ve 45 derecelik yaprak açılarına sahip v-tip akustik panjurların YA30M6, YA35M6, YA40M6 ve YA45M6 çözüm hacimlerinin üç boyutlu, kararlı durum ve basınç tabanlı HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. HAD analizlerinde, süreklilik denklemi, üç doğrultudaki momentum denklemleri, türbülans kinetik enerji denklemi ve türbülans frekansı denklemlerinin çözümlenmesi Tablo 5’te paylaşılan çözüm ayarları ile gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen iteratif çözümler sırasında denklemlerin kararlılığını ve yakınsama hızını kontrol eden parametreler ise Tablo 6’da paylaşılmıştır. Çözüm hacimlerinde gerçekleştirilen HAD analizlerinin grafikleri Şekil 6’da paylaşılmıştır.

Tablo 5. Çözümleme ayarları

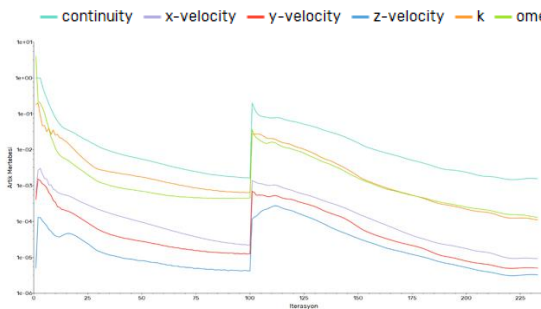
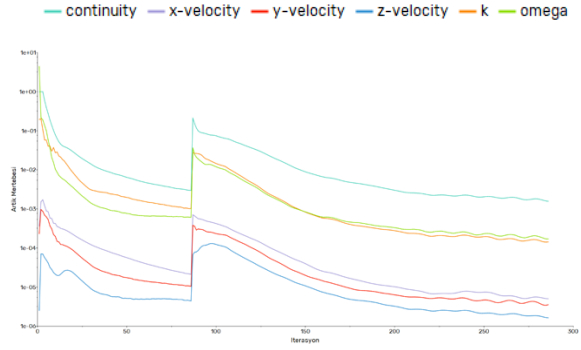
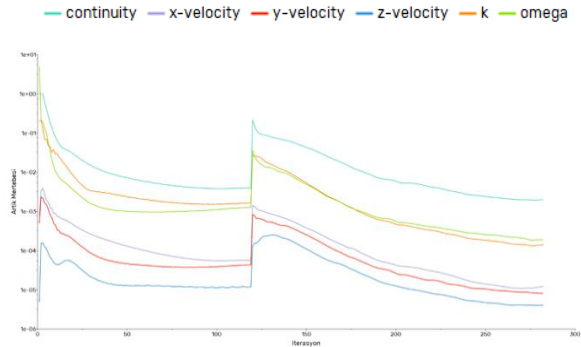
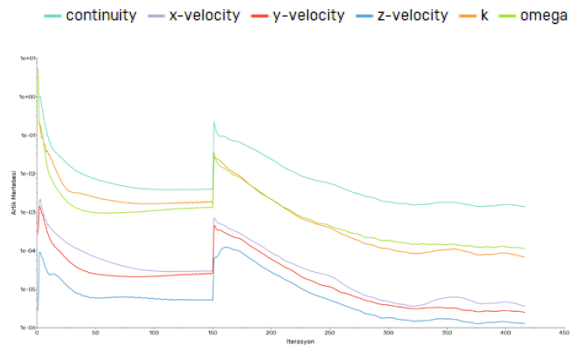
Zaman	Kararlı
Türbülans	Shear Stress Transport k-Omega
Metot	Birleşik
Basınç	İkinci mertebeden
Momentum	İkinci mertebeden
Türbülans kinetik enerjisi	İkinci mertebeden
Türbülans frekansı	İkinci mertebeden
Başlangıç koşulları	Standart – giriş sınır koşulları

Tablo 6. Denklem rahatlatma parametreleri

Basınç	0,5
Momentum	0,5
Yoğunluk	1
Gövde kuvveti	1
Türbülans kinetik enerji	0,75
Spesifik ayrılma oranı	0,75
Türbülans viskozitesi	1

"Burada belirtilmesi gereken, artıkların iterasyonlar ilerledikçe denklemler için hata büyüklükleri olduğudur. Teorik olarak, çözüm yakınsadıkça artık sıfıra ulaşmalıdır, ancak gerçek bir hesaplamada artıklar küçük bir değere ("yuvarlama hatası") kadar azalır ve sonra değişmeyi durdurur ("dengelenir"). Bu çalışmada, Ölçekli Artık izleyici, çözümün tüm denklemler için 10⁻³'e, enerji için ise 10⁻⁶'ya kadar yakınsamasını sağlayan FLUENT varsayılanına dayanmaktadır." [15]

Şekil 6 (a,b,c,d) grafiklerinde, 50 ila 150 iterasyonlar arasında gözlemlenen sıçramalar, çözümleme ayarlarında yapılan değişikliklerden kaynaklanmaktadır. Çözümlemeye başlangıçta birinci dereceden (first-order) ayrıklaştırma yöntemi kullanılarak başlanmış ve ardından ikinci dereceden (second-order) ayrıklaştırma yöntemine geçilmiştir. Bu yaklaşım, başlangıçta hızlı bir yakınsama sağlarken, daha sonraki aşamalarda çözüm doğruluğunu artırmaya olanak tanır, bu da çözüm sürecinde dengeli ve etkili bir sonuç elde edilmesini sağlar [20].

**Şekil 6 (a).** YA30M6 HAD analizi yakınsama grafiği (Artık mertebesi – İterasyon)**Şekil 6 (b).** YA35M6 HAD analizi yakınsama grafiği (Artık mertebesi – İterasyon)**Şekil 6 (c).** YA40M6 HAD analizi yakınsama grafiği (Artık mertebesi – İterasyon)**Şekil 6 (d).** YA45M6 HAD analizi yakınsama grafiği (Artık mertebesi – İterasyon)

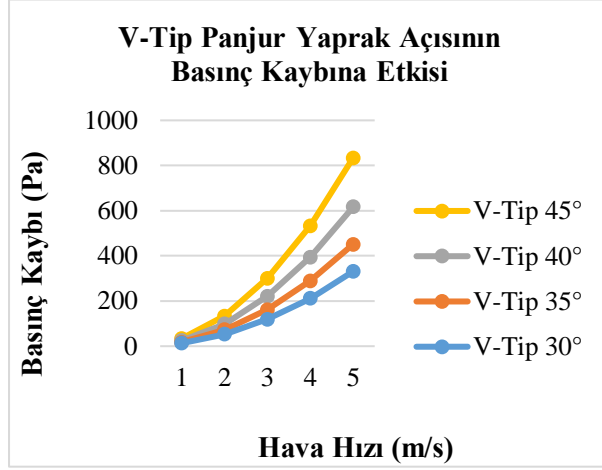
3.3. İşlem sonrası

30, 35, 40 ve 45 derecelik yaprak açılımlarına sahip YA30M6, YA35M6, YA40M6 ve YA45M6 çözüm hacimlerinin HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları Tablo 7'de paylaşılmıştır.

Tablo 7. HAD analiz sonuçları

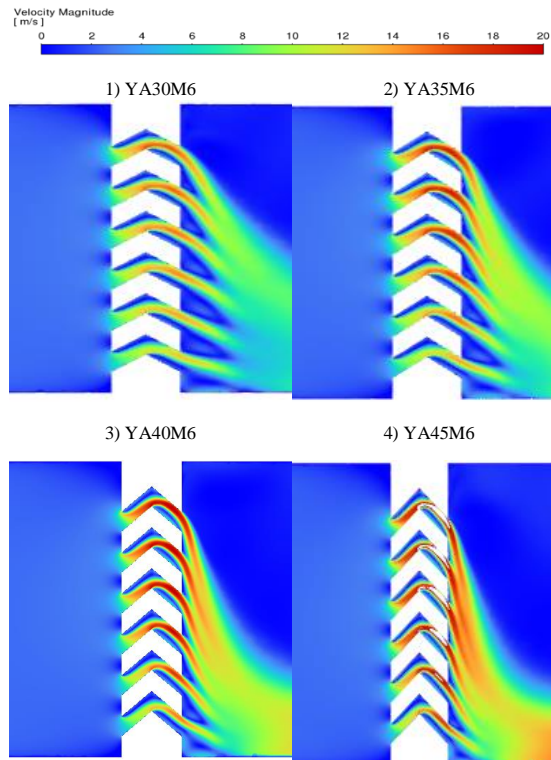
Çözüm hacmi	Basınç kaybı (Pa)	Panjur y+
YA30M6	93,28	4,79
YA35M6	127,13	5,26
YA40M6	173,56	5,76
YA45M6	234,96	6,14

Elde edilen HAD analiz sonuçlarını kullanarak yük kaybı katsayısı her bir çözüm hacmi için belirlenmiştir ve Şekil 7'deki hız – basınç kaybı grafiği oluşturulmuştur [18].

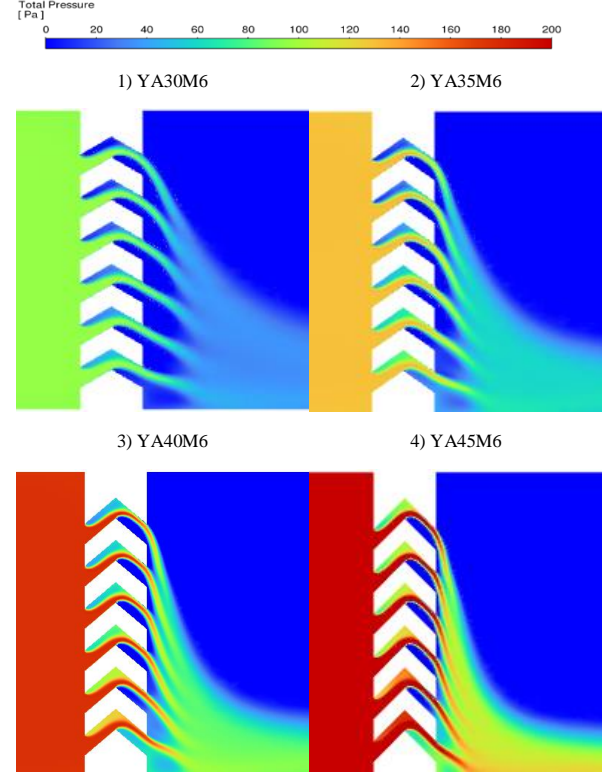


Şekil 7. Farklı yaprak açılarında panjurun hız – basınç kaybı grafiği

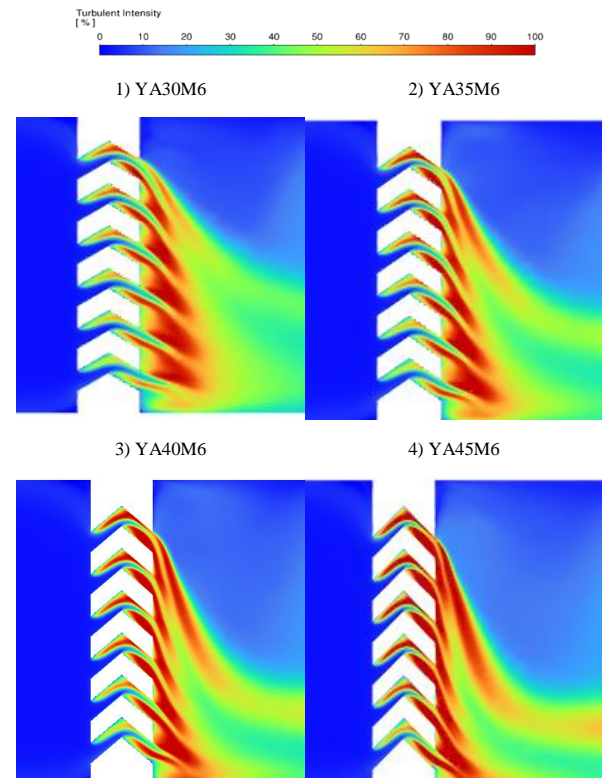
Çözüm hacimlerinin hız, basınç ve türbülans yoğunluğu dağılımını gösteren eş düzey eğrileri Şekil 8, 9 ve 10'da gösterilmiştir.



Şekil 8. Hız dağılımı eş düzey eğrileri



Şekil 9. Toplam basınç dağılımı eş düzey eğrileri



Şekil 10. Türbülans yoğunluğu dağılımı eş düzey eğrileri

Tablo 7’de paylaşılan HAD analiz sonuçları incelendiğinde, panjur yaprak açılarının arttığı senaryolarda basınç kayıplarında ve y^+ değerlerinde artışlar olduğu gözlemlenmiştir. Yaprak açıları arttıkça hava akışının yaprakların yüzeyine çarpma açısı ve ardından nasıl yönlendirildiği basınç kaybında önemli bir etken olarak öne çıkmaktadır. Y^+ değerlerinin ($y^+ \leq 10$) tüm yaprak açılarında düşük kalması, panjur cidarına yakın viskoz alt tabakadaki gerçek akışkan davranışının çözüldüğünü ve duvar fonksiyonlarının devreye girmediğini göstermektedir [17].

Türbülans yoğunluğu ve akış ayrılması, basınç kaybı hesaplamaları üzerinde önemli etkilere sahip olan iki temel akış fenomenidir. Bu iki kavram arasındaki ilişkiyi anlamak, akış dinamiklerini ve basınç kaybını etkileyen faktörleri açıklamaya yardımcı olmaktadır. Türbülans yoğunluğu, hızın dalgalanan bileşeninin karekök ortalamasının, akışın ortalama hızına oranı olarak ifade edilmektedir [19]. Akış ayrılması, bir akışın yüzeyden ayrıldığı ve düşük basınç bölgeleri oluşturarak türbülanslı akışa neden olduğu bir durumdur. Bu durum genellikle yüksek açılı yüzeylerde veya ani geometrik değişikliklerde meydana gelmektedir.

Şekil 8’de hız, Şekil 9’da toplam basınç ve Şekil 10’da türbülans yoğunluğu eş düzey eğrilerinde de görüldüğü üzere v-tip akustik panjurda yaprak açısı arttıkça akışın yüzeyden daha erken ayrıldığı görülmüştür. Açıdaki artış, akışın yüzeyle olan temasını azaltır ve ayrılma noktalarının daha erken oluşmasına yol açar.

Akış ayrılması, türbülanslı bölgelerin oluşumunu arttırmıştır. Şekil 10’da akış ayrılması nedeniyle türbülans yoğunluğunun arttığı görülmüştür. Türbülanslı bölgeler, akışın düzensiz ve kararsız hale gelmesine neden olmaktadır. Bu da daha yüksek enerji kayıplarına yol açmıştır. Yüksek yaprak açılarında basınç kaybı, erken akış ayrılması ve artan türbülans yoğunluğu nedeniyle yüksektir. Daha fazla türbülanslı akış, daha fazla direnç ve dolayısıyla daha yüksek basınç kaybı anlamına gelmektedir.

Geometrik olarak yapraklardaki açı değişimi, akış paternini etkilediği görülmüştür. V-tip akustik panjurda yaprak açısı arttıkça, bu tür bir etki daha yüksek basınç kaybına neden olduğu tespit edilmiştir.

IV. AKUSTİK ANALİZ

Akustik panjurlar aktif ve pasif olmak üzere iki farklı şekilde literatürde yer almaktadır. Akustik panjurların performansları, ekleme kaybı, iletim kaybı ve gürültü

azaltımı gibi kavramlar üzerinden ifade edilmeye çalışılır.

Statik ekleme kaybı, akustik panjurun takılı olduğu ve olmadığı durumlardaki ses seviyelerindeki aritmetik değişiklik olarak tanımlanır [9].

$$L_{Static} = L_{no\ louvre} - L_{louvre} \quad [db] \quad (1)$$

Burada, L (no louvre) ve L (louvre) sırasıyla panjursuz ve panjurlu olarak ölçülen ses basınç seviyeleridir. Bir mahfaza üzerinde kullanılan akustik panjur için iletim kaybı şeklinde ifade edilir.

$$L_R = L_S - TL + 10 \log_{10} \frac{SW}{R_C} \quad [db] \quad (2)$$

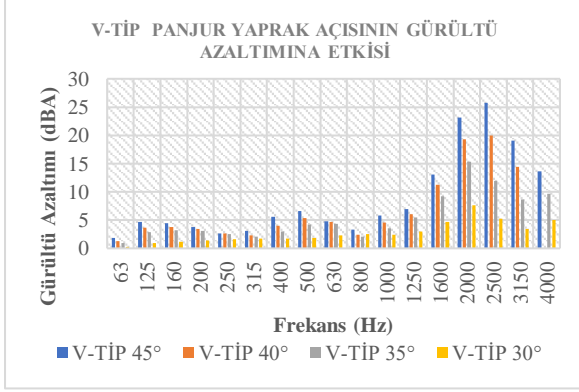
Burada LR test odasındaki ses basınç seviyesini, L_S ses kaynağı odasındaki geçici ve mekânsal ortalama ses basıncı, SW test elemanının alanını ve R_C ise oda sabitini ifade eder. Gürültü azaltma, kaynak ve alıcı ses basınç seviyeleri arasındaki aritmetik farktır (Nakanishi ve ark., 2007).

$$NR = L_S - L_R \quad [db] \quad (3)$$

Bu çalışmada pasif akustik panjur, gürültü azaltma kavramı üzerinden incelenmiştir. Panjurun gösterdiği akustik performans, gürültü azaltmanın büyüklüğü ile orantılıdır. Mahfaza içindeki ses kaynağından v-tip panjura gelen ses dalgalarının panjur yapraklarına çarparak enerjisini, dolayısı ile ısıyı kaybetmesi beklenir. Bu sayede gürültü kaybı elde edilmiş olunur. Bu çalışmada spesifik olarak v-tip bir panjurun radyatör hava atış tarafında kullanılması durumunda göstereceği akustik performans teorik olarak irdelenmiştir. Tablo 1’de geometrik parametreleri paylaşılan, 4 farklı yatayla yaptığı “ α ” açısına (30° , 35° , 40° , 45°) sahip olan v-tip akustik hava panjuru modelleri ANSYS programının akustik modülünde analiz edilmiştir. Akustik analiz sırasında mesh boyutunun dalga boyunun altıda birinden büyük olmaması sağlanmıştır [10, 11].

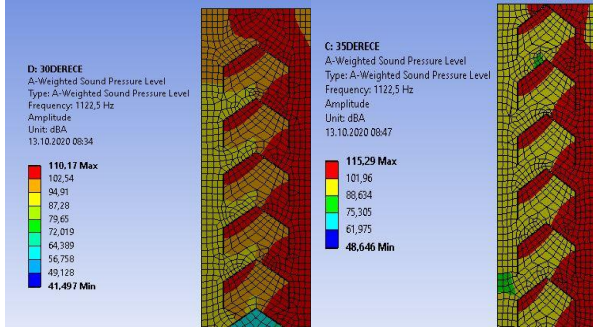
Şekil 11’de V-tip panjur yaprak açısının gürültü azaltımına etkisi ile ilgili grafik paylaşılmıştır. Grafikteki verilere göre yaprak açısı arttıkça gürültü azaltımının tüm frekanslarda arttığı gözlemlenmiştir. 63-1000 Hz aralığında veriler incelendiğinde panjur açısı değişiminin akustik performansa etkisinin 1000-4000 Hz aralığına göre daha az olduğu görülmüştür. Dizel motorların düşük frekansta ürettiği genlikler yüksek frekanslara göre daha fazla olduğu için yaprak

açısının toplam ses seviyesine etkisi azdır. Bütün frekanslara karşılık gelen gürültü azaltımı değerleri tek tek gösterilemeyeceği için Şekil 12 ve 13'te ses basınç seviyesinin yapı üzerindeki dağılımı temsili olarak 1125 Hz için gösterilmiştir.

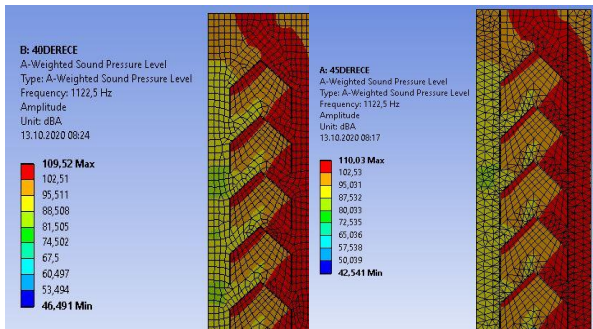


Şekil 11. V-tip panjur yaprak açısının gürültü azaltımına etkisi

0-4000 Hz aralığında elde edilen gürültü azaltımı değerleri Şekil 9'da detaylı olarak paylaşılmıştır.



Şekil 12. 30° ve 35° panjur yaprak açısında ses basıncı dağılımı



Şekil 13. 40° ve 45° panjur yaprak açısında ses basıncı dağılımı

V. SONUÇLAR

Bu çalışmada bir dizel jeneratör kabini radyatör hava atış tarafında kullanılan v tip akustik hava panjuru ele alınmıştır. Panjur yaprağındaki açı değişimi

neticesinde panjurun akustik performans davranışının teorik olarak irdelenmesi amaçlanmıştır. Yöntem olarak sonlu elemanlar ve sonlu hacimler metodu kullanılarak panjurun yaprak açısı ile akustik performans arasında bir korelasyon elde edilmeye çalışılmıştır. Akış analizi ve akustik analizler için sınır koşulları belirlendikten sonra ANSYS mühendislik yazılımı yardımıyla analizler gerçekleştirilmiştir. Öncelikle değişen panjur yaprağı açılarına göre akış analizleri yapılarak oluşan basınç kaybı ortaya konulmuştur. Aynı şekilde değişen panjur yaprağı açılarına göre akustik analizler gerçekleştirilmiştir.

V-tip akustik hava panjurunda yapılan analizler ve buna göre elde edilen sonuçlar göstermektedir ki; Panjurdaki hava hızının karesi ile orantılı olan basınç kaybı değeri, aynı hava giriş hızında her 5°'lik panjur yaprak açısı (α) artışına karşılık yaklaşık olarak 1,4 kat artmaktadır. V-tip panjurun akustik performansı incelendiğinde panjur yaprak açısı (α) arttıkça gürültünün azaldığı görülmüştür. Uygun panjur açısını seçmek hem akustik hem de basınç kaybı parametreleriyle ilgilidir. Dolayısıyla kullanılacak motorun, katalogta yer alan geri basınç kaybı limiti seçim kriteri olmaktadır. Bu çalışma kapsamında Doosan marka D34 ürün kodlu motora ait teknik belge incelendiğinde basınç kaybı limitinin 165 Pa olduğu görülmüştür. HAD analiz sonuçları incelendiğinde 35 derece V-Tip panjurun hem akustik hem basınç kaybı limitleri açısından uygun olduğu görülmüştür.

Gürültü yönetmeliğine göre mevcut ölçülen jeneratör setlerinin ses güç seviyeleriyle limitasyonları sağlanmıştır. Bu limit altında kalabilmek için boyutsal uygunluğu da düşünerek en uygun tasarıma ulaşmak gereklidir. Gürültü kaynakları frekans bantlı olarak incelendiğinde her bir frekans bandında gerekli mertebelerde gürültü düşümü sağlanarak toplam gürültü yönetmeliklere uygun hale getirilir. Sonuçlardan gördüğü üzere 1000 Hz ve üzeri frekanslarda açının artmasıyla aktif bir azalım gerçekleşirken düşük ve orta frekanslarda daha az gürültü düşümü olur. Bu nedenle baskın olan düşük frekanslar düşürülemediği için açı arttırımının etkili bir yöntem olmadığı görülmüştür.

Özellikle 45° yaprak açısına sahip v-tip panjur kullanılması durumunda, 2000 ve 2500 Hz frekans bantlarında gürültü oluşumunda ortalama 25 dB'e varan bir azalma sağlanabildiği görülmüştür. V-tip akustik hava panjuru kullanılmak istenildiğinde, ilk olarak kaynaktan gelen baskın gürültü frekansına bakılmalıdır. Baskın gürültü 0-1000 Hz gibi düşük frekanslarda ise v-tip panjur kullanarak gürültünün

önemli oranda azaltılamayacağından ve sistemin toplam basınç kaybını arttıracığından iyi bir seçenek olmadığı görülmüştür. Baskın gürültü frekansı 1000-4000 Hz aralığında ise kritik basınç kaybı göz önünde bulundurulup gerekli optimizasyon yapılarak uygun yaprak açısına sahip v-tip panjur tasarımının yapılabileceği görülmüştür.

VI. ETİK KURUL ONAYI ve ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

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

KAYNAKLAR

- [1] Calam, A., & İçingür, Y. (2019). Giriş havası sıcaklığının hcci motorun yanma ve performansına etkileri. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 39(1), 69–79.
- [2] Solmaz, H., & Uyumaz, A. (2019). Emme Havası Giriş Basıncı ve Sıcaklığının Homojen Dolgulu Sıkıştırma İle Ateşlemeli (HCCI) Bir Motorda Yanma ve Performansa Etkileri. In *Proceedings on 2nd International Conference on Technology and Science*.
- [3] Hayne, M., Tan, D., Devereux, R., & Mee, D. J. (2019). Static insertion loss, transmission loss and noise reduction testing of an acoustic louvre. In *Proceedings of ACOUSTICS* (Vol. 10).
- [4] Akçay, M., Yılmaz, İ. T., Feyzioğlu, A., & Özer, S. (2019). Sıkıştırma ile Ateşlemeli Bir Motora Hidrojen İlavasının Egzoz Emisyonlarına Etkisi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(3), 21–34.
- [5] Astrauskas, T., Vilniškis, T., Khrystoslavenko, O., Januševičius, T., & Grubliauskas, R. (2018). Experimental research of acoustic louver sound insulation.
- [6] Kaya, A. İ., & Dalgat, T. (2017). Ses yalıtımı açısından doğal liflerin akustik özellikleri. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(Özel (Special) 1), 25–37.
- [7] Schmidt, A. C., Jensen, A. A., Clausen, A. U., Kamstrup, O., & Postlethwaite, D. (2004). A comparative life cycle assessment of building insulation products made of stone wool, paper wool and flax: part 1: background, goal and scope, life cycle inventory, impact assessment and interpretation. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 9, 53–66.
- [8] DeBenedetti, B., Maffia, L., & Rossi, S. (2007). From materials to eco-materials: life-cycle environmental approach for insulation products in building applications. In *Proceedings of the 8th international conference of eco-materials, Brunel University, UK*.
- [9] Nakanishi, T., Nakamura, T., Watanabe, Y., Handou, K., & Kiwata, T. (2007). Investigation of air flow passing through louvers. *Komatsu Tech. Rep.*, 53, 1–9.
- [10] Maciel, M. A., & Duarte, M. A. V. (2014). Analytical modelling of active acoustic louvres. *The CD-ROM: proceedings of ICSV*.
- [11] Özkan, Y., Özsert, İ., Ayhan, V., & Cesur, İ. (2016). Reaktif tip susturucunun iç tasarımının akış ve akustik özelliklerine etkisinin incelenmesi. *Sakarya University Journal of Science*, 20(1), 65–74.
- [12] Ver, I.L., & Beranek, L.L. (2006). *Noise and Vibration Control Engineering: Principles and Applications*. John Wiley & Sons.
- [13] Harris, C.M. (1991). *Handbook of Acoustical Measurements and Noise Control*. McGraw-Hill.
- [14] Harris, C.M. (1991). *Handbook of Acoustical Measurements and Noise Control*. McGraw-Hill.
- [15] Barron, R.F. (2002). *Industrial Noise Control and Acoustics*. Marcel Dekker.
- [16] Mohd Zarif Md Shah, Bambang Basuno, Aslam Abdullah (2020). Comparative Study on Several Type of Turbulence Model Available in ANSYS-Fluent Software for ONERA M6 Wing Aerodynamic Analysis, 15.
- [17] Toshikazu Nakanishi, Tamotsu Nakamura (2007). Investigation of Air Flow passing through Louvers, Komatsu Technical Report, 5.
- [18] Durmuş Sinan Körpe, Özdemir Öztürk Kanat (2019). The Effects of Initial y plus: Numerical Analysis of 3D NACA 4412 Wing Using y-Re(teta) SST Turbulence Model
- [19] Drayad Alkhafajy (2019). Calculate the head loss fort he circular pipes using the Simulink/Matlab.
- [20] Prof. Dr. Abd Alnaby Kabeel, Prof. Dr. El-Sayed El-Aguoz (2020). Modelling the Wake Flow Behind a Model of Horizontal Axis Wind Turbine using RANS Approach: A Comparative Study.
- [21] Batten, P., Goldberg, U. C., & Chakravarthy, S. (1997). "Interfacing block-structured adaptive meshes with finite-volume solvers." *AIAA journal*, 35(3), 482-490.

Arıtılmış Atık Suyun Çimento Esaslı Sistemlerde Karma Suyu Olarak Kullanılmasının Araştırılması

Investigation on the Use of Treated Wastewater as Mixing Water in Cementitious Systems

Serhan ULUKAYA¹

¹Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Davutpaşa Kampüsü, 34220, Esenler, İstanbul, Türkiye

Öz

Ülkemizde ve Dünyada hızla artan nüfusun bir sonucu olarak, doğal su kaynaklarına olan ihtiyaç artmaktadır. Artan su talebi doğal su kaynaklarının tükenmesine yol açarken, buna mukabil artan atık su miktarı da kalan doğal kaynakların kirlenmesine ve özellikle tatlı suların kalitesinin bozulmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, tatlı su kaynaklarının kirlenmesini önlemek için mevcut su kaynaklarının akıllıca kullanılması ve atık suların yeniden kullanılması gerekmektedir. Geri dönüştürülen atık sular parkların, spor tesislerinin ve otoyolların sulanmasının yanı sıra yangınla mücadele, inşaat alanlarında partikül emisyon kontrolü ve beton üretimi için de kullanılabilir. Bu çalışma, şehir atık suyunu arıtan membran biyoreaktörün çıkış suyunun beton üretiminde karma suyu olarak kullanımını araştırmaktadır. Bu atık suyun uygunluğunu değerlendirmek için öncelikle üretilen çimento harçlarının kıvam, priz süresi, birim-hacim ağırlık ve dayanım gelişimi gibi taze ve sertleşmiş hal özellikleri araştırılmıştır. Geri kazanılan su ile üretilen numunelerin priz başlangıç ve bitiş süreleri, damıtılmış su ile üretilen numunelerden elde edilenlerden %25'ten daha az sapma göstermiştir. Farklı su/çimento oranları ve kür koşulları etkisi altında geri kazanılan su, damıtık su ve musluk suyu ile üretilen numunelerin farklı yaşlardaki basınç dayanımları arasında dalgalı bir trend oluşurken; TS EN 1008'e göre yapılan değerlendirmede geri kazanılan su ile üretilen numunelerin damıtık su ile üretilen numunelere göre normalize basınç dayanımının hem 7. günde hem de 28. günde asgari %90'lık limit değerinin üzerinde olduğu görülmüştür. Elde edilen bu sonuçların ardından, çalışmada kullanılan suyun çimento esaslı sistemlerin karma suyu olarak potansiyel taşıdığı, ancak bu çıkarımın dayanıklılık ve donatı korozyon testlerini de içeren ek araştırmalarla desteklenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Atık su, Karma suyu, Priz süresi, Basınç dayanımı

Abstract

As a result of rapidly growing population, the need for natural water resources is increasing. While increasing water demand leads to depletion of natural water resources, the corresponding increase in amount of wastewater causes pollution of the remaining natural resources and deterioration of the quality of fresh water. Therefore, to prevent pollution of freshwater resources, it is crucial to use existing water resources wisely and reuse wastewater. Recycled wastewater can be used for irrigation of parks, sports facilities and highways, as well as for fire-fighting, particulate emission control in construction sites and concrete production. This study focuses on the use of effluent of a membrane bioreactor treating municipal wastewater as mixing water for concrete production. To evaluate the conformity of this wastewater, the fresh and hardened properties of the cement mortars produced, such as consistency, setting time, density and strength development, were monitored. The initial and final setting times of the samples produced with wastewater deviated less than 25% from those obtained from samples produced with distilled water. A fluctuating trend was observed between the compressive strengths of the specimens produced with different water types, however, in evaluation made according to TS EN 1008 demonstrated that the normalized compressive strength of the specimens produced with wastewater was above 90% at both 7th and 28th days. Following these results, it was concluded that wastewater used in the study has potential as mixing water for cementitious systems, but this conclusion should be supported by additional research including durability and reinforcement corrosion tests.

Keywords: Wastewater, Mixing water, Setting time, Compressive strength

I. GİRİŞ

Beton, Dünyada sudan sonra en fazla tüketilen madde ve en fazla kullanılan yapay malzemedir. 2020 yılı verilerine göre Dünyada yıllık beton üretimi yaklaşık 14 milyar m³'tür (çimento üretimi 4,2 milyar ton) [1]. Dünya nüfusunun

8 milyar olduğu kabul edilirse, kişi başına yıllık yaklaşık 2 m³ beton tüketimi gerçekleştiği görülmektedir. Hem küresel hem de yerel ölçekte sürdürülebilir üretim ve kalkınma hedeflerinin ön planda olduğu günümüzde, beton üretiminin de bu hedefler doğrultusunda şekillenmesi kaçınılmazdır. Yarım yüzyılı aşkındır bu konu üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda beton bileşenlerinin doğal kaynaklardan temini yerine geri kazanım yolu ile elde edilen malzemelerden oluşması ya da alternatif malzemelerin kullanılması gibi seçenekler ön plana çıkmıştır. Doğal agrega yerine hafriyat vb. beton atıklardan elde edilen geri kazanılmış agrega kullanılması, üretiminde yüksek enerji sarfiyatı gereken ve yüksek miktarda karbon emisyonu ortaya çıkan klinker/çimento yerine alternatif bağlayıcılar kullanma veya atık durumundaki yapay puzolanlardan yararlanma gibi yöntemler günümüzde yaygın olarak tercih edilen seçeneklerdir.

Geleneksel betonun temel bileşenlerinden biri de sudur. Beton bileşiminde yer alan karma suyunun iki ana fonksiyonu bulunmaktadır. Bunlar, çimento hidratasyonunu sürdürmek ve tanelerin yüzeyi ıslatarak gerekli işlenebilirliği sağlamaktır [2]. Bu iki fonksiyonu yerine getirecek suyun içilebilir kalitede olması tavsiye edilirken, beton karışım suyu olarak kullanılacak kaynağın kontrolü ve uygunluğu için TS EN 1008'de yer alan analizlerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir [3]. Söz konusu standartta öncelikle su kaynakları sınıflandırılırken, bunlardan hangilerinin beton üretiminde kullanılabileceği ve uygunluğunun kontrolü için yapılacak deneysel çalışmalar tarif edilmiştir. Örneğin içilebilir sular herhangi bir deney yapılmaksızın beton üretiminde kullanılabilirken; beton sektöründeki süreçlerden geri kazanılan sular, yer altı kaynaklarından çıkan sular, tabii yüzey suları ve sanayi atık sular belirli bir deneysel işlem sonrası uygunluğu kanıtlandıktan sonra kullanılabilir. Bunların yanı sıra, deniz suyu ve acı göl suları beton için uygun, betonarme sistemler için uygun bulunmazken; kanalizasyon sularının beton üretimi için kullanılması uygun bulunmamaktadır. Yapılan akademik çalışmalar ise daha çok hazır beton sektöründe, özellikle transmikser yıkama suyundan geri kazanılan suların yeniden kullanımı üzerinde yoğunlaşmaktadır [4-10]. Avrupa Hazır Beton Birliği (ERMCO) tarafından hazırlanan raporda transmikserlerin yıkanması amacıyla bir metreküp beton için 50 l'lik su sarfiyatı gerektiği bildirilmiştir [11]. Ülkemizde yaygın olarak transmikserlerin yıkanması ile oluşan yıkama suyu ve içerdiği katı maddeler çökeltme havuzlarına aktarılmakta ve ardından çökeltme havuzlarının en sonundakinden alınan su, beton imalatında ya da transmikser temizliğinde kullanılmaktadır. Benzer başka uygulamalarda, bu havuzlara konumlandırılan karıştırıcılar sayesinde ince katı tanelerin su içerisinde askıda kalması sağlanmakta ve elde edilen su beton üretiminde kullanılmaktadır [12]. Literatürde yer alan bu ve benzeri çalışmalardan

çıkan bir diğer sonuca göre yıkama suyu içindeki ince malzeme, çimento veya ince agrega ile yer değiştirmeli olarak kullanılabilir [13].

Yukarıda irdelenen mevcut durum altında sürdürülebilir beton üretimi için sınırlı doğal su kaynaklarının yetmeyeceği ve geri kazanılmış su türlerinin mutlaka beton üretiminde karışım suyu olarak kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada, diğer su kaynaklarından farklı olarak, Atık Su Arıtma Tesisi membran biyoreaktör çıkışından alınan suyun, çimento bağlayıcılı harçların taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerine etkisi ile TS EN 1008'de tanımlı fiziksel ve mekanik özelliklere göre uygunluğu araştırılacaktır. Söz konusu uygunluğun kontrolü için karışımların üretiminde musluk suyu dışında referans olarak damıtık su kullanılmıştır. Çalışmadan elde edilecek sonuçlar ile araştırmanın derinleştirilmesi ve sonraki araştırmalara yön vermesi amaçlanmaktadır.

II. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Atık su arıtma tesisinden geri kazanılan suyun çimento esaslı sistemlerin fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisini araştırmak amacıyla detayları aşağıda verilen deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda su/çimento oranı 0,40, 0,50 ve 0,55 olan üç farklı seri çimento harcı üretilmiştir. Bu karışımların her birinde şehir şebeke suyu, TS EN 1008'de tanımlı referans su kaynağı olan damıtık su ve arıtılmış atık su olmak üzere üç farklı tip su kullanılmıştır. Üretimde kullanılan malzemeler ve özellikleri aşağıda verilmiştir.

2.1. Kullanılan Malzemeler

2.1.1. Çimento

Üretimlerde Akçansa Çimento'dan temin edilen CEM I 42,5 R sınıfı çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri

Özellik	Sonuç
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,12
Priz Başlama / Bitiş Süresi (dk)	121 / 186
Hacimce Genleşme (mm)	1
Özgül Yüzey (cm ² /g)	3958
SiO ₂ (kütlece, %)	19,77
Al ₂ O ₃ (kütlece, %)	4,72
Fe ₂ O ₃ (kütlece, %)	3,63
CaO (kütlece, %)	63,42
MgO (kütlece, %)	0,68
SO ₃ (kütlece, %)	3,28
Çözünmez Kalıntı (kütlece, %)	0,71
Kızdırma Kaybı (kütlece, %)	2,95
2 / 28 Günlük Dayanım (MPa)	33,3 / 51,7

2.1.2. İnce agrega

Harçlarda ince agrega olarak özgül ağırlığı $2,68 \text{ g/cm}^3$, maksimum tane boyutu 2 mm olan silis esaslı CEN standart kumu kullanılmıştır [14].

2.1.3. Su

Harç üretimlerinde karışım suyu olarak İstanbul şehir şebeke suyu, piyasadan satın alınan damıtık su ve İSKİ Ataköy İleri Biyolojik Atık Su Arıtma Tesisi Membran Biyoreaktör çıkışından alınan su olmak üzere üç farklı su kaynağı kullanılmıştır. Alınan 10 litrelik atık su örneğinden, ki makalenin bundan sonraki bölümlerinde “geri kazanılan su” olarak ifade edilecektir, hazırlanan üçer numune üzerinde yoğunluk ve tabana çöken katı madde tayini yapılmış, katı madde miktarı TS EN 1008’deki limit değere göre kontrol edilmiştir (Tablo 2). Buna ek olarak laboratuvarında yapılan kimyasal iyon analizi sonuçlarına göre geri kazanılan suyun sülfat, çinko, klorür ve fosfat miktarları sırasıyla 340 mg/l , $0,0138 \text{ mg/l}$, 170 mg/l ve $2,14 \text{ mg/l}$ ’dir.

Tablo 2. Geri kazanılan suda yoğunluk ve tespit edilen katı madde miktarı

Numune No.	Yoğunluk (g/cm^3)	Çöken Katı Madde Miktarı (ml)	Çöken Katı Madde için Limit Değer [3]
1	0,999	0,25	
2	1,002	0,63	< 4 ml
3	1,001	0,82	

2.1.4. Kimyasal katkı

Su/çimento (s/ç) oranı 0,40 olan harç serisinin işlenebilirliğini arttırmak ve aynı zamanda geri kazanılan suyun polimer esaslı bir kimyasal katkı ile uyumunu kontrol etmek amacıyla yüksek oranda su azaltan polikarboksilat esaslı Plastol Ultra 209 hiperakışkanlaştırıcı (H.A.) beton katkısı kullanılmıştır. Katkının özellikleri Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Kimyasal katkı maddesinin özellikleri

Özellikler	Analiz Sonuçları
Fiziksel Yapısı ve Renk	Sarımtırak, homojen sıvı
pH / Yoğunluk (kg/l)	2-4 / 1,05-1,10

2.2. Harç Üretimi, Kürü ve Kodlanması

Deneysel çalışma kapsamında üretilen çimento bağlayıcı karışımlarda 0,40, 0,50 ve 0,55 olmak üzere üç farklı s/ç oranı kullanılmıştır. Su/çimento oranı 0,40 olan harç serisinin ön üretimlerinde görülen düşük işlenebilirliğin kalıba yerleşme problemi oluşturacağı düşünüldüğünden; aynı zamanda polimer esaslı kimyasal bir katkının geri kazanılan su ile kullanımının özellikle priz süresine etkisi araştırıldığından bu seride –çimento kütlelerine oranla– %1 oranında hiperakışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Tüm serilerde

çimento:kum oranı ağırlıkça (1:3) olmak üzere sabittir. Karıştırma işlemleri TS EN 196-1’de standart harç üretimi için tarif edildiği şekilde yapılırken, tüm serilerin yukarıda belirtilen karışım oranlarına uygun şekilde hazırlanan örnek malzeme miktarları Tablo 4’te verilmiştir.

Sertleşmiş harç deneyleri için kalıba yerleştirilen numuneler havada ve suda olmak üzere iki ayrı kür koşuluna tabi tutulmuştur. Havada kür edilen numuneler sıcaklığı $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ve bağıl nemi % 55 ± 5 olan nem kabini muhafaza edilmiştir. Suda kür edilen numuneler ise sıcaklığı $20 \pm 2^\circ\text{C}$ olan kirece doygun şebeke suyu ile dolu havuzlarda muhafaza edilmiştir. Deney yaşı gelen ve su küre maruz bırakılan numuneler, deney öncesi sudan çıkarılmış ve yüzeyi tamamen kuruduktan sonra deneye geçilmiştir.

Üretilen numunelerde kodlama işlemi, üretimde kullanılan su kaynağı ve su/çimento oranları dikkate alınarak yapılmıştır. Şehir şebeke musluk suyu ile üretilen harçlar M harfi ile başlarken, damıtık su ile üretilen harçlar D ve geri kazanılan su ile üretilen harçlar G harfiyle başlamaktadır. İlk harften sonra gelen sayı ise su/çimento oranını göstermektedir. Örneğin M/50 kodu harç üretiminde şebeke musluk suyu kullanıldığını ve s/ç oranının 0,50 olduğunu; G/40 kodu ise harç üretiminde geri kazanılan su kullanıldığını ve s/ç oranının 0,40 olduğunu göstermektedir.

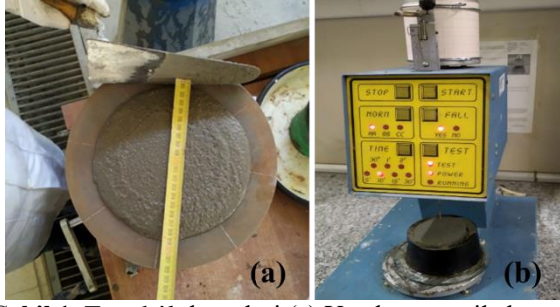
Tablo 4. Karışımların malzeme miktarları

Harç Kodu	Çimento (g)	Su (g)	Kum (g)	Hiper-Akış. (g)
M-D-G/40	450	180	1350	4,5
M-D-G/50	450	225	1350	-
M-D-G/55	450	247,5	1350	-

2.3. Yöntem

2.3.1. Kıvam tayini

Üretilen harçların taze haldeki işlenebilirliğini değerlendirmek için TS EN 1015-3’e uygun şekilde yayılma deneyi ile kıvam tayini yapılmıştır [15]. Buna göre üst çapı 70 mm, alt çapı 100 mm olan 60 mm yüksekliğe sahip kesik koni şekilli kalıp 2 tabaka halinde harç ile doldurulmuş, her bir tabaka tokmak kullanılarak 10 kısa vuruş ile sıkıştırılmıştır. Kalıp üst yüzeyinden taşan harç, mala yardımı ile alındıktan sonra kalıp düşey doğrultuda çekilerek kaldırılmış; ardından, yayılma tablası yaklaşık olarak saniyede bir defa olmak üzere 15 defa düşürülerek harç kütlelerinin yayılma tablası üzerinde yerleşmesi sağlanmıştır. Deney sonunda harç kütlelerinin birbirine iki dik doğrultudaki yayılma çapları (d_1 , d_2) ölçülmüş (Şekil 1.a), ortalama yayılma çapları hesaplanarak elde edilen tüm sonuçlar Bölüm 2.4.1’de yer alan Tablo 5’te verilmiştir.



Şekil 1. Taze hâl deneyleri (a) Yayılma çapı ile kıvam tayini deneyi (b) Priz süresi deneyi

2.3.2. Priz süresi

Üretilen harçların priz başlangıç ve bitiş sürelerini belirlemek için TS EN 196-3'e göre priz deneyi gerçekleştirilmiştir [16]. Buna göre, önce s/ç oranı 0,30 olan standart kıvamda çimento hamurları üretilmiştir. Bunun yanı sıra, geri kazanılan suyun kimyasal katkı ile uyumunu kontrol etmek için s/ç oranı 0,20 olan -çimento ağırlığına göre- %1 katkılı standart kıvamda çimento hamuru üretilmiştir. Otomatik Vicat cihazı üzerindeki standart kalıba yerleştirilen hamurların üzerine 10 dakika aralıklarla Vicat iğnesi batırılmıştır. İğneyle taban plakası arasındaki mesafenin (6 ± 3) mm olduğu ana kadar geçen süre, çimentonun priz başlangıç süresi olarak; iğnenin numuneye ilk defa $\sim 0,5$ mm girdiği ana kadar geçen süre ise priz bitiş süresi olarak dikkate alınmıştır (Şekil 1.b). Elde edilen tüm sonuçlar ve TS EN 1008'deki limit değerler Bölüm 2.4.2'de yer alan Tablo 6'da sunulmuştur.

2.3.3. Birim-hacim ağırlığın belirlenmesi

Sertleşmiş harç numunelerin 28. gündeki birim-hacim ağırlıkları 5 cm'lik küp numuneler kullanılarak ve TS EN 12390-7 standardında tarif edilen yöntemler kullanılarak belirlenmiştir [17]. Numunelerin kütle ölçümü için standartta ifade edilen "teslim alındığı durumdaki kütle ölçümü" yapılmıştır. Buna göre, nem kabiniinde sabit sıcaklık ve nemde muhafaza edilen numunelerin doğrudan; suda bekletilen numunelerin ise yüzeyi kurulandıktan sonra kütle ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Hacim ölçümü için yine standartta belirtilen "küp şekilli numunelerde belirtilmiş boyutların kontrol edilerek kullanılmasıyla hesaplama" yöntemi kullanılmıştır. Yapılan kütle ve hacim ölçümleri kullanılarak harç serilerinin birim-hacim ağırlıkları hesaplanmıştır. Her bir seri için üçer numune kullanılarak ortalama birim-hacim ağırlıkları hesaplanmış, sonuçlar Bölüm 2.4.3'te sunulan Şekil 2 ve 3'te verilmiştir.

2.3.4. Basınç deneyi

Harçların basınç dayanımlarını belirlemek için üretilen harçlar 5 cm'lik küp kalıplara yerleştirilmiştir. Yukarıda açıklandığı gibi havada ve suda kür edilen bu numuneler erken dayanım takibi için 7. günde, standart dayanım için 28. günde basınç testine tabi tutulmuştur. ASTM C109 standardına [18] uygun şekilde her bir harç serisi için üçer numunede $0,6\pm 0,2$ MPa/sn'lik yükleme hızı ile gerçekleştirilen basınç testi sonucunda

elde edilen kırılma yükü, yüklemenin yapıldığı kesit alanına bölünerek basınç dayanımları hesaplanmış, ortalama sonuçlar Bölüm 2.4.4'te sunulan Şekil 4 ve 5'te verilmiştir.

2.4. Sonuçlar ve Değerlendirme

2.4.1. Kıvam

Kıvam deneyi sonuçlarına göre her bir farklı s/ç oranında üretilen seriler için ortak olmak üzere geri kazanılan su ile üretilen harçların yayılma çapları diğer su kaynakları ile üretilen harçların yayılma çaplarına yakın değerler almıştır (Tablo 5). Geri kazanılan sudaki çöken katı madde miktarının oldukça düşük olmasının, yayılma çaplarında görülen benzerliğin nedeni olduğu düşünülmektedir. Şunu da hatırlatmak gerekir ki M-D-G/40 serilerinde görülen yüksek yayılma çapı değerlerinin nedeni %1 hiper-akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılmasıdır. Ön üretimlerde katkısız olarak üretilen bu seriler için yayılma çapı değerleri 150 mm'nin altında çıkmıştır.

Tablo 5. Kıvam deneyi sonuçları

Harç Kodu	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	d _{ort} (mm)
M/40	195	200	198
D/40	190	190	190
G/40	200	200	200
M/50	170	165	168
D/50	165	170	168
G/50	165	165	165
M/55	185	190	188
D/55	185	185	185
G/55	190	195	192

2.4.2. Priz başlangıç ve bitiş süreleri

Tablo 6'da sunulan priz süresi sonuçlarına göre aynı s/ç oranı ile üretilen kimyasal katkısız hamurlar dikkate alındığında geri kazanılan su kullanımının priz başlangıç ve bitiş sürelerinde belirgin bir değişime yol açmadığı görülmektedir. Bouaich vd. tarafından arıtılmış atık sular ile üretilen çimento hamurlarının priz sürelerinde de benzer şekilde önemsenmeyecek düzeyde bir değişim gerçekleşmiştir [19]. TS EN 1008'e göre beton karma suyu olarak uygunluğu araştırılan su ile yapılan testlerde priz başlangıç süresi, 60 dakikadan daha erken olmamalı ve damıtık su ile üretilen hamurda gerçekleştirilen referans ölçümlerden belirlenen priz başlangıç süresine kıyasla % 25'in üzerinde değişim göstermemelidir. Öte yandan, priz bitiş süresi 12 saatten daha fazla olmamalı ve damıtık su ile üretilen hamurda gerçekleştirilen referans ölçümlerden belirlenen priz bitiş süresine kıyasla % 25'in üzerinde değişim göstermemelidir. Bu limit değerler ve Tablo 6'da verilen deney sonuçları dikkate alındığında geri kazanılan su ile üretilen hamurların priz başlangıç süresinin 60 dakikalık limit değerinin üzerinde olduğu; priz bitiş süresinin de 210 dakika ile 12 saatlik limit değerinin altında olduğu görülmüştür. Bir diğer uygunluk kriteri olan damıtık su ile üretilen referans hamurdan maksimum %25'lik sapma değeri kontrol edildiğinde, priz başlangıç süresinde herhangi bir değişiklik olmadığı, priz bitiş süresinde ise %5'lik bir

değişim olduğu ve bu değer limit sapma değerinin altında olduğu görülmüştür.

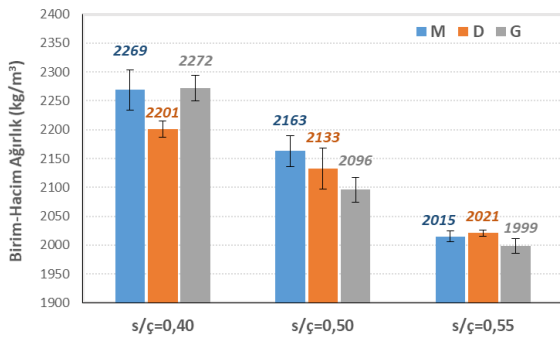
Tablo 6. Priz süresi deneyi sonuçları

Su/çimento Oranı / Su Türü	Priz Başlangıç Süresi (dk.)	Priz Bitiş Süresi (dk.)	TS EN 1008'deki Limit Değerler
0,3 / M	120	200	* $t_{baş} \geq 60$ dk. * $t_{bit} \leq 12$ sa.
0,3 / D	120	200	* Damıtık su ile üretilen hamurun priz başlangıç ve bitiş sürelerine göre maksimum %25 sapma
0,3 / G	120	210	
0,2 / G (+ %1 H.A.)	140	240	

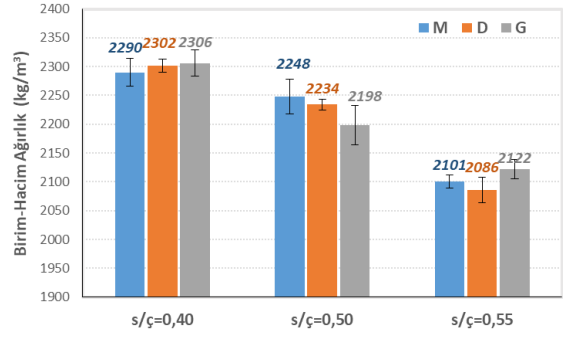
Geri kazanılan su ve %1 hiper-akışkanlaştırıcı kimyasal katkı ile üretilen hamurların uygunluğu kontrol edildiğinde priz başlangıç ve bitiş sürelerinin $t_{baş} \geq 1$ saat ve $12 \text{ saat} \leq t_{bit}$ olarak verilen limit değerlere uyduğu; ayrıca, priz başlangıç ve bitiş süresi için sırasıyla %17 ve %20'lik sapma değerlerinin de ilgili standartta verilen maksimum %25'lik sınıra altında kaldığı tespit edilmiştir.

2.4.3. Birim-hacim ağırlık

Havada ve suda kür edilen numunelerin birim-hacim ağırlıkları karşılaştırıldığında farklı değişim trendleri olsa da değerler arasında belirgin farklılıklar bulunmamaktadır. Her bir s/ç oranında en düşük birim-hacim ağırlık değeri referans alındığında diğer su kaynakları ile üretilen harçların birim-hacim ağırlıkları %0,7 ila %3,2 arasında değişmektedir. Özellikle geri kazanılan su ile üretilen harçlar ile diğer su kaynakları ile üretilen harçlar karşılaştırıldığında birim-hacim ağırlık değerlerinde göze çarpan açık bir farklılık olmadığı görülmüştür. Yine geri kazanılan su ile üretilen harçların tekil birim-hacim ağırlık değerlerine bakıldığında harç numunelerin üniform bir yapı sergilediği tespit edilmiştir.



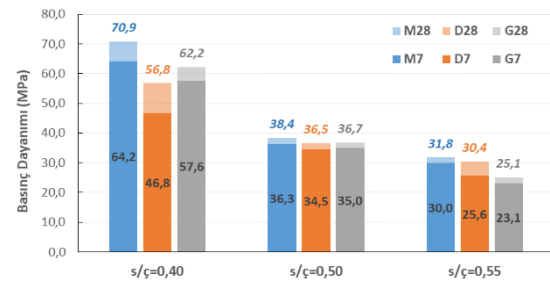
Şekil 2. Havada kür edilen numunelerin birim-hacim ağırlıkları



Şekil 3. Suda kür edilen numunelerin birim-hacim ağırlıkları

2.4.4. Basınç dayanımı

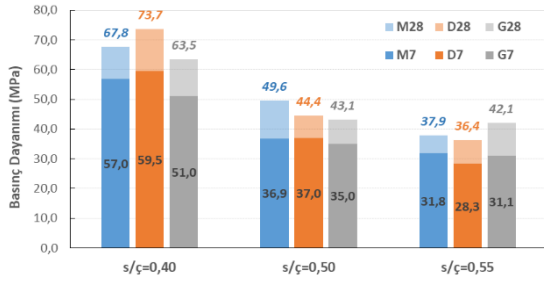
Havada kür edilen harç serileri irdelendiğinde (Şekil 4), s/ç oranı 0,40 olan seride şebeke suyu ve damıtık su ile üretilen harçların 7 ve 28 günlük dayanımlarında belirgin bir fark olduğu görülmüştür. Şebeke suyu ile üretilen harçların 7 ve 28. günlerdeki dayanımı damıtık su ile hazırlanan harçlara göre sırasıyla yaklaşık %37 ve %25 daha fazladır. Benzer şekilde, aynı s/ç oranı için şebeke suyu ile üretilen harçların dayanımı, geri kazanılan su ile üretilen harçların dayanımından yüksektir; ancak değişim yüzdesi (7. ve 28. günler için sırasıyla yaklaşık %12 ve %14) daha düşüktür. Literatürde değişik oranlarda geri kazanılmış su içeren betonlarda yapılan bir çalışmada, elde edilen basınç dayanımlarının şebeke suyu ile üretilen betonların basınç dayanımının %85-94 mertebesine düştüğü, ayrıca diğer mekanik özelliklerinin de (eğilme dayanımı, elastisite modülü) olumsuz yönde değiştiği belirtilmiştir; bu sonucun geri kazanılan su içerisindeki katı maddelerin etrenjit bulundurmasına ve bunların da suda çözünerek gözenekli bir yapı oluşturmaya bağlanmıştır [20].



Şekil 4. Havada kür edilen harçların 7 ve 28 günlük basınç dayanımları

Diğer s/ç oranları ile üretilen serilerin dayanımları karşılaştırıldığında, genel olarak yukarıda belirtilen seviyede bir değişim olmadığı görülmüştür. Sadece s/ç=0,55 olan seride şebeke suyu ile üretilen harçların dayanımları ile geri kazanılan su ile üretilen harçların dayanımları arasında 7. ve 28. günler için yaklaşık %27 ve %30 farklılık vardır. Son olarak havada kür edilen tüm numunelerin dayanım gelişimleri takip edildiğinde 7 günlük dayanım değerlerinin 28 günlük dayanım değerlerinin genellikle %90'ından büyük olduğu; bir

başka deyişle, standart dayanım değerlerinin ~%90'ının ilk bir hafta içinde kazanıldığı belirlenmiştir.



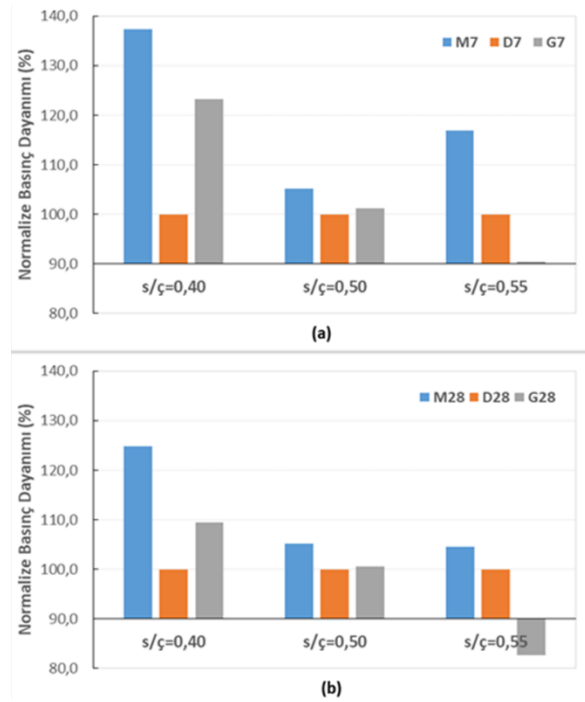
Şekil 5. Suda kür edilen harçların 7 ve 28 günlük basınç dayanımları

Suda kür edilen numunelerin basınç dayanımları irdelendiğinde (Şekil 5), havada kür edilen numunelerden farklı olarak, bu kez en yüksek dayanım değerlerinin (7 ve 28. günler için sırasıyla 59,5 MPa ve 73,7 MPa) damıtık su ile üretilen harç grubunda olduğu görülmektedir. Bu grubun dayanım değerleri, şebeke suyu ve geri kazanılan su ile üretilen harçların 28 günlük dayanımları ile karşılaştırıldığında sırasıyla %9 ve %16 oranında daha yüksek basınç dayanımına sahiptir. Su/çimento oranı 0,50 olan serilerin 7 günlük dayanımları arasında bariz bir farklılık bulunmazken; 28 günlük dayanımlar irdelendiğinde, şebeke suyu ile üretilen harç dayanımlarının diğer iki harç grubuna göre ~%10-15 oranında yüksek olduğu görülmüştür. Son olarak s/ç oranı 0,55 olan seriler incelendiğinde, 7 günlük dayanım değerlerinin birbirine yakın olduğu görülürken, 28 günlük dayanımı en yüksek olan harç grubu geri kazanılan su ile üretilen seridir.

Literatürde benzer su kaynakları ile yapılan çalışmaların ilgili bölümleri incelendiğinde, elde edilen sonuçların bu çalışmadaki sonuçlarla yakınlık gösterdiği tespit edilmiştir. Örneğin Soltanianfard vd. yaptıkları çalışmada farklı filtreleme aşamalarından temin ettikleri atık suları karma suyu olarak kullanmış, elde ettikleri basınç dayanımı sonuçlarında bu çalışmadakine benzer şekilde dalgalı bir trend görmüşlerdir [21]. Öte yandan, Abushanab vd.'nin su kürü uyguladıkları 7, 28 ve 90 günlük çimento harcı numunelerinden elde ettikleri tüm basınç dayanımları değerlerinin az da olsa referans numunelerden düşük çıktığı ifade edilmiştir. Araştırmacılar bu düşüşü arıtılmış suda bulunan askıdaki katı maddeler, çinko ve fosfatın çimento hidrasyonunu geciktirmesine ve çimento-agrega arayüzey bölgesini zayıflatmasına bağlamaktadır [22]. Bu çalışmada kullanılan arıtılmış sudaki askıda katı madde oranı vb. safsızlıkların az oluşunun dayanımdaki söz konusu farklılığın kaynağı olduğu düşünülmektedir ki bu durum Venkatesan vd. tarafından yapılan çalışma ile kanıtlanmıştır. Yazarlar yaptıkları kapsamlı çalışmada kullandıkları beş farklı su kaynağı ile ürettikleri numunelerin taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerini incelemiş ve genel olarak su içeriğinin bu özellikleri baskın şekilde değiştirdiği;

ancak dayanıklılık göz ardı edilirse dayanım açısından arıtılmış suların karma suyu olarak beton üretiminde kullanılabilirliğini belirtmiştir [23].

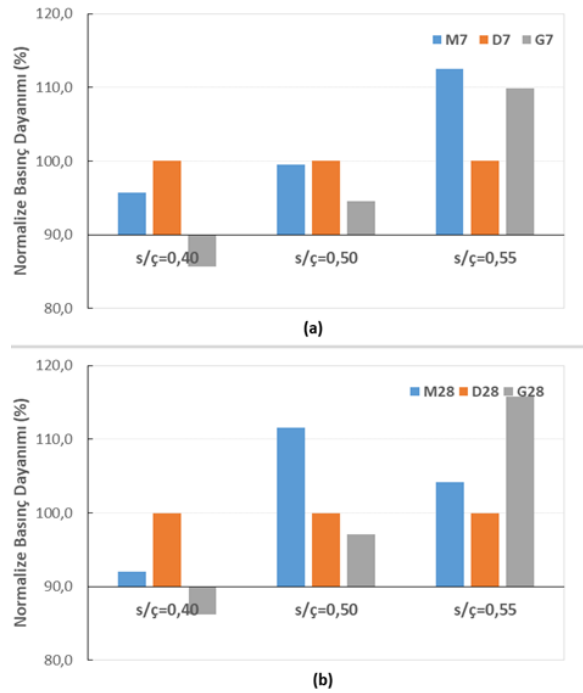
TS EN 1008'e göre karışım suyu olarak kullanılabilirliği araştırılan su kaynağının dayanım açısından uygunluğu için bu su ile üretilen harçların 7 ve tavsiye olarak 28 günlük dayanımının, damıtık su ile üretilen aynı yaşlardaki referans harç dayanımına oranının %90'ın üzerinde olması gerekmektedir. Damıtık su ile üretilen referans harcı ise TS EN 196-1'e göre s/ç oranı 0,50 olan ve suda kür edilen standart çimento harcıdır. Yukarıda açıklanan uygunluk kriteri uyarınca deneysel çalışma kapsamında üretilen tüm harçların basınç dayanımları, damıtık su ile üretilen harçların basınç dayanımına göre normalize edilmiş, sonuçlar Şekil 6 ve 7'de sunulmuştur.



Şekil 6. Havada kür edilen numunelerin (a) 7 günlük (b) 28 günlük normalize basınç dayanımları

TS EN 1008'deki s/ç oranı ve kür koşullarına göre incelendiğinde geri kazanılan su ile üretilen harçların basınç dayanımının hem 7. günde hem de 28. günde %90'lık asgari limit değerinin üzerinde olduğu görülmüştür. Şekil 7'de verildiği üzere s/ç oranı 0,50 olan ve geri kazanılan su ile üretilen harçların normalize dayanım değerleri 7 ve 28. günler için sırasıyla %95 ve %97'dir. Kür koşulları aynı ancak farklı s/ç oranlarına bakıldığında s/ç oranı 0,40 olan harçların 7 ve 28 günlük normalize dayanımlarının limit değerinin altında olduğu görülürken; birim çimento kütlelerine daha çok su düşen s/ç=0,55 olan seri de hem 7. günde hem de 28. günde normalize basınç dayanımları %100'ün üzerindedir. Su/çimento oranı 0,40 olan harçlardaki söz konusu normalize basınç dayanımı düşüşünün, sadece bu serilerde kullanılan kimyasal katkı ile geri kazanılan suyun

uyumsuzluğundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Havada kür edilen tüm serilerde, sadece $s/\ç=0,55$ serisi hariç, geri kazanılan su ile üretilen harçların normalize dayanım değerleri %90'ın üzerindedir. Geri kazanılan su ile üretilen harçların bu $s/\ç$ grubundaki normalize dayanımları 7. ve 28. günler için sırasıyla %90 ve %83'tür. Her iki kür koşulunda da $s/\ç=0,55$ olduğu durumda uç sonuçların çıkması dikkat çekici bir başka noktadır.



Şekil 7. Suda kür edilen numunelerin (a) 7 günlük (b) 28 günlük normalize basınç dayanımları

III. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Doğal su kaynakları hızla tükenirken, insanoğlunun sudan sonra en fazla tükettiği madde olan beton üretiminin giderek artması ve bu yapı malzemesinin üretiminde de su kullanılması araştırmacıları farklı su kaynaklarının kullanılması konusunda arayışlara yönlendirmiştir. Bu çalışmada, İSKİ Ataköy İleri Biyolojik Atık Su Arıtma Tesisi'nden alınan membran biyoreaktör çıkış suyunun çimento bağlayıcı sistemlerde karma suyu olarak kullanılabilirliği fiziksel ve mekanik özellikler yönüyle araştırılmış, elde edilen genel sonuçlar ve öneriler aşağıda sunulmuştur:

- Araştırılan su ile üretilen harçların işlenebilirliği ile referans alınan diğer su kaynaklarının işlenebilirliği kıyaslandığında belirgin bir farklılık gözlenmemiştir. Yapılan kıvam deneylerinde -farklı su/çimento oranlarına sahip tüm karışımlarda geçerli olmak üzere- geri kazanılan su ile üretilen harçlardaki yayılma çapı farklılığının ± 10 mm'lik sınırlar içinde kaldığı görülmüştür.
- Priz süreleri göz önüne alındığında geri kazanılan su kullanımının priz başlangıç

süresinde belirgin bir değişikliğe yol açmadığı, priz bitiş süresinde ise 10 dakikalık önemsiz bir artışa neden olduğu tespit edilmiştir.

- Her bir $s/\ç$ oranında geçerli olmak üzere, en düşük birim-hacim ağırlık değerinin referans alındığı duruma göre harçların birim-hacim ağırlıklarındaki değişim %0,7 ila %3,2 arasında kalmıştır. Bu durumun geri kazanılan sudaki çöken katı madde miktarının oldukça düşük olmasının bir sonucu olduğu düşünülmektedir.
- Serilerin basınç dayanımları kontrol edildiğinde elde edilen sonuçların su/çimento oranına ve kür koşuluna göre dalgalanma gösterdiği; bununla birlikte, kür koşullarına ve $s/\ç$ oranına bakılmaksızın geri kazanılan su ile üretilen tüm harçların 28 günlük basınç dayanımlarının 25 MPa'nın üzerinde olduğu görülmüştür. Söz konusu değer sadece suda kür edilen numuneler için kontrol edildiği zaman ölçülen 28 günlük basınç dayanımlarının 40 MPa'nın üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Öte yandan, tüm su/çimento oranları ve kür koşulları dikkate alınarak, sadece musluk suyu ve geri kazanılan suyun basınç dayanımları karşılaştırıldığında dayanımın ~%20-25 aralığında düşüş gösterebileceği belirlenmiştir.
- TS EN 1008 standardında bir su kaynağının beton karma suyu olarak uygunluğunun tespiti için kapsamlı bir deneysel çalışma tarif edilmiş olup, buradan elde edilecek sonuçlara dair gerek/sınır değerler yine standartta belirtilmiştir. Bunlardan askıda katı madde analizindeki çökelti miktarı, priz süresi ve basınç dayanımı için gereklilikler dikkate alındığında araştırılan su kaynağının karma suyu olarak kullanımının uygun olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, yine standartta tarif edilen diğer tüm analizlerin yapılarak araştırılan suyun uygunluğu kontrol edilmelidir. Beton ve betonarme sistemlerde özellikle dayanıklılık hususunda olumsuz etki oluşturacak sülfat ve klorür iyonları ile organik madde varlığı mutlaka sorgulanmalıdır.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, araştırılan su türünün beton karma suyu için alternatif bir kaynak potansiyeli taşıdığını göstermiştir. Ancak bu çalışmadaki deneysel çalışma ve TS EN 1008'de tarif edilen diğer analizler, bir su kaynağının beton karma suyu olarak kullanılabilirliğinin teyidi için yeterli değildir. Betonun uzun bir süre boyunca çevre koşullarının etkisi altında yeterli performansı gösterebilmesi için farklı bir su kaynağı ile üretilecek betonu özellikle dayanıklılık açısından değerlendirmek ve hatta çelik donatılı bir sistemde korozyon riskini irdelemek uygun bir yaklaşım olacaktır.


TEŞEKKÜR

Çalışmanın ana unsuru olan su örneğinin temini için YTÜ Çevre Mühendisliği öğretim üyesi Doç. Dr. Neslihan MANAV DEMİR'e ve İSKİ'ye; çimento tedariki için AKÇANSA Çimento'ya teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

- [1] Global Cement and Concrete Association, <https://gccassociation.org/concretefuture/cement-concrete-around-the-world>, (Temmuz 2024).
- [2] Erdoğan, T.Y. (2003). Beton. 1. baskı, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayınları, Türkiye, s. 116-118.
- [3] TS EN 1008 (2003). Beton-Karma suyu-Numune Alma, Deneyler ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su Dahil, Suyun, Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları. Ankara, Türkiye.
- [4] Sandrolini, F. ve Franzoni, E. (2001). Waste wash water recycling in ready-mixed concrete plants. *Cem. Concr. Res.*, 31, 485-489.
- [5] Su, N., Miao, B. ve Liu, F.S. (2002). Effect of Wash Water and Underground Water on Properties of Concrete. *Cem. Concr. Res.*, 32, 777-782.
- [6] Ekolu S.O. ve Dawneerangen, A. (2010). Evaluation of recycled water recovered from a ready-mix concrete plant for reuse in concrete. *J. S. Afr. Inst. Civ. Eng.*, 52, 77-82.
- [7] Tsimas, S. ve Zervaki, M. (2011) Reuse of Waste Water from Ready-mixed Concrete Plants. *Management of Environmental Quality: An Inter. J.*, 22(1), 7-17.
- [8] Wasserman, B. (2012). Wash Water in the Mix: Effects on the Compressive Strength of Concrete. *Int. J. Construct. Educ. Res.*, 8(4), 301-316.
- [9] Asadollahfardi, G., Asadi, M., Jafari, H., Moradi, A. ve Asadollahfardi, R. (2015). Experimental and Statistical Studies of Using Wash Water from Ready-mix Concrete Trucks and a Batching Plant in the Production of Fresh Concrete. *Constr. Build. Mater.*, 98, 305-314.
- [10] Audo, M., Mahieux, P. ve Turcry, P. (2016). Utilization of Sludge from Ready-mixed Concrete Plants as a Substitute for Limestone Fillers. *Constr. Build. Mater.*, 112, 790-799.
- [11] Avrupa Hazır Beton Birliği (ERMCO) (2006). Guidance on Concrete Wash Water in the European Ready Mixed Concrete Industry. Brüksel, Belçika.
- [12] Doğan, Ü.A. ve Özkul, M.H. (2019). Hazır Beton Tesisinde Geri Kazanılan Suyun Beton Basınç Dayanımı ve Kılcallık Üzerine Etkisi. *Türkiye Hazır Beton Birliği Hazır Beton Dergisi*, 154, 73-78.
- [13] Özkul, M.H. ve Doğan, Ü.A. (2016). Transmikser Yıkama Suyunun Hazır Beton Üretiminde Geri Dönüşümü. *Türkiye Hazır Beton Birliği Hazır Beton Dergisi*, 137, 82-86.
- [14] TS EN 196-1 (2016). Çimento Deney Metotları - Bölüm 1: Dayanım Tayini. Ankara, Türkiye.
- [15] TS EN 1015-3 (2000). Kagir Harcı- Deney Metotları - Bölüm 3: Taze Harç Kıvamının Tayini (Yayılma Tablası ile). Ankara, Türkiye.
- [16] TS EN 196-3 (2017). Çimento Deney Yöntemleri - Bölüm 3: Priz Süreleri ve Genleşme Tayini. Ankara, Türkiye.
- [17] TS EN 12390-7 (2019). Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 7: Sertleşmiş Betonun Birim Hacim Kütlesinin Tayini. Ankara, Türkiye.
- [18] ASTM C109 (2020). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 50-mm Cube Specimens). USA.
- [19] Bouaich, F.Z., Maherzi, W., Benzerzour M., Taleb M., Abriak N-E., Rais, Z. ve Senouci, A. (2022). Mortar Mixing Using Treated Wastewater Feasibility. *Constr. Build. Mater.*, 352, 1-12.
- [20] Chatveera, B., Lertwattanaruk, P. ve Makul, N. (2006). Effect of Sludge Water from Ready-mixed Concrete Plant on Properties and Durability of Concrete. *Cem. Concr. Comp.*, 28, 441-450.
- [21] Soltanianfard, M.A., Abuhishmeh, K., Jalali, H.H. ve Shah, S.P. (2023). Sustainable Concrete Made with Wastewater from Different Stages of Filtration. *Constr. Build. Mater.*, 409, 1-13.
- [22] Abushanab, A. ve Alnahhal, W. (2022). Performance of Sustainable Concrete Incorporating Treated Domestic Wastewater. *Constr. Build. Mater.*, 329, 1-15.
- [23] Venkatesan, G., Kumar, A., ve Perumal, P. (2021). Fresh and Hardened Properties of Five Non-Potable Water Mixed and Cured Concrete: A Comprehensive Review. *Constr. Build. Mater.*, 309, 1-12.

Narrow Bandwidth and Tunable Mid-Infrared Thermal Emitter Design Based on Double Asymmetric Dielectric Metasurfaces

Osman Safa ÇİFÇİ ¹

¹*Bogazici University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, İstanbul, Türkiye*

Abstract

Thermal emitters working in the mid-infrared (MIR) region are indispensable in many applications, such as sensing, thermophotovoltaics, and imaging. Resonance wavelength tunability, high efficiency, cost-effectiveness, and high quality (Q) factor are desirable properties of thermal emitters. Selective thermal emitters have been realized using metallic metasurfaces, which, due to ohmic losses, do not exhibit very sharp emission peaks. Recently, metasurfaces possessing very high Q factors made of dielectric materials with asymmetric features that exploit quasi-bound states in the continuum are introduced. The dielectric metasurface-based thermal emitters shown in the literature have a single type of asymmetry, such as a difference in the length of resonators or angular separation of resonators. However, resonance wavelength and thermal emissivity could be tuned by having multiple types of asymmetries. This study proposes a structure consisting of a zigzag array of silicon rectangular bars with different lengths as resonators. Gold is the choice of the substrate with a dielectric layer made of Al₂O₃ sandwiched between gold substrate and silicon bars. Based on the conducted simulations, an emissivity value exceeding 0.99 with a Q factor of 116 at the resonance wavelength of 5.818 µm was obtained when the silicon bars were separated by $\pi/25$ from the origin in opposite directions with a length asymmetry factor of 0.3. Additionally, independent tuning of emissivity intensity and resonance wavelength is displayed. Such findings can lead to bespoke thermal emitter designs.

Keywords: Thermal emitter, dielectric metasurface, high-Q resonators, tunable metasurface

I. INTRODUCTION

An object with a temperature above absolute zero emits electromagnetic energy to its surroundings, a phenomenon known as thermal radiation, which is intensely studied by scientists for a range of applications, including sensing, infrared camouflage, and thermal energy utilization [1]. Conventional thermal emitters are broadband, omnidirectional, and polarization-independent. These properties are undesirable for many use cases. For instance, certain chemicals such as polymers have sharp absorption bands, and it is highly convenient to have access to a thermal emitter that matches the absorption band of the analyte of interest rather than coupling broadband thermal emitters with filters, which waste most of the energy coming from the emitter [2]. Furthermore, in a thermophotovoltaic system, a wavelength-selective emitter that matches the bandgap of a photovoltaic cell is required [3]. Hence, tunable high Q factor thermal emitters are essential to various technologies. One-dimensional [4] or two-dimensional photonic crystals [5], plasmonic metasurfaces [6], and dielectric metasurfaces [7] with micro/nanometer resolution have been proposed in the literature to satisfy such requirements. Kirchhoff's and Planck's law state that emissivity equals to absorptivity for reciprocal systems; highly efficient thermal emitters also act as highly efficient absorbers in the wavelengths of interest. Thus, a designed structure emits at the same wavelength at which it absorbs once heated to a high enough temperature. The most common way to explain the resonance quality is to use the Q (quality) factor, which is the resonance wavelength divided by the width at half the intensity. A higher Q factor means sharper absorption/emissivity peaks. One of the most employed designs utilizes an insulator spacer layer sandwiched between two metal layers, which is popular due to ease of design and fabrication [8]. Unfortunately, Ohmic losses in the metal widen the absorption peak, resulting in lower Q factors. Indeed, metal-insulator-metal configurations reported in the literature have Q factors of less than 20 [2, 9]. Structures using dielectrics to support resonances are proposed to overcome the plasmonic ohmic losses and heating problems, and they have been shown to perform with higher Q factors [10].

Bound states in the continuum (BIC) are non-radiative states localized inside the continuum spectrum [11]. Initially appeared in quantum mechanics, BIC has found applications in diverse areas such as acoustics and hydrodynamics as well as photonics to make high Q factor resonators [7, 12]. One type of BIC is called symmetry-protected BICs, characterized by infinite Q factors [13] and displaying a different symmetry than incoming waves, making them not excitable [14]. These states can be excited if the symmetry is broken through geometrical means making them quasi-BICs with finite but high Q factors [15]. Metasurface geometries are carefully selected to tune asymmetry parameters, leading to well-tuned resonance wavelengths and intensities. Geometries with broken symmetries include, among others, differently oriented elliptical disks [16], a pair of rectangular rods with different lengths [17], and a cylinder-ellipse pair [18]. All designs proposed in the literature have a single type of asymmetry, except where the design has different widths of bars and gap sizes in a grating designed for refractive index sensing whose geometrically tuning capability has yet to be shown [19]. Geometry parameters are not the only flexibility in designing structures that support quasi-BICs. A recent study shows the refractive index contrast between the surrounding medium and the structure is influential [20]. Additionally, nanocube based resonators with polarization-independent optical response was shown through computational studies and can be used in sensing applications [21]. Very recently, a silicon cube-based design with carved features demonstrated asymmetry in optical response to light handedness, resulting in high circular dichroism [22]. It is evident that structures that support quasi-BICs with different materials and topologies are currently being investigated by researchers for various use cases.

In this work, we propose a novel type of dielectric narrowband MIR thermal emitter having two different geometric asymmetries. Quasi-BIC modes are realized by employing two rectangular rods made of silicon with different lengths and orientations. The substrate of choice is gold and Al_2O_3 for spacer layer material. Through delicate tuning, the proposed design supports a sharp and intense (>0.995) emission/absorption band with a Q factor of 116 at a resonance wavelength of $5.818 \mu\text{m}$. Furthermore, the intensity and the resonance wavelength can be tuned by changing angular orientation and length asymmetry, respectively. The results show that by using a dielectric metasurface on a conductive substrate, narrowband and tunable thermal emitters can be made by employing the quasi-BIC phenomenon.

II. MATERIALS AND METHODS

2.1. Definition of Structure

The structure of a double asymmetric dielectric metasurface-based MIR thermal emitter is shown in Figure 1. It is made of two differently oriented 400 nm

thick rectangular rods separated by a 780 nm thick spacer layer that sits on a conductor substrate thick enough to block light transmission. The structure's unit cell is a square lattice with a period of 4000 nm. The centers of the two rods within the unit cell are separated by 1700 nm. Both rods have widths of 1200 nm but have differing lengths. The long rod is 3100 nm long, whereas the short one is 2170 nm. The length asymmetry parameter (α_l) for the proposed structure is defined according to [12]:

$$\alpha_l = \frac{\Delta L}{L} = \frac{3100 - 2170}{3100} = 0.3 \quad (1)$$

where L is the bar's original length, and ΔL is the length removed from the original length. Furthermore, to induce a secondary asymmetry in the suggested structure, the rectangular rods are rotated by angles (θ) of $\pi/25$ in opposite directions. The resonance wavelength and intensity are highly dependent on the asymmetry parameters, and non-zero values of asymmetry parameters would result in exciting quasi-BIC states that lead to narrowband emission. The studied wavelength region lies between 5.6 and $6.2 \mu\text{m}$.

2.2. Materials

To investigate the emission performance of the suggested structure, we rely on the properties reported in the literature. For the substrate, gold is chosen, whose refractive index (n) and extinction coefficient (k) values are obtained from [23]. As the spacer layer, Al_2O_3 is chosen, with n values taken from [24]. For k values, a constant value of 0.001 is used for all wavelengths in the study, similar to [2].

Silicon is chosen as the dielectric metasurface material. Constant values of $n=3.42$ and $k=0$ were used for all the wavelengths in the study [25]. It is important to note that using a material with higher refractive indices, such as germanium [26] or Bi_2Te_3 [27], would result in higher Q factors, but we chose silicon as it is one of the most widely used materials.

2.3. Simulation Parameters

As Kirchhoff's law of thermal radiation states, an object's absorptivity (A) equals its emissivity (E). An incoming light can be transmitted through, reflected off, or absorbed by an object. In our investigation, as the substrate is thick gold, the transmission can be neglected, reducing the problem of finding the reflectivity (R) of the structure for the wavelengths of interest. So, the spectral emissivity of the thermal emitter is:

$$E(\lambda) = A(\lambda) = 1 - R(\lambda) \quad (2)$$

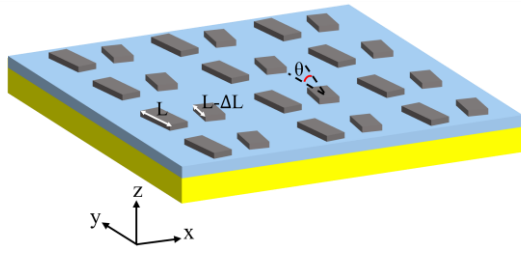


Figure 1. The schematic of the dielectric metasurface based thermal emitter. Each unit cell has two rectangular rods of different lengths, rotated opposite each other at an angle of θ to induce asymmetries.

We use the source TORCWA library to calculate emissivity values [28], a rigorous coupled-wave analysis (RCWA) tool that provides semi-analytical solutions by computing the scattering matrix for periodic stacked structures. In RCWA, relative permittivity is expanded in Fourier series, which must be truncated for calculations [29]. A truncation order of 7 is used in the simulations. The unit cell is assumed to be periodic in both the x and y directions. The incident light is normal to the surface and polarized in the x direction. The spatial resolution is chosen to be 1 nm, and emissivity values are calculated for every 2.5 nm between 5.6 and 6.2 μm .

The quality (Q) factor of a resonator is calculated as the ratio of wavelength of emissivity peak to full width at half maximum of the peak and can be formulated as:

$$Q = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad (3)$$

III. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Performance Evaluation of Proposed Structure

We start evaluating the proposed design where the bars, with a length asymmetry of 0.3, are rotated by $\pi/25$ in opposite directions. Figure 2 (a) shows the dielectric metasurface-based thermal emitter's calculated emission spectrum. A single emission/absorption peak at 5.818 μm exceeding an emissivity of 0.995 is obtained from the simulations. The inset zooms into the resonance wavelength area, and the full width at half maximum of the emission is calculated to be 50 nm, which corresponds to a Q factor of 116. Considering that metal-based thermal emitters reported in the literature achieve Q factors of less than 20, dielectric resonator-based structures have the potential to be used in various applications.

The high Q factor resonance that we observe in the suggested structure is supported by quasi-BIC. To prove the symmetry-protected properties of quasi-BIC resonances, the real part of the electric field distribution E_y in the xz plane at the resonance wavelength is shown in Figure 2 (b). As expected, no electric field exists inside the gold substrate ($z = -500$ nm to $z = 0$ nm). The anti-symmetric electric field profile, where one rod

experiences the minimum of the electric field while the other one holds the maximum electric field, conveys the existence of quasi-BIC resonance [30]. Additionally, it can be clearly seen that the field enhancement is mostly contained inside the silicon rectangular rods, and some leakage to the surrounding vacuum and spacer layer occurs.

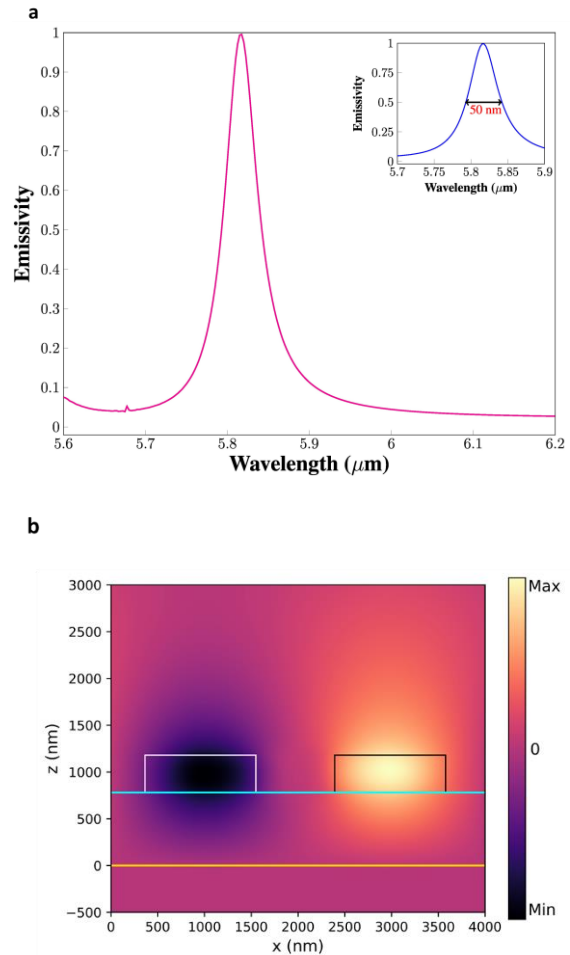


Figure 2. (a) Emissivity spectrum and (b) simulated cross-sectional profile of E_y from the double asymmetric dielectric metasurface. The yellow line indicates the top of the gold substrate, and the cyan line depicts the top of the spacer layer. The silicon resonators are within the black and white rectangles.

3.2. Parameter Sweep of Separation Angle

In the double asymmetric dielectric metasurface-based thermal emitter, rotating rectangular rods by $\theta = \pi/25$ produce almost unity emissivity when the length asymmetry is 0.3. However, the emissivity intensity can be tuned by changing the rotation angle without changing the resonance wavelength.

Figure 3 shows the rotation angle sweep results. In all these cases, the length asymmetry value (α_1) is 0.3. The sweep starts from $\theta = 0$, depicting the case of two perfectly parallel bars to $\theta = \pi/15$. We did not go beyond $\pi/15$ as those values correspond to the case of

two bars touching each other. As can be seen, when there is no asymmetry in rotation ($\theta = 0$ case), no resonance is supported, leading to an emissivity of 0, which means all the incoming light is reflected from the structure. In other words, no quasi-BIC resonance is observed. As θ increases, the emissivity values increase up to $\pi/25$, where it reaches almost unity. Further increase in θ results in lower emissivity values. It is important to stress that emissivity intensity can be tuned by only changing the relative orientation without moving the resonance wavelength, which can be handy in sensing applications.

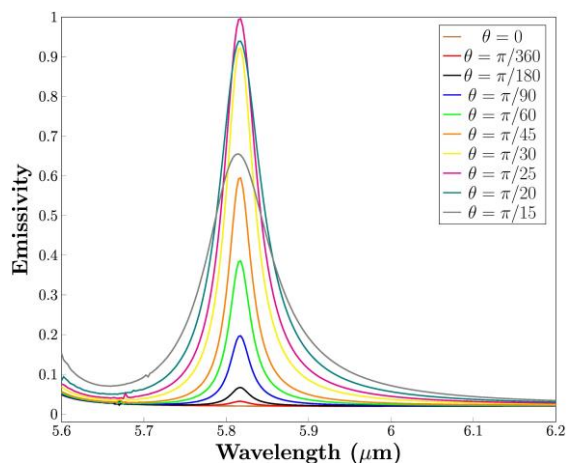


Figure 3. Emissivity spectra of dielectric metasurface thermal emitter with different angles of rotation.

3.3. Parameter Sweep of Length Asymmetry

Another asymmetry parameter is introduced by having rectangular rods with different lengths by changing length asymmetry, which is defined as the original length of the bar, which is the length of the more extended bar, and the length difference, which is the removed length in the shorter bar. Like the separation angle sweep case, we only tune one parameter. So, in all the numerical simulations done in this section, the bars are rotated by $\pi/25$ in opposite directions.

Figure 4 (a) shows emissivity of dielectric metasurfaces when the length asymmetry (α_l) is tuned from 0 to 0.4. The length of the original shorter band becomes equal to the longer rod (3100 nm) when α_l is 0. The length of the shorter rod decreases as α_l increases and becomes 1860 nm for $\alpha_l = 0.4$. As can be clearly seen, resonance wavelength redshifts, and resonance intensity drops when α_l is reduced from the original value of 0.3. Any further increase of α_l from the original value results in a blueshifted resonance wavelength accompanied by lower emissivity intensity.

Figure 4 (b) displays the resonance wavelength vs length asymmetry parameter. The resonance wavelength linearly decreases with increasing α_l values. So, it is possible to design a bespoke thermal emitter at the intended resonance wavelength. One of the most important realizations of this figure is that the

resonance condition occurs even when the bars are of the same length; that is α_l is 0, which is expected as the rods are still rotated away from each other and very similar structures using elliptical disks with same lengths instead of rectangular rods can be found in the literature [14].

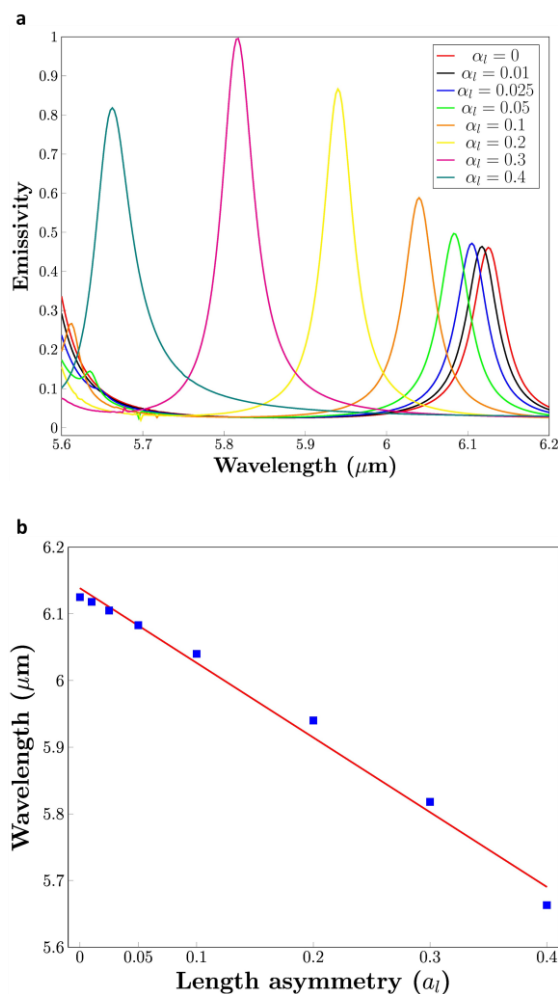


Figure 4. (a) Emission spectra of the thermal emitter with eight different length asymmetry parameters and (b) resonance wavelength with respect to asymmetry parameter.

IV. CONCLUSIONS

This study introduces a narrowband thermal emitter structure with tunable emissivity intensity and resonance wavelength. The structure consists of dielectric rectangular rods with different lengths and opposite orientations to induce quasi-BIC resonance. Silicon rods sit atop a spacer layer of Al_2O_3 and are placed on a gold substrate. Based on numerical studies, an emissivity value exceeding 0.99 is obtained at the resonance wavelength of 5.818 μm by diligently tuning asymmetry parameters.

The quasi-BIC inside the dielectric metasurface supports the resonance. The linewidth of emissivity is found to be 50 nm, corresponding to a Q factor of 116

which is roughly an order of magnitude higher than metal-based emitters. We also show that resonance wavelength can be tuned by changing the length asymmetry, whereas emissivity intensity can be tuned by modifying the rotation angle without changing the resonance wavelength. Although we study the effect of length asymmetry and rotation separately, this study can be extended to evaluate possible nonlinear dependencies between these two parameters. To our knowledge, this is the first thermal emitter design with double asymmetric features.

ACKNOWLEDGMENT

This study was supported by TUBITAK (The Scientific and Technological Research Council of Türkiye) with grant number 123E460.

REFERENCES

- [1] Li, X., Maqbool, E., & Han, Z. (2023). Narrowband mid-infrared thermal emitters based on the Fabry-Perot type of bound states in the continuum. *Optics Express*, 31(12), 20338–20344.
- [2] Sun, K., Sun, M., Ma, Y., Shi, Y., & Han, Z. (2023). Ultra-narrow bandwidth mid-infrared thermal emitters achieved with all-dielectric metasurfaces. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 143, 106728.
- [3] Liu, X. J., Zhao, C. Y., Wang, B. X., & Xu, J. M. (2023). Tailorable bandgap-dependent selective emitters for thermophotovoltaic systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 200, 123504.
- [4] Lenert, A., Bierman, D. M., Nam, Y., Chan, W. R., Celanović, I., Soljačić, M., & Wang, E. N. (2014). A nanophotonic solar thermophotovoltaic device. *Nature Nanotechnology*, 9(2), 126–130.
- [5] De Zoysa, M., Asano, T., Mochizuki, K., Oskooi, A., Inoue, T., & Noda, S. (2012). Conversion of broadband to narrowband thermal emission through energy recycling. *Nature Photonics*, 6(8), 535–539.
- [6] Costantini, D., Lefebvre, A., Coutrot, A.-L., Moldovan-Doyen, I., Hugonin, J.-P., Boutami, S., Marquier, F., Benisty, H., & Greffet, J.-J. (2015). Plasmonic Metasurface for Directional and Frequency-Selective Thermal Emission. *Physical Review Applied*, 4(1), 014023.
- [7] Yang, S., He, M., Hong, C., Nordlander, J., Maria, J.-P., Caldwell, J. D., & Ndukaiife, J. C. (2024). Single-peak and narrow-band mid-infrared thermal emitters driven by mirror-coupled plasmonic quasi-BIC metasurfaces. *Optica*, 11(3), 305–314.
- [8] Liu, X., Tyler, T., Starr, T., Starr, A. F., Jokerst, N. M., & Padilla, W. J. (2011). Taming the Blackbody with Infrared Metamaterials as Selective Thermal Emitters. *Physical Review Letters*, 107(4), 045901.
- [9] Lochbaum, A., Fedoryshyn, Y., Dorodnyy, A., Koch, U., Hafner, C., & Leuthold, J. (2017). On-Chip Narrowband Thermal Emitter for Mid-IR Optical Gas Sensing. *ACS Photonics*, 4(6), 1371–1380.
- [10] Kuznetsov, A. I., Miroshnichenko, A. E., Brongersma, M. L., Kivshar, Y. S., & Luk'yanchuk, B. (2016). Optically resonant dielectric nanostructures. *Science*, 354(6314), aag2472.
- [11] Hsu, C. W., Zhen, B., Stone, A. D., Joannopoulos, J. D., & Soljačić, M. (2016). Bound states in the continuum. *Nature Reviews Materials*, 1(9), 1–13.
- [12] Koshelev, K., Lepeshov, S., Liu, M., Bogdanov, A., & Kivshar, Y. (2018). Asymmetric Metasurfaces with High-Q Resonances Governed by Bound States in the Continuum. *Physical Review Letters*, 121(19), 193903.
- [13] Li, S., Zhou, C., Liu, T., & Xiao, S. (2019). Symmetry-protected bound states in the continuum supported by all-dielectric metasurfaces. *Physical Review A*, 100(6), 063803.
- [14] Zografopoulos, D. C., & Tsilipakos, O. (2023). Recent advances in strongly resonant and gradient all-dielectric metasurfaces. *Materials Advances*, 4(1), 11–34.
- [15] Li, S., Zhou, C., Liu, T., & Xiao, S. (2019). Symmetry-protected bound states in the continuum supported by all-dielectric metasurfaces. *Physical Review A*, 100(6), 063803.
- [16] Tittl, A., Leitis, A., Liu, M., Yesilkoy, F., Choi, D.-Y., Neshev, D. N., Kivshar, Y. S., & Altug, H. (2018). Imaging-based molecular barcoding with pixelated dielectric metasurfaces. *Science*, 360(6393), 1105–1109.
- [17] Watanabe, K., Devi, H. R., Iwanaga, M., & Nagao, T. (2024). Vibrational Coupling to Quasi-Bound States in the Continuum under Tailored Coupling Conditions. *Advanced Optical Materials*, 12(6), 2301912.
- [18] Jahani, Y., Arvelo, E. R., Yesilkoy, F., Koshelev, K., Cianciaruso, C., De Palma, M., Kivshar, Y., & Altug, H. (2021). Imaging-based spectrometer-less optofluidic biosensors based on dielectric metasurfaces for detecting extracellular vesicles. *Nature Communications*, 12(1), 3246.
- [19] Liu, C., Bai, Y., Zhou, J., Chen, J., & Qiao, L. (2021). Refractive index sensing by asymmetric dielectric gratings with both bound states in the continuum and guided mode resonances. *Optics Express*, 29(26), 42978–42988.
- [20] Vincenti, M. A., Carletti, L., Ceglia, D. de, Rocco, D., Weigand, H., Saerens, G., Falcone, V., Grange, R., Sedeh, H. B., Li, W., Litchinitser, N. M., & Scalora, M. (2024). From high- to low-contrast: The role of asymmetries in dielectric gratings supporting bound states in the continuum. *Optics Express*, 32(18), 31956–31964.

- [21] Algorri, J. F., Dmitriev, V., Hernández-Figueroa, H. E., Rodríguez-Cobo, L., Dell'Olio, F., Cusano, A., López-Higuera, J. M., & Zografopoulos, D. C. (2024). Polarization-independent hollow nanocuboid metasurfaces with robust quasi-bound states in the continuum. *Optical Materials*, 147, 114631.
- [22] Huang, Z., Wang, J., Jia, W., Zhang, S., & Zhou, C. (2024). Controllable perfect chiral optical response in planar metasurfaces empowered by quasi-bound states in the continuum. *Optics Express*, 32(19), 33029–33041.
- [23] Olmon, R. L., Slovick, B., Johnson, T. W., Shelton, D., Oh, S.-H., Boreman, G. D., & Raschke, M. B. (2012). Optical dielectric function of gold. *Physical Review B*, 86(23), 235147.
- [24] Boidin, R., Halenkovič, T., Nazabal, V., Beneš, L., & Němec, P. (2016). Pulsed laser deposited alumina thin films. *Ceramics International*, 42(1, Part B), 1177–1182.
- [25] Edwards, D. F., & Ochoa, E. (1980). Infrared refractive index of silicon. *Applied Optics*, 19(24), 4130–4131.
- [26] Ren, D., Dong, C., Addamane, S. J., & Burghoff, D. (2022). High-quality microresonators in the longwave infrared based on native germanium. *Nature Communications*, 13(1), 5727.
- [27] Krishnamoorthy, H. N. S., Adamo, G., Yin, J., Savinov, V., Zheludev, N. I., & Soci, C. (2020). Infrared dielectric metamaterials from high refractive index chalcogenides. *Nature Communications*, 11(1), 1692.
- [28] Kim, C., & Lee, B. (2023). TORCWA: GPU-accelerated Fourier modal method and gradient-based optimization for metasurface design. *Computer Physics Communications*, 282, 108552.
- [29] Li, J., Wang, J.-B., Sun, Z., Shi, L.-H., Ma, Y., Zhang, Q., Fu, S.-C., Liu, Y.-C., & Ran, Y.-Z. (2020). Efficient Rigorous Coupled-Wave Analysis Without Solving Eigenvalues for Analyzing One-Dimensional Ultrathin Periodic Structures. *IEEE Access*, 8, 198131–198138. [IEEE Access](#).
- [30] Sun, K., Cai, Y., & Han, Z. (2021). A novel mid-infrared thermal emitter with ultra-narrow bandwidth and large spectral tunability based on the bound state in the continuum. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 55(2), 025104.

Çekişmeli Üretici Ağlar Kullanılarak Medikal Görüntülerin Sanal Hematoksilen ve Eozin (H&E) Boyanması

Virtual Hematoxylin and Eosin (H&E) Staining of Medical Images using Generative Adversarial Networks

Musa AYDIN¹

¹Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Öz

Tıbbi görüntülerin sanal boyanması işlemi dijital patolojide önemli bir yaklaşım olarak görülmektedir. Geleneksel doku boyama zaman alan, uzmanlık gerektiren, boyamanın uzmandan uzmana değişkenlik gösterdiği yoğun bir süreçtir. Derin öğrenme yaklaşımı kullanılarak sanal boyama ile görüntü kalitesinin iyileştirilmesi ve manuel boyamadan kaynaklı maliyetlerin azaltılması sağlanmaktadır. Bu çalışmada, boyasız tüm slayt görüntülerin (WSI-Whole Slide Images) Hematoksilen ve Eozin (H&E) boyalı görüntü çiftlerini sanal olarak boyamak için koşullu çekişmeli üretici ağ (cGAN- The Conditional Generative Adversarial Network) tabanlı bir derin sinir ağının uygulanmasını araştırmaktadır. Açık kaynak olarak sunulan bir veri setini kullanarak, sonuçlarımızı daha büyük bir veri seti kullanan bir referans çalışmayla karşılaştırıyoruz. Sadece yedi adet WSI kullanan yaklaşımımız, 68 WSI kullanan referans çalışmayla karşılaştırıldığında Yapısal Benzerlik İndeksi (SSIM), Tepe Sinyal-Gürültü Oranı (PSNR) ve Pearson Korelasyon Katsayısı (PCC) açısından rekabetçi bir performans göstermektedir. Ayrıca çalışmamızda çekişmeli üretici ağın eğitim sürecinde önerdiğimiz hibrit kayıp fonksiyonu ile sentetik görüntüler ve gerçek görüntülerin değerlendirilmesi sağlanmıştır. Çalışmamızda elde edilen sonuçlar SSIM, PSNR ve PCC değerlerinin ortalaması sırasıyla 0,668, 21,487 ve 0,872 iken, referans çalışmada bu değerler sırasıyla 0,724, 22,609 ve 0,903 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, GAN'ların yüksek kaliteli sanal boyama görüntülerini elde etme potansiyelini ortaya koyarak, kapsamlı veri kümelerine olan ihtiyacı azaltmaktadır ve böylece dijital patoloji için verimlilik ve tekrar edilebilirliği artırmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hematoksilen ve Eozin (H&E), Derin Sinir Ağları, Medikal Görüntü Sanal Boyama, Çekişmeli Üretici Ağlar (GANs)

Abstract

Virtual staining of medical images is an essential approach in digital pathology. Traditional tissue staining is a time-consuming, specialized, and intensive process where staining varies from expert to expert. By using a deep learning approach, virtual staining improves image quality and reduces the costs associated with manual staining. In this study, we investigate the application of a deep neural network based on the Conditional Generative Adversarial Network (cGAN) for virtual staining of unstained whole slide images (WSI-Whole Slide Images) to Hematoxylin and Eosin (H&E) stained image pairs. Using a publicly available dataset, we compare our results with a reference work using a larger dataset. Using only seven WSIs, our approach performs competitively in terms of Structural Similarity Index (SSIM), Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR), and Pearson Correlation Coefficient (PCC) compared to the reference work using 68 WSIs. In addition, in our study, the hybrid loss function we proposed in the training process of the adversarial generative network was used to evaluate synthetic and real images. The average SSIM, PSNR, and PCC values obtained in our study are 0.668, 21.487, and 0.872, respectively, while in the reference study, these values are 0.724, 22.609, and 0.903, respectively. The results demonstrate the potential of GANs to acquire high-quality virtual staining images, reducing the need for extensive datasets and thus increasing efficiency and reproducibility for digital pathology.

Keywords: Hematoxylin and Eosin (H&E), Deep Neural Networks, Medical Images Virtual Staining, Generative Adversarial Networks (GANs)

I. GİRİŞ

Dijital patoloji histopatolojik slaytların dijitalleştirilmesini ve analiz edilmesini kolaylaştırarak teşhis ve tanı alanında kolaylıklar sunmaktadır. Patoloji slaytlarının doku morfolojisini görselleştirmek ve patolojik değişiklikleri belirlemek için en bilindik ve uzun yıllardır kullanılan teknik, ilgili patoloji dokusunun kontrastını artıracak bir kimyasal ile boyanmasıdır [1]. Hematoksilen ve Eozin (H&E) boyama tekniği hücrel ve doku yapılarının görüntülenmesini sağlayan histopatolojideki en geleneksel boyama tekniklerinden biridir [2].

Geleneksel H&E boyama, uzman teknikerler ve özel ekipman gerektiren, zaman alıcı ve boyama kalitesinin kişiden kişiye değiştiği bir süreçtir. Bir uzman tarafından yapılan manuel boyama işleminde, boyanmış slaytlarda değişkenlik ve tutarsızlıklara kişinin uzmanlık doğasından ötürü oluşabilir ve bunun sonucu olarak görüntülen doku için hatalı tanı ortaya çıkabilir. Derin sinir ağlarının ve yapay zekâ algoritmalarının dijital patoloji görüntülerinin otomatik analizinde kullanılması ile uzman gereksinimine olan ihtiyaç azaltılmış ve otomatik teşhis tanı sürecinde umut verici sonuçlar ortaya çıkmıştır [3], [4], [5], [6], [7]. Histopatolojik slaytların kimyasal boyanması sürecinin bir uzman tarafından yapılmasının gerekliliği, boyama süreçlerinin uzun zaman alması, kimyasal boyaların yüksek maliyeti, slaytlar arasındaki boyama farklılıkları gibi faktörler, bu sürecin otomatikleştirilmesi ve iyileştirilmesi ihtiyacını doğurmuştur. Patoloji slaytlarındaki karmaşık desenleri ve görüntüler arasındaki ilişkileri öğrenme yetenekleri ile derin öğrenme tabanlı yaklaşımlar, sanal boyama uygulamalarında kayda değer ilerlemeler ortaya koymuştur [8], [9]. Özellikle çekişmeli üretici ağlar (GANs- Generative Adversarial Networks) patoloji slaytlarının kimyasal boyama olmaksızın sanal olarak boyanması ile ilgili başarılı sonuçlar üretmiştir. Çekişmeli üretici ağlar kullanılarak yapılan sanal H&E boyama ile dijital patolojideki iş akışını önemli ölçüde azaltabileceği görülmüştür [10], [11], [12]. Bununla birlikte, derin sinir ağları ile sanal boyama yaklaşımı, sanal boyama, histopatolojik analizlerin tutarlılığı, tekrarlanabilirliği ve yeniden üretilebilirliğini artırarak manuel boyama tekniklerinin getirdiği değişkenliği ortadan kaldırabilir. GAN'lar kullanılarak yapılan sanal H&E boyama, geleneksel yöntemlere kıyasla birçok avantaj sunmaktadır. Zaman ve kaynak verimliliği için, fiziksel boyama ihtiyacını ortadan kaldırarak sanal boyama ile slayt hazırlama için gereken zaman ve kaynakları önemli ölçüde azaltıldığı görülmüştür [13], [14]. Manuel boyama tekniklerinde görülen değişkenlik, sanal boyama ile azaltılarak, histopatolojik analizlerin daha tutarlı hale getirilebileceği gözlemlenmiştir [15], [16]. Bir patoloji slaytı mikroskop ile görüntülenmesi sürecinde, belirlenen bir kimyasal boya ile bir uzman tarafından boyanır ve ilgili tüm slayt (WSI-Whole slide image) görüntülenir. Görüntülenme süreci tamamlandıktan sonra boyanmış doku tekrar bir başka kimyasal boya ile boyanmaya uygun değildir ve genellikle bu süreç tek seferlidir. Sanal boyama ile, bir dokunun herhangi bir boya türünde defalarca boyanarak sanal boyanmış sentetik görüntüsü oluşturulabilir, bu sayede birden fazla boya ile boyamanın denenmesi avantajı oluşmaktadır. Böylelikle sanal boyama, orijinal doku örneklerinin korunmasına olanak tanır ve aynı örnek üzerinde birden fazla analiz yapılarak fiziki dokunun tahrip edilmeden analiz edilmesini sağlar [17]. Patoloji slaytlarının farklı zamanlarda farklı uzmanlar tarafından hatta bazı zamanlarda aynı uzmanın farklı zamanlardaki boyamaları arasında varyasyonlar oluşmaktadır. Bu

varyasyonlar dijital görüntünün analizinde hatalı sonuçlara neden olabilmektedir. Derin sinir ağları ile gerçekleştirilen sanal boyama ile, sentetik olarak üretilmiş sanal boyanmış görüntüler, ağın genelleştirebilme kabiliyetinden dolayı her zaman aynı standartta ve kalitede görüntüler üretmektedir [18], [19], [20], [21], [22], sentetik olarak üretilen sanal boyanmış görüntüler arasında herhangi bir stil ve yapı değişimi olmayacağından teşhis tanı süreçleri şeffaf ve standart hale gelecektir [23]. Dijital patolojide sanal boyama yaklaşımı sayesinde elde edilen kazanımlar, daha hızlı ve doğru teşhisler sunarak, sağlık hizmetlerinde maliyetlerin düşürülmesine katkı sağlayabilir. Tüm bu kazanımlar göz önüne alındığında, bu çalışmada boyanmamış tıbbi görüntülerin sanal H&E boyaması için koşullu çekişmeli üretici ağ (cGAN - The Conditional Generative Adversarial Network) tabanlı bir yaklaşım kullanılmaktadır. Çalışmada GAN tabanlı sanal boyamanın uygulanabilirliği ve etkinliği gösterilerek, bu yaklaşımın dijital patoloji için önemi ortaya konmuştur. Önerilen GAN modeli için üretici ve ayırıcı ağların eğitim sürecinde kullanılan kayıp fonksiyonu (loss function) modifiye edilmiştir. Üretici ağın sonuçları, birden fazla kayıp fonksiyonu tarafından değerlendirilerek hibrit bir kayıp fonksiyonu tasarımı oluşturulmuştur. Modelimizi herkese açık bir veri seti kullanarak eğittik ve değerlendirdik ve performansını aynı veri setini kullanan önceki bir çalışmayla karşılaştırdık [24]. Yapılan çalışmada elde edilen ortalama SSIM, PSNR ve PCC değerleri sırasıyla 0,668, 21,487 ve 0,872'dir ve bu değerler referans çalışmada hesaplanan (0,724, 22,609 ve 0,903) değerler ile karşılaştırılabilir seviyededir. Bu bulgular, GAN'ların azaltılmış veri seti gereksinimleri ile yüksek kaliteli sanal boyama elde etme potansiyelini vurgular ve böylece dijital patolojinin verimliliğini ve erişilebilirliğini artırır. Sonuçlarımız, önerilen yöntemin daha küçük bir eğitim veri setiyle bile referans çalışmayla karşılaştırıldığında rekabetçi sonuçlar elde ettiğini göstermektedir. Çalışmanın organizasyonu şu şekilde yapılandırılmıştır. Bölüm II' de çalışmada kullanılan veri seti, derin sinir ağı ve değerlendirme metrikleri ile ilgili bilgi verilmiştir. Bölüm III' te yapılan deneysel çalışmaların detayından bahsedilmiştir. Deneysel çalışmaların sonuçları Bölüm IV' te tartışılmıştır. Bölüm V, yapılan çalışmayı özetlemekte ve gelecek çalışmalar hakkında bilgi verilmektedir.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Yapılan çalışmada boyamasız medikal görüntülerin, kimyasal boyama işlemine gerek duymadan derin sinir ağı tabanlı yaklaşımla sanal olarak boyanması için hem boyasız hem de Hematoksilin ve Eozin (H&E) kimyasal boyalı görüntü çiftlerini içeren anterior prostat dokusunun tüm slayt görüntü (WSI-Whole Slide Image) çiftleri kullanılmıştır [24]. Bu bölümde, çalışmada kullanılan veri seti ve derin sinir ağı mimarisinden bahsedilecektir, ayrıca elde edilen

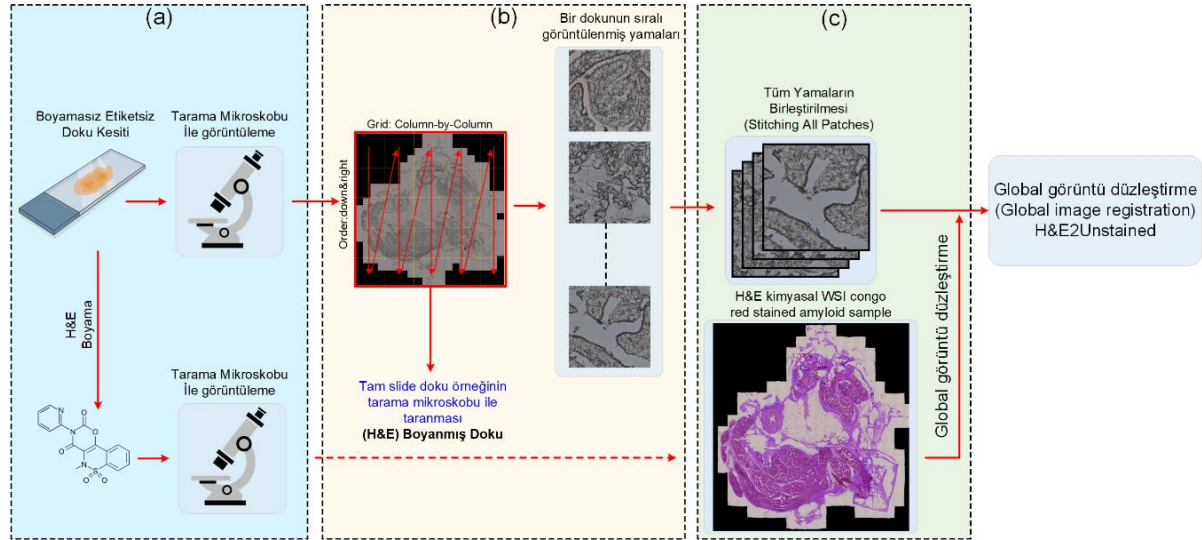
sonuçların hangi metrikler ile değerlendirildiği anlatılmaktadır.

2.1 Veri Seti

Bu çalışmada dijital patoloji görüntülerinin derin sinir ağı tabanlı sanal boyanması için boyanmamış ve H&E ile boyanmış anterior prostat dokusunun tüm slayt görüntü (WSI-Whole Slide Image) çiftleri kullanılmıştır [24]. Veri setinde toplam 81 adet RGB görüntü formatında boyasız ve H&E ile kimyasal olarak boyanmış tüm slayt giga piksel görüntü çifti bulunmaktadır. Ayrıca veri setinde her bir tüm slayt

2.2 Çekişmeli Üretici Ağlar

Bu çalışmada, boyasız görüntü çiftlerini, H&E kimyasal boyamalı görüntü çiftlerine eşleştirmek için bir üretici derin sinir ağı modeli olan Çekişmeli Üretici Ağlar (GANs-Generative Adversarial Networks) kullanılmıştır [25]. Bu bölümde, tıbbi görüntülerin sanal boyanmasında sentetik Hematoksilen ve Eozin (H&E) ile boyanmış görüntüler üretmek için çekişmeli üretici ağların kullanımı ve teorisi anlatılmaktadır. Çekişmeli üretici ağlar, orijinal veri kümesinden uygun şekilde ayıklayarak yeni sentetik örnekler oluşturabilmek için girdi verilerindeki yapıları



Şekil 1. Boyamasız ve H&E boyamalı tam slayt doku kesitlerinin tarama mikroskobu ile yama (ing:patch) bazlı görüntülenmesi adımları

görüntü çifti için ikili görüntü formatında (binary image) doku maskesi de bulunmaktadır. Veri setindeki görüntüler tüm slayt görüntü formatındadır ve boyutları geleneksel bir görüntü boyutunun çok üstündedir, örneğin bir tüm slayt görüntü ~50000x50000 veya daha büyük boyutlarda olmaktadır. Her görüntü çifti için oluşturulan ikili formattaki doku maskesi, tüm slayt görüntünün sadece doku bilgisi içeren alanlarının sınırlandırılmasını sağlamaktadır. Tüm slayt görüntüden GAN ağı için küçük yamaların elde edilmesi aşamasında veri setinde bulunan her bir görüntü çiftine ait olan bu ikili maske kullanılmıştır. Veri setindeki görüntüler, dijital patoloji dokularının görüntülenmesi için x-y düzlemlerinde tarama mikroskobu tarafından tarama yöntemiyle görüntülenmiş birden fazla küçük yama (small patch) görüntüsünün algoritmik olarak birleştirilmesi (image stitching) sonucunda oluşturulmuştur. Şekil 1' de boyamasız ve H&E boyalı görüntüler için ön işlem adımları gösterilmektedir. Şekil 1(a)' de ilgili doku kesitinin mikroskop altında görüntülenmesi-taranması gösterilmektedir. Şekil 1 (b-c)' de ise tarama mikroskobunun tüm doku kesitinin belirlenen sınırlarının x-y düzleminde küçük yamalar şeklinde taranması ve elde edilen tüm yamaların birleştirilip tek bir tam slayt görüntü elde edilmesi gösterilmektedir.

otomatik olarak öğrenmeyi amaçlayan bir öğrenme türüdür [26]. Çekişmeli üretici ağlar eş zamanlı olarak eğitilen bir üretici (G-Generator) ve bir ayırıcı (D-Discriminator) olmak üzere iki adet derin sinir ağından oluşmaktadır. Üretici ağ G , rastgele görüntülerden, gerçek görüntüye en yakın görüntü örnekleri üretmeyi amaçlar, ayırıcı ağ D ise, üretici ağı eğitim verilerinden ürettiği sentetik görüntüler ile, bu sentetik görüntülere karşılık gelen gerçek görüntüler arasında ayırım yapmaya çalışır. Ayırıcı ağ ve üretici ağ arasında yarış bulunmaktadır. Ayırıcı ağı D gerçek ve sahte görüntüler arasında doğru ayırım yapmasını, üreticinin daha gerçekçi sentetik görüntüler üretmesini sağlamak amacıyla üreticinin kayıp fonksiyonu hesaplanır parametreleri güncellenir. Üretici ağ G ve ayırıcı ağ D arasında, üreticinin ayırıcının hata yapma olasılığını artırmaya çalıştığı ve ayırıcının bu olasılığı en aza indirmeye çalıştığı bir minimax oyunu kurgulanır. Bu çalışmada belirli koşullara bağlı olarak sentetik veri üretimi yapan koşullu çekişmeli üretici ağ (cGAN- The Conditional Generative Adversarial Network) modeli kullanılmaktadır [27]. Koşullu çekişmeli üretici ağlar (cGAN), hem üretici ağ hem de ayırıcı ağı bazı ek bilgiler ekleyerek sentetik görüntü üretirler. Koşullu çekişmeli üretici ağlar için koşul olarak kullanılan bilgiler, sınıf etiketleri veya dönüştürülmek istenen

farklı bir görüntü modalitesi olabilir. Medikal görüntülerin sanal boyanması için koşullu çekişmeli üretici ağı kullandığı koşul bilgisi boyasız doku görüntüleridir. Koşullu çekişmeli üretici ağı modelinde, üretici ağı G girdisi görüntü vektörü içermek zorunda değildir, doğrudan sınıf etiketine ait görüntü örnekleri girdi vektörü olarak kullanılmaktadır, ayırıcı ağı D girdisi, gerçek ve sentetik veri örnekleri ve bu verilere karşılık gelen etiketlerdir.

2.3 Değerlendirme metrikleri

Bu çalışmada sanal olarak boyanmış doku görüntüleri ile karşılık gelen H&E boyanmış gerçek referans görüntüleri, üç farklı değerlendirme metriğine göre değerlendirilmiştir. Bu bölümde, bu çalışmada kullanılan üç değerlendirme metriği açıklanmaktadır. Kullanılan değerlendirme metrikleri sırasıyla, Yapısal Benzerlik İndeksi Ölçümü (SSIM- Structural Similarity Index Measure), Tepe Sinyal-Gürültü Oranı (PSNR- Peak Signal-to-Noise Ratio) ve Pearson Korelasyon Katsayısı (PCC- Pearson Correlation Coefficient)' dir. Bu metrikler, GAN tarafından üretilen sanal boyalı görüntülerin gerçek referans (ground truth) H&E boyalı görüntülere ne kadar benzer olduğunu değerlendirmek için seçilmiştir.

Yapısal Benzerlik İndeksi Ölçümü (SSIM- Structural Similarity Index Measure):

Yapısal benzerlik indeksi ölçümü (SSIM), iki görüntü arasındaki yapısal bilginin (parlaklık, kontrast vb.) matematiksel olarak hesaplanarak ölçülmesini sağlayan bir yaklaşımdır [28]. Yapısal benzerlik indeksi ölçümü ile iki görüntü arasındaki bozulmanın ölçülmesi sağlanır. Bu çalışmada sanal olarak GAN ile boyanmış (virtually stained) görüntü ile H&E boyalı görüntüleri sayısal olarak karşılaştırmak için yapısal benzerlik indeksi ölçümü (SSIM) kullanılmıştır. Yapısal benzerlik indeksi değeri 0 ile 1 arasında değer almaktadır, değerin 1'e yakın olması iki görüntünün yapısal olarak benzer olduğu anlamına gelir.

Tepe Sinyal-Gürültü Oranı (PSNR- Peak Signal-to-Noise Ratio):

Tepe Sinyal-Gürültü Oranı (PSNR) görüntü ve videoların yeniden yapılandırma (reconstruction) kalitesini ölçmek ve sayısal olarak değerlendirmek için kullanılmaktadır [29]. Orijinal ve yeniden yapılandırılmış görüntüleri karşılaştırırken, Tepe Sinyal-Gürültü Oranı (PSNR) desibel (dB) cinsinden bir ölçüm sağlar. Daha yüksek PSNR değerleri, yeniden yapılandırılmış görüntünün orijinal görüntüye kıyasla daha iyi kalite ve daha az bozulmaya sahip olduğunu gösterir. Bu çalışmada PSNR, GAN tarafından sanal olarak boyanmış görüntü için oluşan gürültü seviyesini ölçmeye yardımcı olur ve sanal olarak boyanan görüntüler ile gerçek görüntüler arasındaki benzerliğin ölçümünü sağlar.

Pearson Korelasyon Katsayısı (PCC- Pearson Correlation Coefficient):

Pearson Korelasyon Katsayısı (PCC), iki görüntü arasındaki doğrusal korelasyonu ölçer ve 0 ile 1 arasında bir değer üretir [30]. Hesaplanan değer 1 olması pozitif korelasyonu, 0 olması ise hiç korelasyon olmadığı anlamına gelir. PCC özellikle iki görüntü arasındaki ışık şiddeti (intensity) değerlerinin benzerliğini karşılaştırmak için kullanılır. PCC ile sanal olarak boyanmış görüntülerin piksel değerlerindeki değişimlerin gerçek referans görüntülerin değerlerine ne derece uyduğunu hesaplayarak, tahmin edilen ve gerçek boyalı görüntüler arasındaki ilişkinin sayısal bir temsili ortaya konulur.

III. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Yapılan çalışmada kimyasal boyama olmadan, boyasız ve Hematoksilin ve Eozin (H&E) kimyasal boyalı görüntü çiftlerini kullanarak çekişmeli üretici ağı ile boyasız görüntü çiftlerinin karşılığı olan sanal boyanmış görüntülerin elde edilmesi sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlar üç farklı metrik (SSIM, PSNR ve PCC) açısından literatürde var olan çalışma ile kıyaslanarak değerlendirilmiştir.

3.1 Tüm Slayt görüntü ön işleme

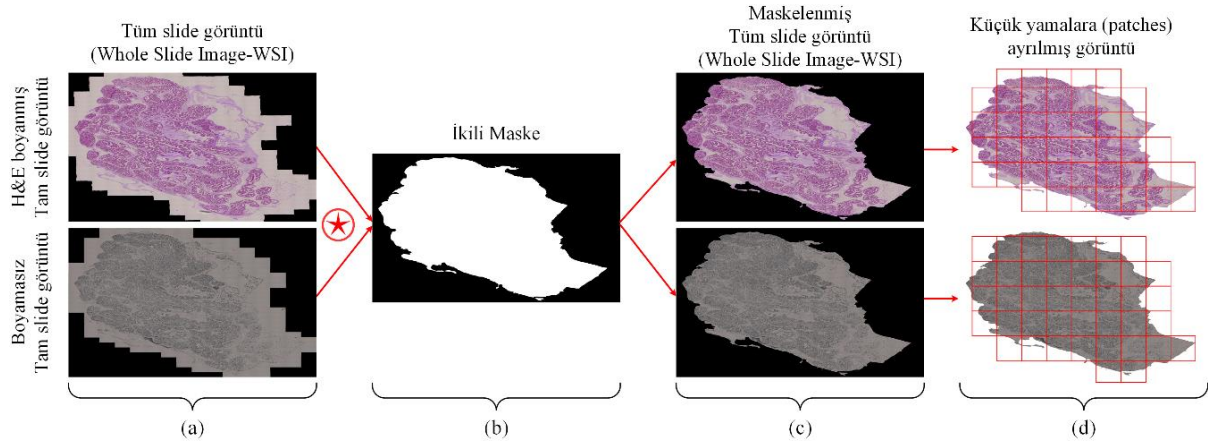
Bu çalışmada boyasız medikal görüntülerin kimyasal boyama olmadan derin sinir ağı tabanlı sanal olarak boyanması için boyasız ve H&E ile boyanmış anterior prostat dokusunun tüm slayt görüntü (WSI-Whole Slide Image) çiftleri kullanılmıştır [24]. Şekil 2' de histopatolojik görüntülemenin genel akış diyagramı gösterilmektedir. Tüm slayt görüntüleri (WSI), histopatolojik doku slaytlarının yüksek çözünürlüklü ve yüksek büyütme oranında dijital olarak taranmış halidir. Şekil 1 (c)' de gösterilen örnek tüm slayt görüntünün boyutu $29321 \times 37316 \times 3$ tür. Tüm slayt görüntüler normal bir görüntü boyutundan çok daha büyük boyutlara sahiptir ve bu görüntüleri kullanarak yapılacak analizler çok yüksek hesaplama maliyeti getirmektedir [31]. Bu çalışmada kullanılan veri setinde toplam (test ve eğitim görüntüleri dahil) 81 adet WSI görüntü çifti (boyasız ve H&E boyanmış) bulunmaktadır. Her bir tüm slayt görüntü, derin sinir ağı ile doğrudan kullanılmayacak boyutlara sahiptirler. WSI' lar ile sınıflandırma, segmentasyon veya sanal boyama gibi işlemler, büyük boyutları, yüksek çözünürlükleri, karmaşık doku yapıları ve hesaplama gereksinimleri nedeniyle önemli zorluklar sunar. Bu zorlukların üstesinden gelmek için, çeşitli görüntü işleme yaklaşımları kullanılarak tüm slayt görüntülerin bir derin sinir ağı ile kullanılabilir-egitilebilir hale getirilmesi gerekmektedir. Tüm slayt görüntülerin ön işlenmesi ve eğitim, test ve doğrulama (validation) veri setlerinin hazırlanması şu adımlarda gerçekleştirilmiştir. Koşullu çekişmeli üretici ağı (cGAN) eğitimi için öncelikle tüm slayt görüntüler 1024×1024 boyutlarında küçük yamalara (patches) ayrılmıştır. Tüm slayt görüntülerin yamalara ayrılma işleminde hem boyasız doku görüntüleri hem de H&E

boyanmış görüntü çiftleri ayrı ayrı kullanılmıştır. Her bir boyasız tüm slayt görüntüden elde edilen yama cGAN üretici ağının giriş verilerini temsil etmektedir, H&E boyanmış tüm slayt görüntüleri ise cGAN ayırıcı ağın giriş verilerini temsil etmektedir. Tüm slayt görüntüleri bir dokunun tamamının yüksek çözünürlükte bir tarama mikroskobu aracılığı ile taranmış ve sayısallaştırılmış halidir. Bu sebeple cGAN için oluşturulan veri setlerinde (eğitim, test, doğrulama) kullanılan yamaların tüm slayt görüntülerden koparılması aşamasında şu kısıtlar dikkate alınmıştır.

- Bir yama en az %40 veya daha fazla doku bilgisi içeren bir alandan oluşmalıdır.
- Seçilen yama odak dışı bozukluk (out of focus patches) içermemelidir.

Tüm slayt görüntülerden yama seçiminde yukarıdaki iki kriter dikkate alınarak anlamlı yamaların modelin eğitim ve test sürecine dahil edilmesi sağlanmıştır. İlk aşamada bir yamanın en az %40 veya daha fazla doku

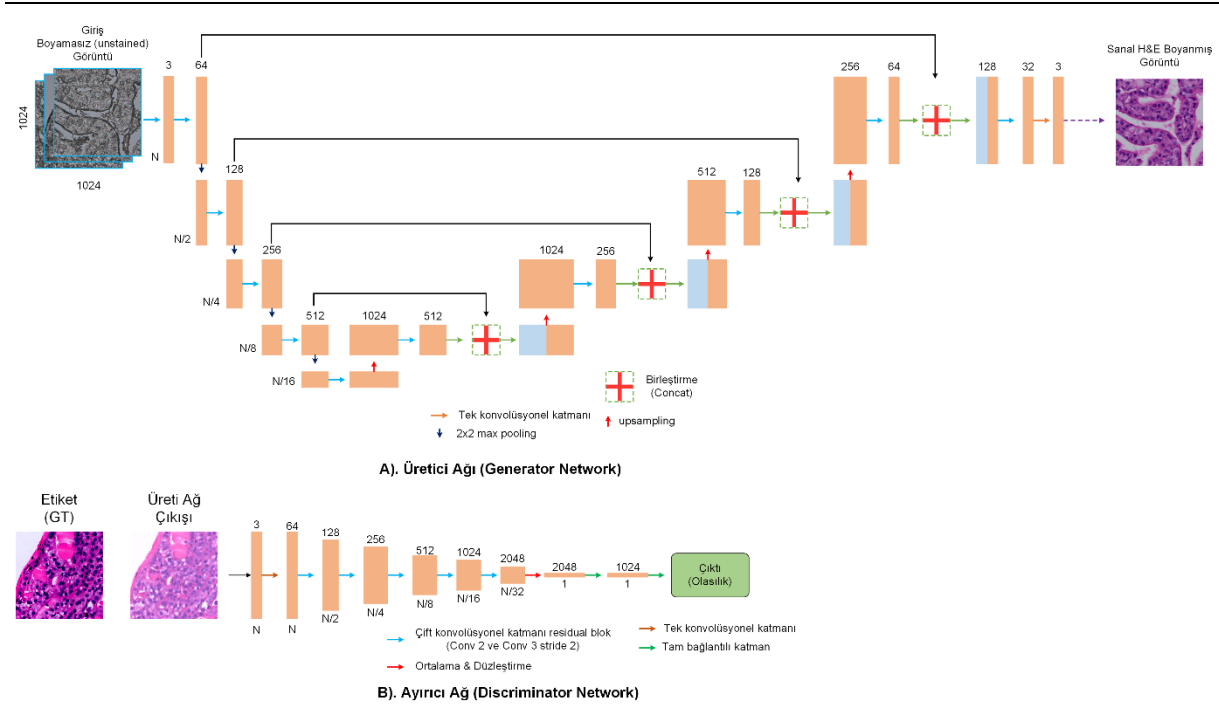
Odak dışı bozukluk hesaplanmasında şu adımlar izlenmiştir. Öncelikle seçilen bir yamanın *mean_intensity* değeri ve *standart_sapması* hesaplanmaktadır. Daha sonra seçilen yamaya *Laplacian* operatörü uygulanarak yama görüntüsündeki kenarların belirginleştirilmesi sağlanmıştır. Daha sonra *Laplacian* görüntüsünün varyansı hesaplanır, hesaplanan varyans değeri, ilgili yama görüntüsünün keskinliğinin veya dokusunun bir ölçüsü olarak kullanılmaktadır. Bir yamanın odak dışı bozukluk içerip içermediği ve cGAN için oluşturulan veri setinden odak dışı bozukluk içeren yamaların atılması için 500 adet farklı tüm slayt görüntülerden rastgele koparılmış yama görüntüsü kullanılarak ilgili yamaların *mean_intensity*, *standart_sapması* ve *varyans* değerleri hesaplanmış tüm hesaplanan değerlerin ortalaması alınarak belirlenen kısıtlar için eşik değeri belirlenmiştir. Bu eşik değerleri sırasıyla, *mean_intestiy* = 160, *varyans* = 650 ve *standart_sapma* = 41 olarak bulunmuştur. Şekil 2 (c)'



Şekil 2. Boyamasız ve H&E olarak boyanmış tüm slayt görüntülerinin ikili maske ile maskelenmesi ve küçük yamalara ayrılması

bilgisi içermesi yani sadece arka plandan oluşan boş görüntü olmaması garanti altına alınmıştır. Bunun için anterior prostat dokusu veri seti [24] içerisinde her bir tüm slayt görüntü için uzmanlar tarafından manuel olarak oluşturulmuş maskeler bulunmaktadır. Veri setinde H&E boyalı ve boyasız tüm slaytların doku sınırlarını maskeleyen ikili görüntü formatında (binary image) bir adet maske görüntüsü bulunmaktadır. Şekil 2 (b)' de her bir tüm slayt görüntü çifti (boyasız ve H&E boyanmış) için kullanılan sadece doku bilgisi bulunan alanları maskeleyen ikili maske görüntüsü gösterilmektedir. Tüm slayt görüntülerden küçük yamalar koparılırken öncelikle boyasız ve H&E boyanmış tüm slayt görüntüleri ile ve (and) operasyonuna uğratarak görüntüde sadece doku bölgelerinin 1 kalan bölgelerin 0 piksel değeri ile çarpılması sağlanmıştır. Bu sayede bir tüm slayt görüntüde sadece doku bilgisinin bulunduğu alanlar maskelenmiştir. İkinci kısıt olarak tüm slayt görüntüden seçilen 1024×1024 boyutundaki yamanın odak dışı bozukluk içerip içermediği hesaplanmıştır.

de ikili maske görüntüsü ile maskelenmiş tüm slayt görüntüleri gösterilmektedir. Şekil 2 (d)' de doku sınırları maskelenmiş tüm slayt görüntülerin küçük yamalar şeklinde bölünmesi işlemi gösterilmektedir. Tüm slayt görüntülerden 1024×1024 'lük yamalar birbiriyle örtüşmeyecek şekilde pencere kaydırma miktarı 1024 olarak belirlenmiştir. Şekil 2 (d)' de gösterilen tüm slayt görüntülerin küçük yamalar olarak bölünmesi işleminde daha önceden anlatılan kısıtlar her bir tüm slayt görüntü için uygulanmıştır ve cGAN veri seti oluşturulmuştur. Anterior prostat dokusu veri setinde toplam 81 adet tüm slayt görüntü çifti (boyasız ve H&E boyanmış) bulunmaktadır. Referans çalışmada bu 81 adet tüm slayt görüntü çiftinin 13 tanesi test için kalan tüm slayt görüntüleri ise



Şekil 3. Koşullu çekişmeli üretici ağ (cGAN- The Conditional Generative Adversarial Network) mimarisi, (A) Boyamasız doku görüntülerini, H&E boyamalı görüntülere dönüştüren üretici ağ mimarisi, (B) Sahte ve gerçek görüntüleri birbirinden ayıran ayırıcı ağ mimarisi

eğitim aşamasında kullanılmıştır. Bu çalışmada ise eğitilmiş cGAN ağı referans çalışmada belirtilen 13 adet test görüntüsü ile test edilmiş ve sonuçlar Tablo 1’de verilmiştir. cGAN ağı için ise geri kalan 68 tüm slayt görüntüden rastgele 7 tanesi seçilmiş ve bu 7 tüm slayt görüntüden 1024x1024 boyutunda birbirleriyle örtüşmeyen toplam 3013 tane görüntü elde edilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan donanım (GPU kartı) orijinal veri setindeki 68 adet tüm slayt görüntü ile cGAN modelinin eğitiminde yetersiz kaldığı için en fazla kullanılabilir sayıda görüntü ile deneysel çalışmalar tamamlanmıştır.

3.2. Çekişmeli üretici ağ model mimarisi ve hiper-parametreler

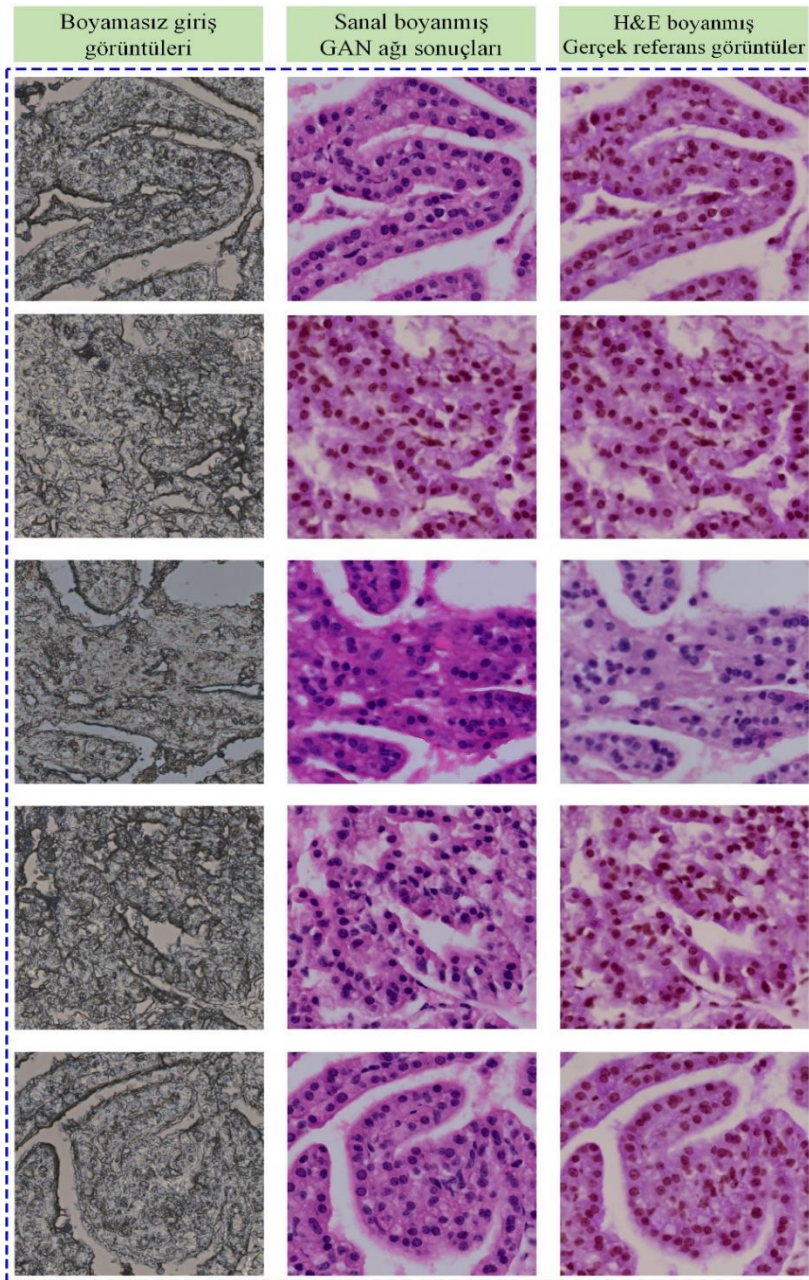
Deneysel çalışmada kullanılan koşullu çekişmeli üretici ağ modeli, bir adet üretici (G-generator) ve bir adet ayırıcı (D- discriminator) derin sinir ağından oluşmaktadır. Üretici ve ayırıcı ağlar rekabetçi bir şekilde eş zamanlı olarak eğitilirler ve birbirlerinin performansını iyileştirirler. Deneysel çalışmalarımızda, üretici G ve ayırıcı D ağıları Denklem 1’de gösterilen kayıp fonksiyonlarını en aza indirmek için eş zamanlı olarak optimize edilmiştir.

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{\text{üretici}} &= \alpha \times L_1\{I_{\text{ref}}, G(I_{\text{in}})\} - \lambda \\
 &\quad \times \log\left(\frac{1 + \text{SSIM}\{I_{\text{ref}}, G(I_{\text{in}})\}}{2}\right) \\
 &\quad + \omega \times \text{BCE}\{D(G(I_{\text{in}})), 1\}, \\
 \mathcal{L}_{\text{ayırıcı}} &= \text{BCE}\{D(G(I_{\text{in}})), 0\} + \text{BCE}\{D(G(I_{\text{ref}})), 1\}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Denklem 1’de G üretici ağı tahmin sonucunu (çıkarmını), D ise ayırıcının bir görüntünün gerçekten H&E boyanmış doku görüntüsü olma olasılığını temsil eder. I_{in} boyasız cGAN ağı giriş görüntülerini temsil etmekte, I_{ref} H&E boyanmış referans görüntüleri temsil etmektedir, $(\alpha, \lambda, \omega)$ ise $\mathcal{L}_{\text{üretici}}$ denkleminde kullanılan katsayılarıdır. Bu katsayılar, üreticinin çıkışı ile karşılık gelen referans görüntü arasındaki piksel bazlı düzgün (smooth) L1 hatası, üreticinin çıkışının yapısal benzerlik (SSIM) kaybı ve ayırıcının çıkış görüntüsüne ilişkin tahminlerinin ikili çapraz entropi (BCE-Binary cross entropy) kaybı arasındaki dengeyi sağlamak için kullanılmaktadır. Çalışma üç farklı kayıp fonksiyonu birlikte kullanılmıştır. Üretici ağ kayıp değeri üç farklı kayıp fonksiyonunu birleştirerek kullanır. L1 kayıp fonksiyonu, SSIM tabanlı kayıp ve ikili çapraz entropi (BCE-binary cross entropy) kaybı: L1 kaybı, ortalama mutlak hata (MAE- Mean Absolute Error) olarak da bilinmektedir, sentetik görüntü ile gerçek referans arasındaki ortalama mutlak farkı ölçer [32]. Bu kayıp fonksiyonu oluşturulan görüntünün piksel değerleri açısından gerçek görüntüye mümkün olduğunca yakın olmasını sağlar. SSIM tabanlı kayıp ile İki görüntü arasındaki parlaklık, kontrast ve yapısal(morfolojik) açıdan benzerlik ölçülür. SSIM tabanlı kayıp, sentetik olarak üretilen ve referans görüntüleri arasındaki yapısal benzerliği yakalamak için tasarlanmıştır. SSIM’ in logaritmasını alıp ölçekleyerek, referansla yapısal olarak farklı görüntüler oluşturduğu için üretici cezalandırır. İkili çapraz entropi kaybı (BCE), ayırıcının sentetik olarak üretilen görüntüyü gerçek olarak ne kadar iyi sınıflandırdığını ölçer [33]. Böylelikle üretici daha kaliteli gerçeğe yakın

görüntüler üretmek, ayırıcının gerçek olarak sınıflandıracağı görüntüler üretir. Böylece üretilen görüntülerin gerçeğe yakın olma olasılığı artırılır. Şekil 3 (a)' da gösterildiği gibi, üretici ağı 4 örnekleme seviyesine sahip U-Net [34] mimarisi kullanılarak oluşturulmuştur. Bu mimari, çeşitli ölçeklerde mekânsal özellik dönüşümlerini öğrenerek boyasız doku görüntülerini H&E boyanmış görüntülere dönüştürmek üzere tasarlanmıştır. U-Net mimarisi hem daha sığ seviyelerde yüksek çözünürlüklü yerel özellikleri hem de daha derin seviyelerde daha büyük ölçekli küresel bağlamı yakalamaktadır. U-Net ağı mimarisi, birbirine simetrik olan bir aşağı örnekleme yolu ve bir yukarı örnekleme yolundan oluşur. Aşağı örnekleme yolu dört aşağı örnekleme evrişimsel

bloğundan oluşur. Her blok, iki evrişimsel katmanlı bir artık bloğu (residual blocks), ardından bir aktivasyon bloğu (ReLU) ve aşağı örnekleme için 2 adım boyutuna sahip 2×2 pencere boyutuna sahip maksimum havuzlama işlemi içerir. Bir evrişimsel artık yolu, çekirdek boyutu 3×3 olan iki ardışık evrişimsel katmana sahip iki evrişimsel katmanlı artık bloklardaki giriş ve çıkış tensörlerini birbirine bağlar. Aşağı örnekleme işleminin her aşamasında, giriş kanalları ve çıkış kanalları sırasıyla 3, 64, 128 ve 256 ve 64, 128, 256 ve 512 olarak ayarlandı. Simetrik bir şekilde, yukarı örnekleme yolu, aşağı örnekleme evrişim bloklarına benzer şekilde tasarlanmış dört yukarı örnekleme evrişim bloğundan oluşur. Temel fark, $2x$ aşağı örnekleme (downsampling) işleminin $2x$ çift



Şekil 4. Boyasız giriş görüntülerinin koşullu çekişmeli üretici ağı modeli ile sanal boyanması sonucu elde edilen örnek görüntüler

Tablo 1. Boyamasız doku görüntülerinin sanal boyanması sonucunda gerçek referans görüntüler ile SSIM, PSNR ve PCC metrikleri bakımından karşılaştırılması ve elde edilen sonuçlar. Her bir görüntü için verilen değer, ilgili görüntünün tüm yamalarından hesaplanan değerlerinin ortalamasıdır

Tüm Slayt Görüntü	SSIM		PSNR		PCC	
	Bu çalışma	Referans çalışma	Bu çalışma	Referans çalışma	Bu çalışma	Referans çalışma
Görüntü 1	0,648	0,733	17,672	21,718	0,808	0,853
Görüntü 2	0,611	0,734	19,615	21,481	0,807	0,853
Görüntü 3	0,701	0,716	21,831	21,514	0,865	0,874
Görüntü 4	0,699	0,757	21,463	22,597	0,86	0,883
Görüntü 5	0,7	0,712	21,902	21,717	0,852	0,872
Görüntü 6	0,63	0,648	22,055	20,52	0,922	0,922
Görüntü 7	0,631	0,699	21,438	22,034	0,898	0,923
Görüntü 8	0,73	0,773	23,717	24,518	0,916	0,929
Görüntü 9	0,707	0,772	22,231	24,251	0,897	0,928
Görüntü 10	0,66	0,716	21,319	23,671	0,864	0,928
Görüntü 11	0,691	0,735	22,901	23,527	0,877	0,921
Görüntü 12	0,638	0,708	22,69	23,623	0,901	0,929
Görüntü 13	0,62	0,715	20,496	23,11	0,872	0,926
Ortalama	0,668	0,724	21,487	22,609	0,872	0,903
STD	0,038	0,032	1,485	1,168	0,035	0,030

doğrusal yukarı örnekleme (bilinear upsampling) işlemiyle değiştirilmesidir. Her yukarı örnekleme bloğu, önceki bloktan gelen çıkış tensörünün birleşimini ve aşağı örnekleme yolunun eşleşen seviyesinden karşılık gelen özellik haritalarını, bir bağlantı aracılığıyla giriş olarak alır. Yukarı örnekleme yolunun her seviyesindeki giriş kanalı ve çıkış kanalı sayıları giriş seviyeleri için 1024, 1024, 512 ve 256, çıkış seviyeleri için ise 1024, 512, 256 ve 128' dir. Yukarı örnekleme yolunu takiben, iki evrişimli katmanlı bir artık blok, ek bir tek evrişimli katmanla birlikte, kanal sayısını 3'e düşürerek gerçek referans görüntülerinin kanal sayısı ile hizalanır. Ayrıca, aşağı örnekleme yolu ve yukarı örnekleme yolunun boyutlarını bağlamak ve uyumlu hale getirmek için iki evrişimli katmanlı bir merkez blok kullanılmıştır. Şekil 3 (b)' de ayırıcı ağı yapısı gösterilmektedir. 3 kanallı üretici ağ çıktısı veya gerçek referans görüntüsü başlangıçta bir evrişimsel katman ve bir Leaky ReLU işlemi olan ilk blok tarafından 64 kanallı bir tensöre dönüştürülmüştür. Daha sonra, her giriş tensörünün kanal özellik sayısı iki katına çıkarılır ve altı ardışık iki evrişimsel katman bloğu kullanılarak aşağı örnekleme gerçekleştirilmiştir. Her bloğun adım boyutundaki ikinci evrişimsel katman, 2x aşağı örnekleme etkinleştirmek için 2 olarak ayarlanmıştır. Çıkış tensörü ortalaması alınmıştır ve altı bloktan geçtikten sonra tek boyutlu bir vektöre düzleştirilmiştir. Daha sonra bu vektör, giriş görüntüsünün H&E boyalı görüntü olma olasılığını belirlemek için iki tam bağlı katmana girdi olarak verilmiştir. Derin sinir ağının eğitimi aşamasında, eğitim veri setinin 1024×1024 piksel görüntülerinden rastgele seçilen 256×256 piksel görüntü yamaları, ağ modelini eğitmek için kullanılmıştır. Model eğitimi sırasında herhangi bir veri artırma uygulanmamıştır. Öğrenilebilir parametreler, üretici ağı için sırasıyla 3×10^{-5} ve ayırıcı ağ için

3×10^{-6} öğrenme oranlarıyla ağırlık azaltma özelliğine sahip bir Adam optimize edici kullanılarak güncellenmiştir. Üretici ağ için yığın boyutu 2 olarak belirlenmiştir. Üretici ve ayırıcı için ağırlık güncelleme sıklığı 2:1 dir. Koşullu çekişmeli üretici ağı hiperparametreleri, dijital patoloji görüntülerinin sanal boyanmasında yüksek başarımlı gösterdiği bilinen [35] referans çalışmasındaki değerler dikkate alınarak belirlenmiştir. Ağ, 500 dönem boyunca eğitilmiştir. Daha sonra, doğrulama görüntülerinin görsel incelemesiyle desteklenen ortalama karesel hata (MSE) kaybının değerlendirilmesiyle en uygun model test için kaydedilmiştir. Tüm görüntü ön işleme ve veri seti hazırlama işlemleri için Python (versiyon: 3.9.18) kullanılmıştır. Sanal boyama ağının geliştirilmesinde Python sürümü 3.9.18 ve Pytorch sürümü 2.1.0 kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar, Intel I7 11800H, 16GB RAM ve Nvidia RTX 3050 4GB RAM' e sahip bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir.

IV. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, boyanmamış doku görüntülerini H&E boyalı görüntülere dönüştürmek için GAN tabanlı modelimizin performansını referans çalışma veri setinden 13 test görüntüsü kullanarak değerlendirdik. Modelimiz, referans çalışmada kullanılan toplam veri setinin yaklaşık %10' unu oluşturan sınırlı sayıda 7 WSI görüntüsünde eğitildi. Çalışmada elde edilen sonuçlar Tablo 1' de gösterilmektedir. Modelin eğitiminde 7 adet tüm slayt görüntüden elde edilen 1024×1024 boyutunda yamalar kullanılmıştır ve toplam 3013 adet yama ile model eğitilmiştir (referans çalışmada model eğitiminde 1149516 adet yama kullanılmıştır). Referans çalışmada eğitim için 68 adet tüm slayt görüntü bulunmaktadır, kullandığımız GPU' nun hesaplama kapasitesinin yetersiz olmasından dolayı bu çalışmada anterior prostat dokusu [24] veri

setindeki tüm slayt görüntülerin yaklaşık ~%10 u çalışmaya dahil edilmiştir. Veri setinin sadece ~%10 u (68 tam slayt görüntüsünden 7'si) kullanılarak yapılan deneysel çalışma sonuçlarına göre, sınırlı eğitim verilerine rağmen, modelimiz Tablo 1' de ayrıntılı olarak açıklandığı gibi SSIM, PSNR ve PCC ölçümleri açısından referans çalışmayla karşılaştırılabilir sonuçlar elde etmiştir. Çalışmada elde edilen SSIM değerleri 0,611 ile 0,73 arasında değişmekte olup, ortalaması 0,668 ve standart sapması 0,038'dir. Buna karşılık, referans çalışmada SSIM değerleri 0,648 ile 0,773 arasında değişmekte olup, ortalaması 0,724 ve standart sapması 0,032'dir. SSIM değerlerimiz ortalama olarak biraz daha düşük olsa da sonuçlar önemli ölçüde daha küçük eğitim veri kümesi göz önüne alındığında hala makul bir aralıktadır. Sonuçlar, modelimizin azaltılmış eğitim verilerine rağmen referans çalışmadaki görüntülere göre yapısal olarak benzer görüntüler üretebildiğini göstermektedir. Çalışmamızdaki PSNR değerleri 17,672 ile 23,717 arasında değişmektedir, ortalaması 21,487 ve standart sapması 1,485 olarak hesaplanmıştır. Referans çalışmada ise PSNR değeri 20,52 ile 24,518 arasında değişmektedir, ortalaması 22,609 ve standart sapması 1,168'dir. Çalışmamız için PCC değerleri 0,807 ile 0,922 arasında değişmektedir ve ortalaması 0,872 ve standart sapması 0,035'tir. Referans çalışmada ise PCC değerleri 0,853 ile 0,929 arasında değişmekte olup, ortalaması 0,903 ve standart sapması 0,030'dur. Bizim PCC değerlerimiz biraz daha düşüktür ancak yine de üretilen ve referans görüntüler arasında yüksek derecede bir korelasyon görülmektedir. Özellikle, Görüntü 6 için modelimiz 0,922 ile eşit bir PCC değerine ulaşmıştır, bu üretilen ve referans görüntüler arasında yüksek derecede bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda, modelimizin genel boyama desenlerini ve piksel yoğunlukları arasındaki ilişkileri etkili bir şekilde yakaladığını ortaya koymaktadır. Özellikle daha yüksek detaya sahip olan görüntüler için hem referans çalışma hem de çalışmamız ~0,92 ile yaklaşık aynı değerleri üretmektedir. Sonuçlar, referans çalışmada kullanılan veri setinin yalnızca %10' u üzerinde eğitilmiş olmasına rağmen modelimizin üç metriğe de karşılaştırılabilir performans gösterdiğini göstermektedir. SSIM, PSNR ve PCC' deki hafif azalmalar, sınırlı eğitim verileri nedeniyle beklenmektedir. Ancak, modelimizin benzer ortalama değerlere ve standart sapmalara ulaşması, iyi genelleştirilebildiğini ve boyanmamış doku görüntülerinden yüksek kaliteli H&E boyalı görüntüler üretebileceğini göstermektedir. Şekil 4' te modelimizin ürettiği boyanmamış doku görüntülerinden yüksek kaliteli sanal H&E boyalı görüntüler gösterilmektedir. Tüm görüntüler ayrı ayrı incelendiğinde modelimiz, Görüntü 3 ve 6 için modelimiz karşılaştırılabilir SSIM ve PCC değerlerini korurken daha iyi PSNR elde etmiştir. Veri boyutu önemli ölçüde azaltılmış bir veri kümesiyle bile, modelimizin boyanmamış doku görüntülerini H&E boyalı görüntülere dönüştürmedeki etkinliği ortaya

konmaktadır. Önerilen yöntem ile performans ölçümlerinde hafif bir azalma olsa da eğitim verilerinin yalnızca %10' u ile karşılaştırılabilir sonuçlar elde etme yeteneği, verimlilik ve kaynak kullanımında önemli bir ilerlemeyi temsil etmektedir.

V. SONUÇ

Bu çalışmada boyasız doku görüntülerini H&E boyalı görüntülere dönüştürmek için cGAN tabanlı bir modelin etkinliği araştırılmıştır. Çalışmada yedi tüm slayt görüntüsü küçük yamalara ayrılıp daha sonra her bir yama bir görüntü ön işlemden geçirilerek veri seti oluşturulmuştur. Veri setindeki görüntüler cGAN modeli ile eğitilerek eğitilmiş model boyamasız görüntü çiftleri ile test edilmiş ve boyamasız görüntü çiftleri sanal H&E boyalı görüntülere dönüştürülmüştür. Sanal boyalı H&E görüntüler ile gerçek referans görüntüler üç ayrı değerlendirme metriği (SSIM, PSNR ve PCC) açısından kıyaslanmıştır ve elde edilen sonuçlar raporlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, 13 test görüntüsü için çalışmamız SSIM, PSNR ve PCC değerleri açısından sırasıyla ortalama 0,668, 21,487 ve 0,872 olarak hesaplanmıştır. Referans çalışma ile çalışmamızda elde ettiğimiz sonuçların metrikler açısından farkı SSIM için ~5 puan, PSNR için ~1 puan, PCC için ise ~3 puan referans çalışmadaki değerler daha yüksektir. Çalışmamızda kullanılan tüm slayt görüntüler, referans çalışmadaki tüm slayt görüntülerin ~%10' u olduğu düşünüldüğünde elde edilen sonuçların karşılaştırılabilir ve rekabet edilebilir olduğu görülmektedir. Ayrıca referans çalışmada model dört ayrı GPU ile yaklaşık 340 saat eğitilmiştir. Çalışmamızda tek bir GPU ile modelimizin eğitim süresi ~17 saattir. Çalışmamız referans çalışmaya göre 80 kat $((340*4)/17)$ daha az hesaplama süresine sahiptir. Sonuçlar dikkate alındığında çalışmamız özellikle referans çalışma ile mukayese edildiğinde enerji verimliliği bakımından büyük bir kazanım göstermektedir. Deneysel çalışmalarda kullanılan ekran kartı hızlandırıcısı standart olarak birçok bilgisayar altyapısında bulunabilen düşük maliyetli ve ulaşılabilir bir donanım hızlandırıcısıdır. Bu sebeple, özel donanım hızlandırıcılarının yüksek maliyetinden kurtularak, daha düşük hesaplama kapasitesine sahip bir donanım ile rekabetçi sonuçlar elde edilmiştir. Referans çalışma ile kıyaslandığında, elde edilen sonuçlar ile gerçek referans görüntüler arasında nitel olarak hemen hemen bir fark olmadığı, nicel olarak değerlendirildiğinde ise metrik sonuçlarının kabul edilebilir uzaklıkta hesaplandığı söylenebilir. Özellikle çok düşük hesaplama maliyeti ve az etiketli veri miktarı ile deneysel çalışmanın tamamlanması dikkate alındığında elde edilen sonuçların kabul edilebilir sınırların üzerinde olduğu ortaya görülmektedir. Bu bulgular, özellikle çok sayıda eğitim görüntüsü edinmenin zor olduğu senaryolarda faydalı olabilecek, azaltılmış bir veri setiyle verimli ve etkili görüntü dönüşümü elde etme yaklaşımımızın potansiyelini vurgulamaktadır ve büyük miktarda etiketli verinin

elde edilmesinin zor veya maliyetli olduğu senaryolarda özellikle değerlidir. Elde edilen sonuçlar görsel olarak incelendiğinde, morfolojik özelliklerin korunduğu, hücre çekirdeklerinin sayısı ve konumlarının doğru şekilde oluşturulduğu ve boyandığı görülmektedir. Ayrıca klinik çalışmalarda kimyasal boyama için gereksinim duyulan uzmanlık bilgisinin ve maliyetin azaltılarak verimlilik artışı sağlanacaktır. Referans çalışmadaki histopatolojik görüntülerin H&E boyaması sonucunda boyama varyansları (stain variations) bulunmaktadır. Boyamadan kaynaklı varyasyonlar üretilen sentetik görüntüler arasında renk farklılıkları oluşturmaktadır, bu farklılıklar görsel olarak da görülmektedir. Sonraki çalışmamızda H&E boyamadan kaynaklı oluşan varyasyonların giderilmesi için derin sinir ağı tabanlı stil transformasyonu yöntemi test edilecektir. Ayrıca derin öğrenme yaklaşımı ile birden fazla boyama modalitesini tek bir ağ tarafından gerçekleştirebilen hibrit bir model oluşturulması hedeflenmiştir. Gelecekteki çalışmalar, eğitim verilerini artırmaya veya modelin performansını daha da iyileştirmek için U-Net modeline dikkat mekanizması eklenerek kullanmaya odaklanılacaktır. Sonuç olarak, çalışmamız, GAN tabanlı bir modelin, önemli ölçüde daha küçük bir eğitim veri setiyle bile boyanmamış doku görüntülerini H&E boyalı görüntülere dönüştürmede referansa yakın performans elde edebileceğini göstermektedir. Bu, verimli ve ölçeklenebilir histopatolojik görüntü analizi için yeni olanaklar sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] J. D. Martina, C. Simmons, and D. M. Jukic, "High-definition hematoxylin and eosin staining in a transition to digital pathology," *J Pathol Inform*, vol. 2, no. 1, 2011, doi: 10.4103/2153-3539.86284.
- [2] M. G. Hanna *et al.*, "Integrating digital pathology into clinical practice," 2022. doi: 10.1038/s41379-021-00929-0.
- [3] K. Bera, K. A. Schalper, D. L. Rimm, V. Velcheti, and A. Madabhushi, "Artificial intelligence in digital pathology — new tools for diagnosis and precision oncology," *Nat Rev Clin Oncol*, vol. 16, no. 11, 2019, doi: 10.1038/s41571-019-0252-y.
- [4] V. Baxi, R. Edwards, M. Montalto, and S. Saha, "Digital pathology and artificial intelligence in translational medicine and clinical practice," 2022. doi: 10.1038/s41379-021-00919-2.
- [5] R. Colling *et al.*, "Artificial intelligence in digital pathology: a roadmap to routine use in clinical practice," *Journal of Pathology*, vol. 249, no. 2, 2019, doi: 10.1002/path.5310.
- [6] B. Acs and J. Hartman, "Next generation pathology: artificial intelligence enhances histopathology practice," 2020. doi: 10.1002/path.5343.
- [7] H. Reza Tizhoosh and L. Pantanowitz, "Artificial intelligence and digital pathology: Challenges and opportunities," *J Pathol Inform*, vol. 9, no. 1, 2018, doi: 10.4103/jpi.jpi_53_18.
- [8] T. M. Abraham *et al.*, "Label- and slide-free tissue histology using 3D epi-mode quantitative phase imaging and virtual hematoxylin and eosin staining," *Optica*, vol. 10, no. 12, 2023, doi: 10.1364/optica.502859.
- [9] S. Koivukoski, U. Khan, P. Ruusuvoori, and L. Latonen, "Unstained Tissue Imaging and Virtual Hematoxylin and Eosin Staining of Histologic Whole Slide Images," *Laboratory Investigation*, vol. 103, no. 5, 2023, doi: 10.1016/j.labinv.2023.100070.
- [10] G. Wolflein, I. H. Um, D. J. Harrison, and O. Arandjelovic, "HoechstGAN: Virtual Lymphocyte Staining Using Generative Adversarial Networks," in *Proceedings - IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision, WACV 2023*, doi: 10.1109/WACV56688.2023.00497.
- [11] A. Yilmaz, T. Aydın, and R. Varol, "Virtual staining for pixel-wise and quantitative analysis of single cell images," *Sci Rep*, vol. 13, no. 1, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-45150-y.
- [12] S. Biswas and S. Barma, "Feature Fusion GAN Based Virtual Staining on Plant Microscopy Images," *IEEE/ACM Trans Comput Biol Bioinform*, 2024, doi: 10.1109/TCBB.2024.3380634.
- [13] K. Sun, Z. Chen, G. Wang, J. Liu, X. Ye, and Y. G. Jiang, "Bi-directional Feature Fusion Generative Adversarial Network for Ultra-high Resolution Pathological Image Virtual Restaining," in *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2023. doi: 10.1109/CVPR52729.2023.00380.
- [14] A. Golfé, R. del Amor, A. Colomer, M. A. Sales, L. Terradez, and V. Naranjo, "ProGleason-GAN: Conditional progressive growing GAN for prostatic cancer Gleason grade patch synthesis," *Comput Methods Programs Biomed*, vol. 240, 2023, doi: 10.1016/j.cmpb.2023.107695.
- [15] K. de Haan *et al.*, "Deep learning-based transformation of H&E stained tissues into special stains," *Nat Commun*, vol. 12, no. 1, 2021, doi: 10.1038/s41467-021-25221-2.

- [16] X. Meng, X. Li, and X. Wang, "A Computationally Virtual Histological Staining Method to Ovarian Cancer Tissue by Deep Generative Adversarial Networks," *Comput Math Methods Med*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/4244157.
- [17] Y. Zhang, K. de Haan, Y. Rivenson, J. Li, A. Delis, and A. Ozcan, "Digital synthesis of histological stains using micro-structured and multiplexed virtual staining of label-free tissue," *Light Sci Appl*, vol. 9, no. 1, 2020, doi: 10.1038/s41377-020-0315-y.
- [18] J. Boschman *et al.*, "The utility of color normalization for AI-based diagnosis of hematoxylin and eosin-stained pathology images," *Journal of Pathology*, vol. 256, no. 1, 2022, doi: 10.1002/path.5797.
- [19] T. A. Azevedo Tosta, P. R. de Faria, L. A. Neves, and M. Z. do Nascimento, "Computational normalization of H&E-stained histological images: Progress, challenges and future potential," 2019. doi: 10.1016/j.artmed.2018.10.004.
- [20] S. Vijh, M. Saraswat, and S. Kumar, "A new complete color normalization method for H&E stained histopathological images," *Applied Intelligence*, vol. 51, no. 11, 2021, doi: 10.1007/s10489-021-02231-7.
- [21] A. Janowczyk, A. Basavanthally, and A. Madabhushi, "Stain Normalization using Sparse AutoEncoders (StaNoSA): Application to digital pathology," *Computerized Medical Imaging and Graphics*, vol. 57, 2017, doi: 10.1016/j.compmedimag.2016.05.003.
- [22] M. Z. Hoque, A. Keskinarkaus, P. Nyberg, and T. Seppänen, "Stain normalization methods for histopathology image analysis: A comprehensive review and experimental comparison," *Information Fusion*, vol. 102, 2024, doi: 10.1016/j.inffus.2023.101997.
- [23] J. Vasiljević, F. Feuerhake, C. Wemmert, and T. Lampert, "HistoStarGAN: A unified approach to stain normalisation, stain transfer and stain invariant segmentation in renal histopathology," *Knowl Based Syst*, vol. 277, 2023, doi: 10.1016/j.knosys.2023.110780.
- [24] U. Khan, S. Koivukoski, M. Valkonen, L. Latonen, and P. Ruusuvoori, "The effect of neural network architecture on virtual H&E staining: Systematic assessment of histological feasibility," *Patterns*, vol. 4, no. 5, 2023, doi: 10.1016/j.patter.2023.100725.
- [25] I. J. Goodfellow *et al.*, "Generative adversarial nets," in *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2014. doi: 10.1007/978-3-658-40442-0_9.
- [26] R. Yan *et al.*, "Unpaired virtual histological staining using prior-guided generative adversarial networks," *Computerized Medical Imaging and Graphics*, vol. 105, 2023, doi: 10.1016/j.compmedimag.2023.102185.
- [27] H. Zhang, V. Sindagi, and V. M. Patel, "Image De-Raining Using a Conditional Generative Adversarial Network," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 30, no. 11, 2020, doi: 10.1109/TCSVT.2019.2920407.
- [28] Z. Wang, *et al.*, "Image quality assessment: From error visibility to structural similarity," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 13, no. 4, 2004, doi: 10.1109/TIP.2003.819861.
- [29] D. R. I. M. Setiadi, "PSNR vs SSIM: imperceptibility quality assessment for image steganography," *Multimed Tools Appl*, vol. 80, no. 6, 2021, doi: 10.1007/s11042-020-10035-z.
- [30] H. Rahadian, S. Bandong, A. Widyotriatmo, and E. Joelianto, "Image encoding selection based on Pearson correlation coefficient for time series anomaly detection," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 82, 2023, doi: 10.1016/j.aej.2023.09.070.
- [31] O. Ciga, T. Xu, *et al.*, "Overcoming the limitations of patch-based learning to detect cancer in whole slide images," *Sci Rep*, vol. 11, no. 1, 2021, doi: 10.1038/s41598-021-88494-z.
- [32] Y. Tian, D. Su, S. Lauria, and X. Liu, "Recent advances on loss functions in deep learning for computer vision," 2022. doi: 10.1016/j.neucom.2022.04.127.
- [33] A. Salar and A. Ahmadi, "Improving loss function for deep convolutional neural network applied in automatic image annotation," *Visual Computer*, vol. 40, no. 3, 2024, doi: 10.1007/s00371-023-02873-3.
- [34] O. Ronneberger, P. Fischer, and T. Brox, "U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation," in *Lecture Notes in Computer Science*, 2015. doi: 10.1007/978-3-319-24574-4_28.
- [35] Bijie Bai, *et al.* Label-Free Virtual HER2 Immunohistochemical Staining of Breast Tissue using Deep Learning. *BME Front*. 2022; DOI:10.34133/2022/9786242

Comparison of Sound Insulation Performance of Water Drop and Trapezoidal Sound Barriers

Arif DOĞAN¹ , Ahmet ASLANDAĞ² , Paşa YAYLA¹ 

¹ Marmara University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, 34840, Istanbul, Türkiye

² Kasso Mühendislik San. ve Tic. A.Ş., 34953, Istanbul, Türkiye

Abstract

With increasing urbanization and industrialization, noise pollution has become a significant environmental issue. This study compares the sound insulation performance of two different sound barrier designs: water drop and trapezoidal. COMSOL Multiphysics software for computational simulations is used to calculate sound transmission loss (STL). The results indicated that the water drop design provides more effective sound insulation compared to the trapezoidal model. Additionally, economic analyses suggest that the water drop design may offer long-term advantages despite higher initial costs.

Keywords: Sound insulation, Water drop design, Trapezoidal design, Noise barrier, COMSOL Multiphysics, Sound transmission loss, STL.

I. INTRODUCTION

Noise pollution is an escalating issue in urban areas, significantly affecting the quality of life for residents. As cities grow denser, the challenge of mitigating environmental noise becomes increasingly complex. Traditional methods of noise reduction, such as using sound barriers, have proven effective but are not without limitations. These barriers, typically constructed from materials like glass and plastic composites, face issues related to durability and effectiveness under various conditions.

In this study, the comparative performance of two innovative noise barrier designs: a trapezoidal model and a water drop-shaped model is investigated. The primary goal is to determine which design offers superior sound insulation and overall efficiency. One of the advanced simulation tools, such as COMSOL Multiphysics, is used to conduct detailed analyses.

The trapezoidal design is well-known for its ease of production and cost-effectiveness. In contrast, the water drop design, with its aesthetically pleasing shape, promises better performance in sound insulation but at a higher production cost. This study aims to provide a comprehensive analysis of these designs, considering both their sound insulation performance and practical application in real-world scenarios.

By integrating numerical simulations and empirical data, this study seeks to advance the current understanding of noise barrier technologies. The findings will help in developing more effective and durable noise mitigation solutions for urban environments, ultimately contributing to improved living conditions and public health.

The trapezoidal sound barrier design is popular due to its ease of production and cost-effectiveness. However, there is potential that the more intricate droplet (water drop) design could offer superior visual aesthetics and sound insulation. This study aims to compare the two designs in terms of sound insulation performance. By evaluating these factors, the study seeks to determine if the droplet model can serve as a viable and advantageous alternative to the conventional trapezoidal system, addressing a gap in current noise barrier design exploration.

1.2. Literature Review

The literature mainly focuses on three main subtopics relevant to sound barriers. Firstly, sound barriers play a crucial role in addressing noise pollution by providing practical solutions to mitigate excessive environmental noise. This subtopic provides an overview of the fundamental principles governing sound barriers and their essential function in noise mitigation [1, 2]. By reducing the intensity of unwanted noise, sound barriers significantly enhance the quality of life in urban and suburban environments [3, 4]. Secondly, with the rise of urbanization and industrialization, noise pollution has become a pervasive challenge, prompting the development of effective countermeasures such as sound barriers [5, 6]. These barriers are designed to impede the transmission of sound waves from noise sources, evolving from basic physical structures to advanced solutions that consider effectiveness, aesthetics, and environmental factors [7, 8]. The historical evolution and modern advancements in sound barrier technology are explored, highlighting their primary role in reducing environmental noise and improving community well-being [9, 10]. Thirdly, understanding the mechanisms employed by sound barriers is crucial for grasping their functional significance in noise mitigation [11, 12]. These mechanisms include absorption, where materials dissipate sound energy as heat; reflection, where sound waves are redirected back toward the source; and diffraction, where sound waves bend around or over the barrier [13, 14]. Additionally, sound barriers aim to achieve transmission loss by preventing sound energy from passing through and may incorporate resonance control and vibration-damping materials to minimize structure-borne noise [15, 16]. Modern advancements also include adaptive technologies that adjust to changing conditions, optimizing noise reduction in real-time [17].

1.2.1. Trapezoidal sound barriers: Design, performance, and applications

Trapezoidal sound barriers are a specialized category of noise mitigation structures, distinguished by their unique trapezoidal shape, as seen in Figure 1. This design features a tapered appearance, with one side of the barrier being notably shorter than the opposite side, resulting in a distinctive trapezoid-like silhouette [7, 9]. This particular configuration is not only aesthetically pleasing but also optimized to enhance the barrier's effectiveness in deflecting and absorbing sound. Consequently, trapezoidal sound [18, 19] barriers are a significant choice for various noise control applications.



Figure 1. Trapezoidal prototype view, actual view, cad view.

1.2.2. Droplet model for sound barriers: Aesthetic and acoustic advancements

The Droplet Model for sound barriers represents a groundbreaking integration of aesthetic appeal and acoustic innovation, as seen in Figure 2. Inspired by the natural form and characteristics of droplets, this model aims to elevate noise control solutions by advanced sound attenuation capabilities [20, 21]. It is designed to not only mitigate noise effectively but also to enhance the visual landscape, offering a harmonious blend of functionality and design [22, 23].

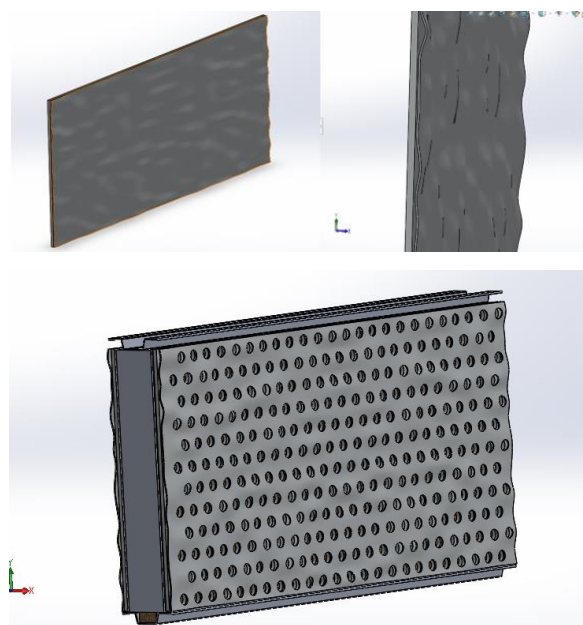


Figure 1. Water-drop design CAD view.

II. MATERIALS AND METHODS

This section describes the materials and methodologies employed in comparing the sound insulation performance of the trapezoidal and water drop sound barrier designs. The study utilized computational simulations to analyze Sound Transmission Loss (STL) across these different geometries, ensuring a comprehensive evaluation of their effectiveness.

2.1. Materials

The materials used for the sound barriers in this study include:

Aluminum Panels: Both designs were constructed using aluminum due to their favorable properties such as durability, lightweight, and ease of fabrication.

2.2. Methods

Computational Simulations:

The primary tool for analysis was the COMSOL Multiphysics software, a powerful platform for simulating physical phenomena. The following steps outline the simulation process:

- a) **Modeling the Designs:** Detailed 3D models of both the trapezoidal and water drop designs were created using CAD software and imported into COMSOL. The geometric parameters for each design were carefully defined to match real-world specifications.
- b) **Defining Material Properties:** The material properties of aluminum and the absorptive coating were input into the software, ensuring accurate simulation results.
- c) **Setting Up Boundary Conditions:** Appropriate boundary conditions were established to simulate the environment accurately. This included defining the incident sound waves and the reflective properties of the materials. The simulations were conducted under standardized environmental conditions to maintain consistency.
- d) **Simulation Execution:** The STL for both designs was calculated across a range of frequencies (100 Hz to 5000 Hz). The simulations were run iteratively to verify the consistency and reliability of the results.

2.3. Analysis, Calculations, and Background

2.3.1. Acoustic-structure analysis

Domain equations:

In the realm of pressure acoustics, simulating harmonic sound waves, especially in aquatic environments, involves using the Helmholtz equation to model sound pressure dynamics [24];

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_c} \nabla p \right) - \frac{\omega^2 p}{\rho_c \cdot c_c^2} = 0 \quad (1)$$

Here, p represents pressure (N/m²), ρ_c is the fluid's density (kg/m³), ω is the angular frequency (rad/s), and c_c is the speed of sound (m/s). Although both the density and speed of sound can be complex-valued to account for energy dissipation, in this model, they are considered real due to the absence of damping effects.

Boundary Conditions:

At the outer boundary of the air domain, an incident plane wave simulates an incoming sound wave, while a spherical wave, produced by the cylinder, propagates outward from the system. This is implemented using the spherical wave radiation boundary condition in the Pressure Acoustics, Frequency Domain interface. The incident wave's direction \mathbf{k} is defined by angles θ (0 to π) and ϕ (0 to 2π). Parameters for the incident wave are specified under the Incident Pressure Field feature.

Interface Cylinder-Water

The coupling between the fluid domain (pressure waves) and the solid is handled by the Acoustic-Structure Boundary multiphysics coupling. The boundary load F on the solid cylinder is given by [24];

$$F = -n_s p \quad (2)$$

where n_s is the outward-pointing unit normal vector in the solid domain. In equation 2, the unit of F is Newton, n_s is unitless quantity, and p is pressure in Pascal (Pa); however, since the pressure is associated with the load expressed in Newtons [N], the multiplication of the pressure by the unit normal vector yields a result in Newtons [N].

On the fluid side, the normal acceleration is matched with the solid's normal acceleration [24];

$$-n_a \cdot \left(-\frac{1}{\rho_0} \nabla p + q \right) = a_n \quad (3)$$

where n_a is the outward-pointing unit normal vector in the acoustics domain, and a_n is the normal acceleration of the solid, given by $(n_a u) \omega^2$, where u is the calculated harmonic-displacement vector of the solid structure.

Hard-wall comparison

For comparison, a simplified model treats the solid boundary as an impenetrable barrier, unaffected by acoustic waves but influencing the sound distribution. This is modeled by fixing displacement (u) to zero, resulting in the sound hard boundary condition [24];

$$n_a \cdot \left(-\frac{1}{\rho_0} \nabla p + q \right) = 0 \quad (4)$$

2.3.2. Sound transmission loss analysis

A key measure for evaluating a material's effectiveness in sound insulation is the STL, also referred to as the sound reduction index. While the specifics of its computation will be elaborated upon in subsequent sections, fundamentally, STL quantifies the disparity between incident and transmitted sound pressures. The STL value for a barrier is influenced by its material composition and structural design, varying across different frequencies. The primary determinant of STL across a spectrum lies in the frequency-specific response, which allows for the categorization of the STL profile into four distinct frequency-based regions, as depicted in Figure 3, as outlined in the sections that follow.

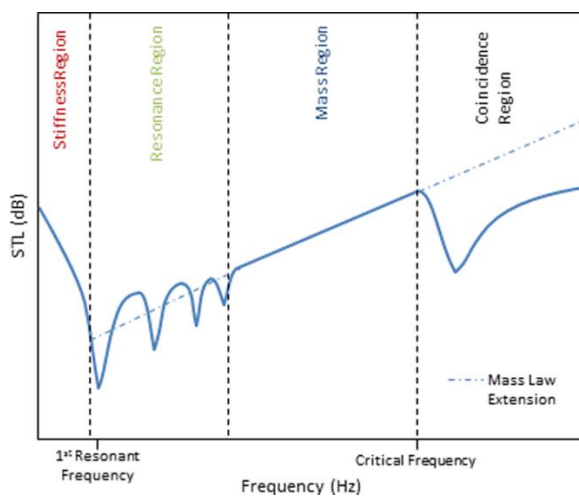


Figure 3. Frequency-dependent sound transmission regions of a panel [30].

In the lower frequency spectrum, the stiffness of the panel primarily dictates the STL, with damping and mass playing minimal roles, as seen Figure 3. Within this bandwidth, an increase in STL is noted alongside an elevation in the panel's first resonance frequency, culminating at the onset of this resonance. As frequencies ascend slightly above this threshold, the panel's natural resonances take precedence in influencing STL. These resonances, indicative of heightened panel vibrations, are determined by the panel's material, dimensions, and installation specifics. The interaction with these resonant frequencies results in significant sound energy transfer across the panel, manifesting as marked reductions in STL [30].

Progressing beyond the resonance domain, the panel's STL enters the mass-controlled region, which is crucial for numerous sound insulation endeavors. It is in this domain that the mass law comes into play, offering a precise STL estimation based on the panel's mass [30].

$$STL = 10 \log \left[1 + \left(\frac{m\omega \cos \theta}{2\rho c} \right)^2 \right] \tag{5}$$

Where m denotes the mass per unit area, ω signifies the angular frequency, θ is the incident angle, ρ represents the density of the acoustic medium, and c is the velocity of sound within the acoustic medium. For waves that are normally incident, the angle of incidence is 0° . By substituting this angle into the equation, converting the angular frequency to cyclic frequency (where $\omega/2\pi=f$), and assuming that $m\omega/(2\rho c)\gg 1$, the mass law can be simplified to the normal incidence mass law [30];

$$STL = 20 \log(fm) - 42 \text{ dB} \tag{6}$$

where f is the cyclic frequency in Hertz and m is the mass per unit area. While Eq. 6 is an empirical law, it accurately describes sound transmission in the mass region and provides a rough estimate for sound transmission in the resonance region. At even higher frequencies, bending waves can cause the phenomenon known as the coincidence effect. The coincidence effect first appears at the critical frequency (f_c) of the panel, which is given by [30];

$$f_c = \frac{c^2}{1.8h} \sqrt{\frac{\rho}{E}} \tag{7}$$

In this formula, c represents the speed of sound within the material, ρ denotes the material's density, and E signifies the material's elastic modulus. The coincidence effect emerges when the wavelengths of the bending waves within the barrier align with those of the incoming sound waves. Such alignment ensures that the bending movement of the barrier synchronizes with the surface movements of the panel. This synchronization facilitates a heightened transfer of sound energy from the incident waves to the other side of the panel, leading to a significant reduction in STL, a phenomenon often described as the coincidence dip, commencing at the critical frequency. This specific frequency range is identified as the coincidence region.

The STL through a building component, like a door, a window, a wall segment, or a sound insulation structure, is defined as the ratio expressed in dB of the total incident power P_{in} on the structure relative to the total transmitted power P_{tr} [25];

$$STL = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{in}}{P_{tr}} \right) \tag{8}$$

STL measurements are calibrated under the assumption of a diffuse acoustic environment on the source side. There are established standards for STL assessment, such as ASTM E90 and ISO 10140, all designed to either directly or indirectly quantify the power of both incident and transmitted sound waves. A prevalent methodology employed is known as the two-room technique. This approach typically involves a reverberation chamber on the source end. Depending on the setup, the receiving end may also feature a

reverberation room (creating a reverberant-reverberant configuration) or, alternatively, an anechoic chamber (resulting in a reverberant-anechoic setup). Illustrations of these setups are provided in Figure 4 for visual reference.

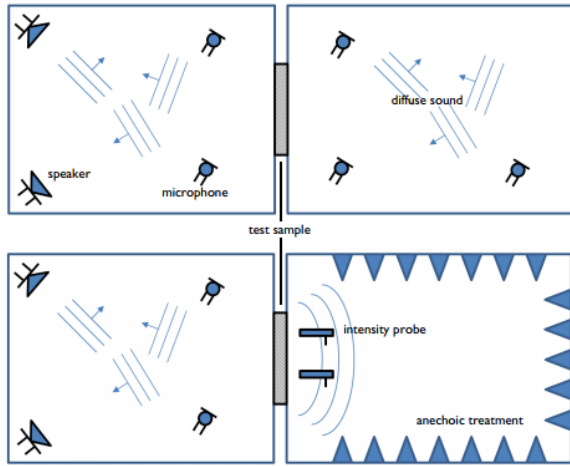


Figure 4. Two variations of the two-room configuration for measuring the sound transmission loss. Top: source and receiver reverberation rooms. Bottom: source reverberation room and receiver anechoic room [25].

In both cases, the incident power on the source side is computed as [25];

$$P_{in} = \frac{p_{rms}^2}{4\rho_0 c_0} S_s \tag{9}$$

where S_s is the area of the test surface on the source side (the area of the concrete wall tested), p_{rms} is the RMS pressure in the source room, ρ_0 is the air density, and c_0 is the speed of sound in air. This expression is derived by considering the incident power on a surface in an ideal diffuse acoustic field.

The expressions used to compute the incident and transmitted power for the reverberant case are only valid as long as the acoustic field is diffuse. A measure for the upper limit of modal behavior is given by the Schroeder frequency [25];

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T_{60}}{V}} \tag{10}$$

where V is the room volume and T_{60} is the reverberation time. A room of volume V is said to be acoustically large when the studied frequency f is larger than the Schroeder frequency, giving the condition [25];

$$V > \left(\frac{2000}{f}\right)^2 T_{60} \tag{11}$$

Reverberant-Reverberant Setup

In the setup where the receiver room is a reverberation room (Figure 4 top) and the sound field is assumed to diffuse, the transmitted power is given by [25];

$$P_{tr} = \frac{p_{rms}^2}{4\rho_0 c_0} A_r \quad A_r = \sum_i S_i a_i \tag{12}$$

where p_{rms} is the RMS pressure in the receiver room and A_r is the receiver room absorption area, that is, the sum of products between each surface area S_i and its absorption coefficient a_i . The expression stems from an energy balance consideration where the total absorbed energy is equal to the radiated energy of the source. Combining Equation 9 and Equation 12 gives the expression for the STL for the reverberant-reverberant setup [25];

$$STL = SPL_s - SPL_r + 10 \log_{10} \left(\frac{S_s}{A_r}\right) \tag{13}$$

where SPL_s and SPL_r are the average sound pressure levels in the source and the receiver room, respectively. Averaging is done on the squared pressure before transforming to the dB scale.

Note that a correction to Equation 12 is sometimes introduced based on the Waterhouse expression. In a room with a diffuse field, the RMS pressure at the walls will be larger by a factor of 2 because each incident wave is coherent with its corresponding reflected wave. The corrected expression reads [25];

$$P_{tr} = \frac{\rho_{(rms)}^2}{\rho_0 c_0^2} V_r \left(1 + \frac{s_r \lambda}{8V_r}\right) \frac{13.8}{EDT} \tag{14}$$

where EDT is the early decay time, V_r is the receiver room volume, S_r the receiver room surface area, and λ is the wavelength.

Reverberant-Anechoic Setup

In the reverberant-anechoic configuration (Figure 4 bottom), the transmitted power is directly measured on the receiver side using an intensity probe. The measurement is performed in several locations in front of the test element and averaged. The transmitted power is then simply given by [25];

$$P_{tr} = S_r I_{tr} \tag{15}$$

combining this expression with Equations 8 and 9 gives [25];

$$STL = SPL_s - SIL_{tr} + 10 \log_{10} \left(\frac{S_s}{S_r}\right) - 6.14 \tag{16}$$

SIL_{tr} is the transmitted sound intensity level, and for flat samples, $S_s = S_r$. The numeric constant stems directly from the definitions of SPL and SIL and the equations for the power, it is expressed as [25];

$$10 \log_{10} \left(\frac{1}{4} \frac{(p_{ref})^2}{I_{ref} \rho_0 c_0} \right) \approx -6.14 \quad (17)$$

where $p_{ref} = 20 \mu\text{Pa}$, $I_{ref} = 10^{-12} \text{ W/m}^2$, $\rho_0 = 1.2 \text{ kg/m}^3$, and $c_0 = 343 \text{ m/s}$.

When simulating the **STL**, it is preferable to avoid modeling the source and receiver rooms, as this would be computationally extremely expensive. Instead, the setup is based on assuming an ideal diffuse field on the source side and an ideal anechoic termination on the receiver side of the test sample. The model also assumes that the test sample has little influence on the sound field on the source side. This is true for relatively stiff structures with low acoustic absorption properties. This is the case for the concrete wall studied in this example. The sound field on the source side can then be defined as a sum of $2N$ uncorrelated plane waves moving in random directions. It can also be assumed that one-half of these waves travel in the negative x direction and the other half in the positive x direction. Knowing that the concrete wall is located in the $x = 0$ plane, only the waves traveling in the positive x direction contribute to the incident pressure on the wall surface. The source room pressure field traveling in the positive x direction is then [25];

$$p_{x,room} = \frac{A}{\sqrt{2N}} \sum_{n=1}^N \exp(-i(k_{n,x} x + k_{n,y} y + k_{n,z} z)) \exp(i \cdot \Phi_n) \quad (18)$$

$$\left. \begin{aligned} k_{n,x} &= \cos(\theta_n) \\ k_{n,y} &= \sin(\theta_n) \cos(\varphi_n) \\ k_{n,z} &= \sin(\theta_n) \sin(\varphi_n) \end{aligned} \right\} \quad (19a, b, c)$$

where the polar angles $0 \leq \theta_n \leq \pi/2$ and $0 \leq \varphi_n \leq 2\pi$ as well as the phase $0 \leq \Phi_n \leq 2\pi$ are independent random numbers and A is the amplitude of the plane waves; Φ_n and Φ_n are taken directly from uniform distributions, whereas θ_n is obtained as $\theta_n = \alpha \cos(\theta_n)$, θ_n being a random variable with a uniform distribution between 0 and 1. This ensures a uniform distribution of wave numbers over the desired hemisphere. In the model, a new set of random numbers is generated for each n in the sum. The term ensures that the field has a constant intensity for any choice of N . Because the plane waves are uncorrelated, the total mean square pressure in the source room is $prms_2 = 2px,room/2/2$, with the term $2px,room$ accounting for the total diffuse field (positive and negative x directions). The theoretical limit for

large N of the mean square pressure in the room (away from walls) is $prms,th2 = |A|/2$.

The concrete wall is located at $x = 0$, where the incident diffuse field is reflected. The reflected component of the field is [25];

$$p_{refl} = \frac{A}{\sqrt{2N}} \sum_{n=1}^N \exp(-i(-k_{n,x} x + k_{n,y} y + k_{n,z} z)) \exp(i \cdot \Phi_n) \quad (20)$$

The reflected field is coherent with the incident field, as discussed in Equation 12. At the surface of the concrete wall, the total pressure load applied to the structure is the sum of the incident and reflected pressures [25].

$$p_{wall} = p_{x,room} + p_{(refl)} \quad (21)$$

III. DISCUSSION of the RESULTS

Using COMSOL Multiphysics software, a comprehensive comparative analysis of trapezoidal and droplet (water drop) models is conducted to evaluate their performance in STL and sound propagation mitigation. Simulations were carried out across a broad frequency range in randomized noise environments, providing extensive data for both models.

The findings of the current study consistently demonstrated that the water drop design surpasses the trapezoidal model in sound transmission loss across various frequency bands. These results were validated against test data for the trapezoidal model, establishing a baseline for comparison. Subsequent analyses of the water drop design were aimed at achieving realistic mirroring.

The drawings and mesh views of both models, depicted in Figure 5 and Figure 6, provide detailed visual representations that support the comparative analysis and highlight the structural differences contributing to their sound insulation performance. A detailed overview of the results can be seen in Figures A1 and A2 in the appendices.

As depicted in Figure 7, this investigation highlights the water drop design's superior effectiveness in sound insulation. This conclusion was further validated against certified test results conducted on the panel, ensuring the accuracy and reliability of our computational predictions. The term "Iterative refinement" refers to the step-by-step review and optimization of simulation parameters. In this process, the results obtained in each simulation cycle were analyzed, parameters were adjusted as needed, and the simulation was then repeated. Through these improvement cycles, the accuracy of the model was enhanced, and the reliability of the results was ensured. Thus, the validity and consistency of the study's findings were strengthened.

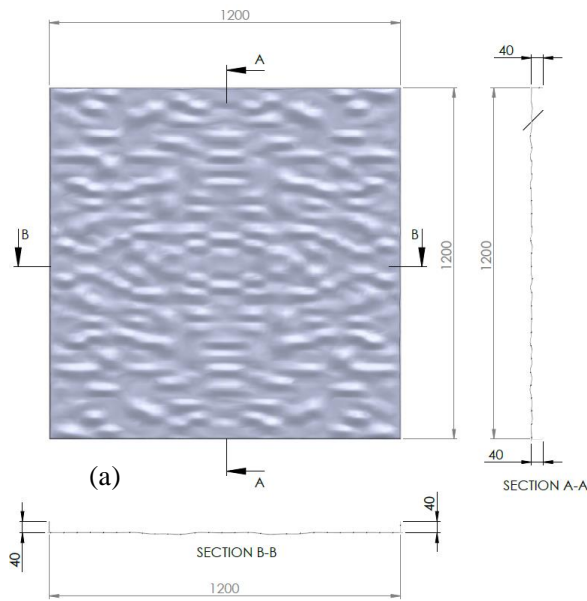


Figure 5. Drawing view of simulation sound barriers, (a) Water drop, (b) Trapezoidal.

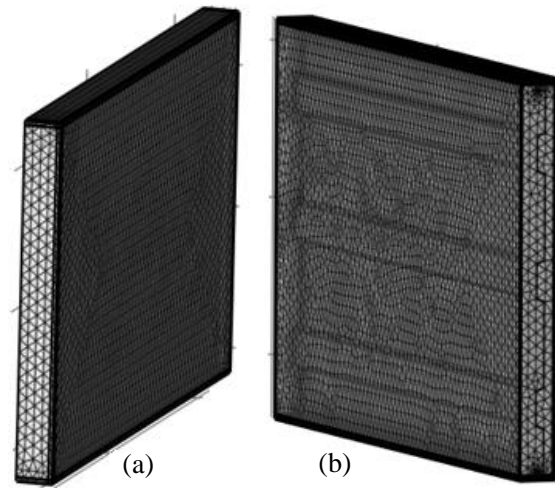


Figure 6. Meshing view of simulation parts. (a) Water drop, (b) Trapezoidal.

Figure 7 Compares the analysis results of the water drop and trapezoidal designs with the experimental results of the trapezoidal design. The figure clearly shows that the experimental and analysis data are closely aligned, substantiating the computational model's precision. This close correlation indicates that the superior performance of the water drop design observed in the analysis is likely to be replicated in real-world applications. Given this alignment, it can be confidently stated that the superior performance of the water drop design observed in the simulations is indicative of its likely superior performance in real-world conditions as well.

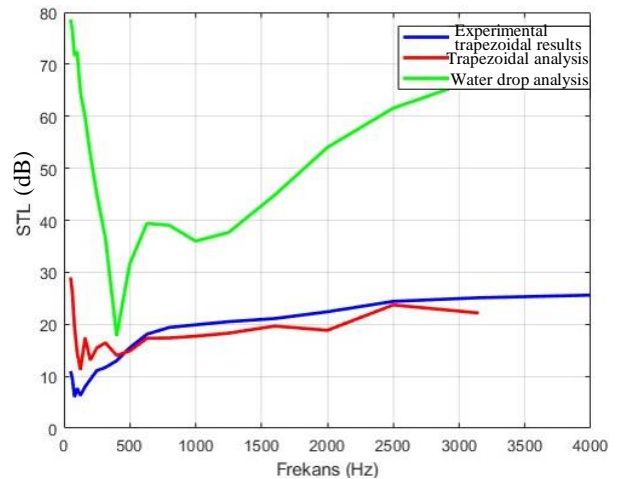


Figure 7. Comparison of analysis results of water drop and trapezoidal design with experimental results of trapezoidal design.

This study demonstrates that the same methodology can be employed to evaluate any desired design. By using advanced simulation tools like COMSOL Multiphysics, one can reliably predict the performance of various sound insulation designs, thereby facilitating informed decisions in the development of new noise

barrier systems. The versatility of this approach means it can be adapted to assess different geometric configurations and materials, making it a robust tool for sound insulation research.

3.1. Limitations and Considerations

Due to the lack of sufficiently competent software for comprehensive sound barrier analysis, the current study focused on evaluating the surface geometry of the designs rather than the entire structure. It is assumed the same absorbing materials between surfaces to reduce computational load and concentrate on the impact of surface geometry. This approach allowed us to isolate and analyze the effect of design geometry on sound insulation performance without the added complexity of varying material properties.

Specifically, the analysis was limited to surface geometry because current software solutions do not fully support comprehensive simulations of complete sound barrier systems. By maintaining consistent absorbing materials between surfaces, the analysis was simplified, allowing for a focused examination of geometric influences on sound insulation. This methodological choice helped to manage computational intensity and streamline the evaluation process.

The water drop design not only outperforms in sound insulation but also boosts aesthetic superiority, offering a visually striking appearance that enhances architectural and urban design.

Embracing innovative designs like the water drop model can enhance functionality in architectural solutions. This study underscores the need for a holistic approach that balances functional and aesthetic considerations in developing sound-insulating materials and systems.

3.2. Overall Comparison

The comparative analysis favors the water drop design over the trapezoidal model in both sound insulation effectiveness and aesthetic appeal. While the trapezoidal model has practical advantages, such as ease of production [25, 26], the water drop design offers superior performance in mitigating sound propagation and adds visual sophistication to architectural and urban design [27, 28]. Balancing functionality and aesthetics is crucial in developing sound-insulating materials and systems to enhance urban living standards [28, 29]. In conclusion, this study highlights the advancements in sound insulation technology and the importance of aesthetics in design decisions [13, 30]. The water drop design's superior performance in mitigating sound propagation, combined with its visual sophistication, makes it a valuable solution for enhancing urban living standards [31]. By embracing innovative designs like the water drop model, industries can achieve a balance between functionality and visual harmony, ultimately enhancing urban environments.

The fundamental physical principles used in the water drop design have been modeled with the same boundary conditions and material properties as in the trapezoid design. This supports that the results will have similar accuracy. The simulations of the water drop design were carried out using the same numerical methods and solution techniques employed for the Trapezoid design. Since the stability and accuracy of these methods have been previously validated, similar results are expected.

IV. CONCLUSIONS

This study has demonstrated the superiority of the water drop design over the trapezoidal model in both sound insulation effectiveness and aesthetic appeal. While the trapezoidal model offers practical advantages such as ease of production, the water drop design excels in mitigating sound propagation and adds visual sophistication to architectural and urban design.

The comparative analysis using COMSOL Multiphysics software, conducted over a wide frequency range in random noise environments, revealed that the water drop design consistently outperforms the trapezoidal model in terms of STL across various frequency bands. These findings were confirmed through simulations and verified test results, highlighting the water drop design's potential to enhance urban living standards by improving the quality of life in urban environments.

Furthermore, the study emphasizes the importance of balancing functionality and aesthetics in the development of sound-insulating materials and systems. The water drop design's ability to effectively mitigate sound propagation and its visually striking appearance make it an attractive solution for architects, urban planners, and policymakers. The results underscore the need for a holistic approach to urban planning and design that considers the interplay between sound insulation, aesthetics, and functionality. By embracing innovative designs like the water drop model, industries can create more livable and sustainable urban environments that prioritize the well-being of citizens.

REFERENCES

- [1] Moser, M. (2004). *Engineering Acoustics: An Introduction to Noise Control*. Berlin, Germany: Springer Science.
- [2] Raichel, D. R. (2006). *The Science and Applications of Acoustics* (2nd ed.). New York, USA: Springer Science.
- [3] May, D. N., & Osman, N. M. (1980). Highway noise barriers: New shapes. *Journal of Sound and Vibration*, 71(1), 73-101.
- [4] Ekici, I., & Bougdah, H. (2003). A review of research on environmental noise barriers. *Journal of Environmental Engineering*, 129(12), 1065-1073.

- [5] Degischer, H.-P., & Kriszt, B. (Eds.). (2002). *Handbook of Cellular Materials: Production, Processing, Applications*. Weinheim, Germany: WILEY-VCH.
- [6] Le, C. H. (2010). *Developments in topology and shape optimization*. Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [7] Eschenauer, H. (Ed.). (2006). *IUTAM Symposium on Topological Design Optimization of Structures, Machines and Materials*. Dordrecht, Netherlands: Springer.
- [8] Joshi, H. R. (2013). *Finite Element Analysis of Effective Mechanical Properties, Vibration, and Acoustic Performance of Auxetic Chiral Core Sandwich Structures*. M.Sc. Thesis, Purdue University.
- [9] Ramnath, B. V., Alagarraja, K., & Elanchezian, C. (2019). Influence of fiber orientation on the mechanical properties of GFRP composites. *Materials Today: Proceedings*, 16, 859-864.
- [10] Sayahlatifi, S., Rahimi, G., & Bokaei, A. (2021). An investigation into the acoustic performance of sandwich structures with auxetic cores. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 23, 94-109.
- [11] Li, Y., Wang, F., Jia, S., Ma, X., & Zhang, Y. (2021). Influence of process parameters on the mechanical properties of fiber-reinforced polymers. *Fibers and Polymers*, 22, 1718-1726.
- [12] Florence, M., Jaswin, M. A., & Pandi, A. P. (2020). Investigation of the tensile properties of fiber-reinforced polymers. *Fibers and Polymers*, 21, 1152-1160.
- [13] Arunkumar, M. P., Pitchaimani, J., Gangadharan, K. V., & Babu, M. C. L. (2017). Dynamic analysis of sandwich structures with auxetic core. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 19, 26-42.
- [14] Griese, D., Summers, J. D., & Thompson, L. (2015). Structural health monitoring of sandwich composites using vibration analysis. *Journal of Vibration and Acoustics*, 137, 021011.
- [15] Reiter, P., Wehr, R., & Ziegelwanger, H. (2017). Simulation and measurement of noise barrier sound-reflection properties. *Applied Acoustics*, 121, 11-21.
- [16] Moore, J. A., & Lyon, R. H. (1991). Sound transmission loss characteristics of sandwich panel constructions. *Journal of the Acoustical Society of America*, 89(3), 1544-1552.
- [17] Halliwell, R. E., & Warnock, A. C. C. (1985). Sound transmission loss: Comparison of conventional techniques with sound intensity techniques. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 77(6), 2094-2103.
- [18] Garai, M., & Guidorzi, P. (2015). Sound reflection measurements on noise barriers in critical conditions. *Applied Acoustics*, 98, 103-109.
- [19] Asdrubali, F., & Pispola, G. (2007). Properties of transparent sound-absorbing panels for use in noise barriers. *Journal of Sound and Vibration*, 302(4-5), 840-854.
- [20] Laxmi, V., Thakre, C., & Vijay, R. (2022). Evaluation of noise barriers based on geometries and materials: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(10), 1729-1745.
- [21] Xiong, W. 2010. *Applications of COMSOL Multiphysics Software to Heat Transfer Processes*, Master Thesis, Department of Industrial Management, Arcada University of Applied Sciences, Helsinki.
- [22] Song, Y., Wen, J., Tian, H., Lu, X., Li, Z., & Feng, L. (2020). Vibration and sound properties of metamaterial sandwich panels with periodically attached resonators: Simulation and experiment study. *Journal of Sound and Vibration*, 486, 115559.
- [23] Khrystoslavenko, O., & Grubliauskas, R. (2017). Simulation of room acoustics using COMSOL Multiphysics. In *Proceedings of the 20th Conference for Junior Researchers "Science – Future of Lithuania" Environmental Protection Engineering (Article No. aplinka.06)*. Vilnius, Lithuania: Vilnius Gediminas Technical University.
- [24] Acoustic-Structure Interaction, https://www.comsol.com/model/download/1182151/models.aco.acoustic_structure.pdf (Access date: 12.09.2024)
- [25] Herring Jensen, M. J. (2020). Modeling sound transmission loss through a concrete wall, https://www.comsol.com/model/download/1177511/models.aco.sound_transmission_loss_concrete.pdf. (Access date: 12.09.2024)
- [26] Saadeghvaziri, M. A., & Macbain, K. (1998). Sound barrier applications of recycled plastics. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1626(1), 83-89.
- [27] Bolton, J. S., Shiau, N.-M., & Kang, Y. J. (1995). Sound transmission through multi-panel structures lined with elastic porous materials. *Journal of Sound and Vibration*, 191(3), 317-347.
- [28] Oh, Y. K., & Kim, H. G. (2023). A preliminary study on the measurement method for determining the absorption coefficient of sound barrier panels [방음판의 흡음률 측정방법 제안을 위한 기초 연구]. *The Journal of the Acoustical Society of Korea*, 42(2), 152-160.
- [29] Oh, Y. K. (2022). A study on the standard for determining airborne sound insulation performance of sound barrier panels [방음판의 음향투과손실 측정규격에 관한 연구]. *Journal of Architectural Acoustics*, 35(3), 123-135.
- [30] Wang, D., Xie, S., Feng, Z., Liu, X., & Li, Y. (2020). Investigating the effect of dimension parameters on sound transmission losses in Nomex honeycomb sandwich. *Applied Sciences*, 10(9), 3109.

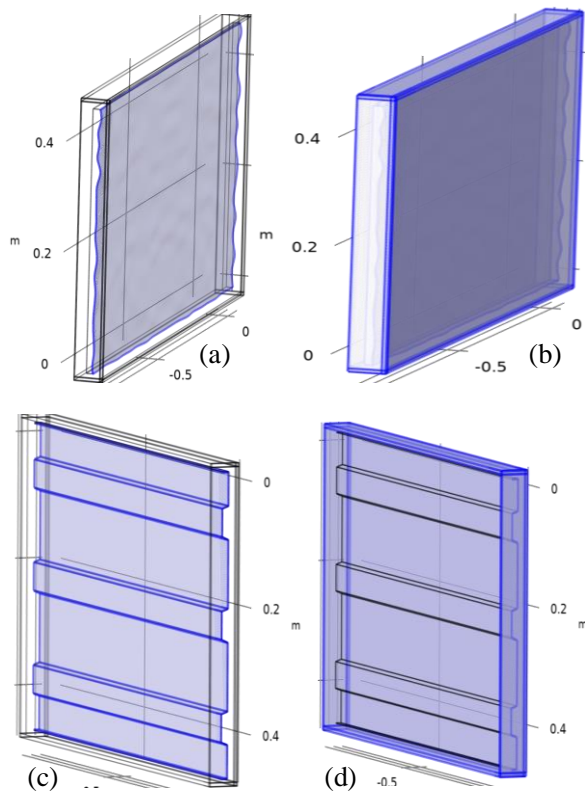
Appendices:

Figure A1. Some set up domain viewings, a) Water drop front face selection, b) Water drop back face selection, c) Trapezoidal front face selection, d) Trapezoidal back face selection.

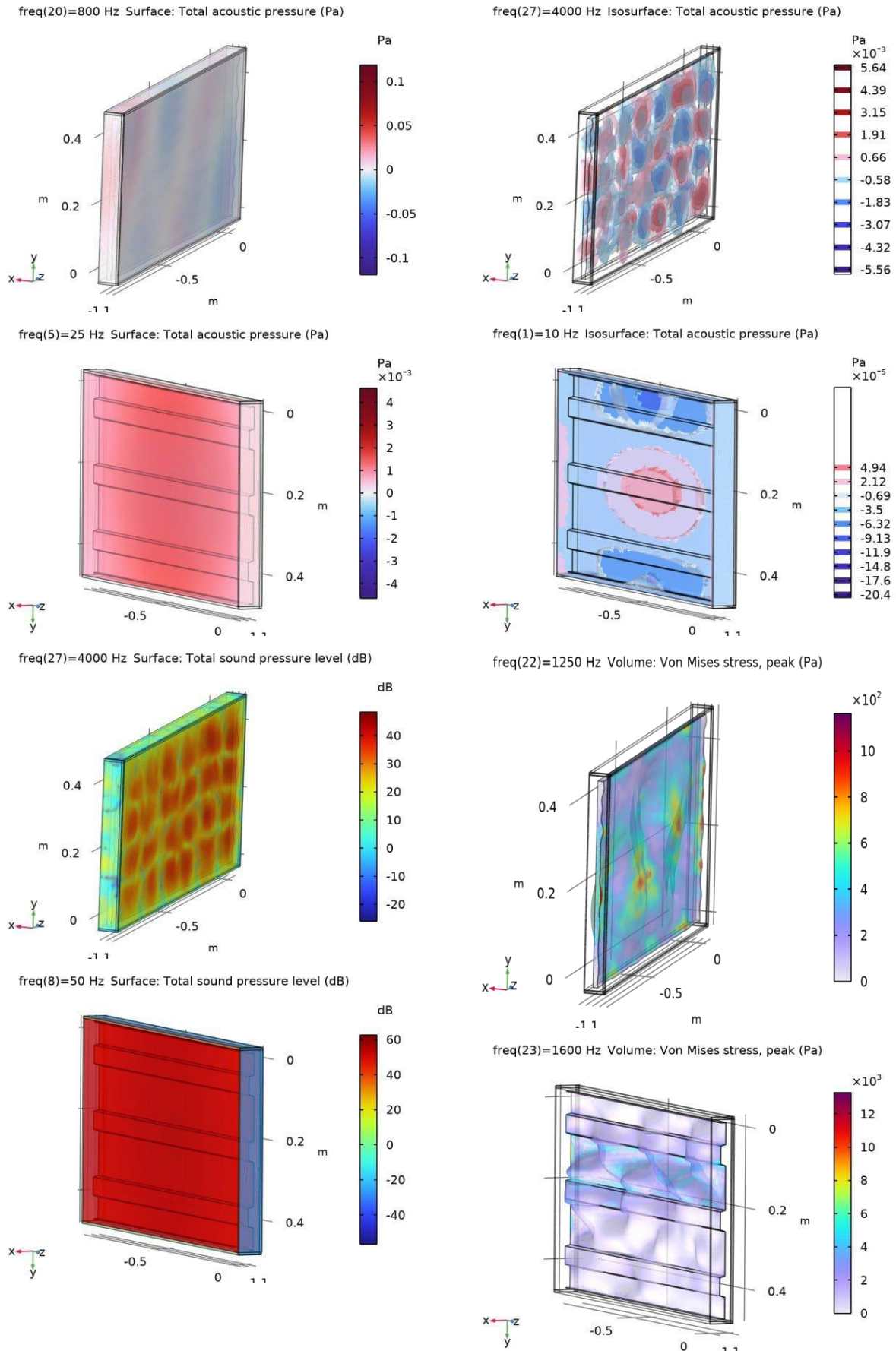


Figure A2. Some result viewings.

Vegetable oil-based Composite Vitrimers containing Dynamic Bonds of Amide-Imide and Boronic Ester

Amid-İmit ve Boronik Esterin Dinamik Bağlarını İçeren Bitkisel Yağ Bazlı Kompozit Vitrimeler

Burcu OKTAY ¹ 

¹Marmara Üniversitesi, Fen Fakültesi, Kimya Bölümü, 34722, İstanbul, Türkiye

Abstract

Eco-friendly, sustainable, renewable cross-linked materials have become a highly focused area of research in recent years. In this study, vegetable oil-based fully sustainable materials were developed. For this purpose, the composite films were prepared from tung oil and vegetable-based amine, gallic acid, and boric acid. The materials exhibited excellent self-healing properties without any catalyst by dynamic bonds. Self-healing of the materials has been achieved through both amide-imide exchange reactions and boric acid ester bonds. The results show that these materials have the potential as a cost-effective solution for various industrial applications.

Keywords: sustainable materials, vitrimer, self-healing, vegetable oils

Öz

Son yıllarda çevre dostu, sürdürülebilir, yenilenebilir çapraz bağlı malzemeler oldukça odaklanılan bir araştırma alanı haline gelmiştir. Bu çalışmada bitkisel yağ esaslı tamamen sürdürülebilir malzemeler geliştirilmiştir. Bu amaçla tung yağı ve bitkisel bazlı amin, gallik asit ve borik asitten kompozit filmler hazırlanmıştır. Malzemeler, herhangi bir katalizör olmadan dinamik bağlarla mükemmel kendi kendini iyileştirme özellikleri sergilemiştir. Malzemelerin kendi kendine iyileşmesi hem amid-imid değişim reaksiyonları hem de borik asit ester bağları yoluyla sağlanmıştır. Sonuçlar, bu malzemelerin çeşitli endüstriyel uygulamalar için uygun maliyetli bir çözüm olma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: sürdürülebilir malzemeler, vitrimer, kendi-kendini onarma, bitkisel yağlar

I. INTRODUCTION

Thermoset polymers, which are permanently cross-linked, exhibit excellent thermal and dimensional stability, superior mechanical strength, and chemical resistance. Due to these properties, they are preferred in many fields such as coatings, adhesives, and composites. However, thermoset polymers cannot be reshaped and reprocessed because of their covalent bonding [1].

Vitrimers are a new material class that allows three-dimensional polymer network structures to be recycled through dynamic covalent bonds. Ester bonds, disulfide linkages, acetal linkages, acyl hydrazone bonds, and imine bonds are preferred [2]. The interest in sustainable materials worldwide contributes to developing new bio-based vitrimer. Vitrimers are covalently addable networks (CANs). Bond exchange reactions allow CANs to alter their topology [1].

In particular, vegetable oils are an important resource due to their wide availability in nature and high biocompatibility [3]. For example, Altuna et al. prepared bio-based vitrimer materials from epoxidized soybean oil and citric acid [4]. Zhang et al. synthesized fully bio-based vitrimers based on castor oil and lignin [5]. Tung oil (TO), is a vegetable oil obtained from tung tree, and is mostly used in the coatings and paint industry. Approximately 80% of it is composed of α -eleostearic acid. These abundant conjugated unsaturated groups allow

Corresponding Author: BURCU OKTAY, Tel: (0216) 777 3364, E-mail: burcu.oktay@marmara.edu.tr

Submitted: 25.07.2024, **Revised:** 10.10.2024, **Accepted:** 20.10.2024

for advanced modification reactions [6]. For example, TO can be used to prepare cross-linked tung oil derivatives through electrophilic substitution reactions with polyphenols [6]. Copolymerization reactions can be performed on the unsaturated groups of tung oil via free radical or cationic mechanisms [7]. Polyurethanes can be obtained through esterification reactions with bio-based polyols [8]. TO can also participate in highly selective Diels-Alder reactions due to its conjugated double bonds. Maleic anhydride is commonly used in Diels-Alder reactions [9].

It is known that neighboring groups accelerate the rate of exchange reactions in CANs. In particular, carboxylic acid end-groups form a cyclic structure, allowing exchange reactions to occur at a lower energy level. The recyclability of the material improves with faster exchange reactions [11]. Du Prez et al. studied transesterification reactions of phthalic acid derivatives. The results show that the formation of anhydride intermediate cause to higher stress relaxation rates [12]. It has been observed that acetoacetyl-based amide groups exhibit the same behavior during transamidation reactions [13].

In this study, fully bio-based vitrimers prepared from TO and vegetable-based amine (Priamine 1074). The recyclability of the vitrimer materials provided by both amide-imide and boronic ester exchange reactions. Thermal stability and self-healing properties of the materials were analyzed. The vitrimers exhibited a fast thermal reprocessability without a catalyst because of their dynamic nature.

II. MATERIALS AND METHODS

2.1. Reagents

Tung oil was purchased from the local market. Malic anhydride (99%), boric acid ($\geq 99.5\%$), and gallic acid (anhydrous) were provided by Sigma-Aldrich. Priamine 1074 (DDA) was kindly supplied by Croda.

2.2. Apparatus

The chemical structure of maleated-tung oil (TOMA) was verified by using FTIR (Perkin-Elmer Spectrum100 ATR-FTIR Spectrophotometer). The thermal performance of the cured samples was investigated by thermal gravimetric analysis (Perkin Elmer STA6000). The samples were performed at 30 to 750°C with heating at a rate of 20°C/min under a nitrogen atmosphere. Additionally, the glass transition temperature (T_g) of the samples was evaluated by a Differential Scanning Calorimeter (Perkin Elmer Diamond DSC).

The density of crosslinking was calculated by the gel content method. The dried samples were immersed in

chloroform for 24 h. The gel content was calculated as $\frac{w_r}{w_i} \times 100$. (w_r ; residual weight, w_i ; initial weight).

2.3. Synthesis of maleated-tung oil (TOMA)

The functionalization of tung oil with anhydride groups was carried out via the Diels-Alder reaction. Methods from the relevant articles in the literature were followed [14,15]. Tung oil (0.118 mol) and maleic anhydride (0.0472 mol) were placed in a round bottom equipped with a condenser. The reaction was continued for 6 h. finally, the mixture was cooled to room temperature and unreacted maleic anhydride was removed with previous study procedures [16]. The product was obtained with an acid number of 194,74 mg/g. The reaction scheme is shown in Figure 1.

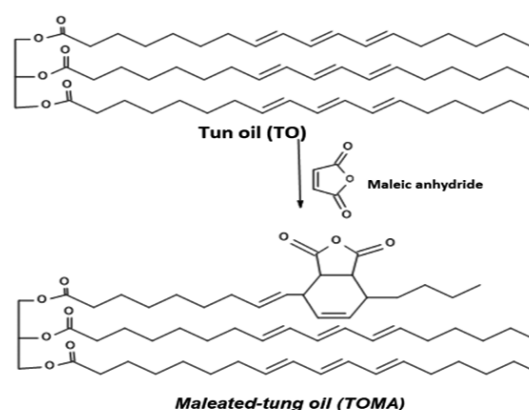


Figure 1. The synthesis pathway of maleated-tung oil

2.4. Preparation of GA-borate complex (GAB)

The synthesis of the GA-borate complex was adapted from the literature procedure [17]. Gallic acid (5 g) and distilled water (10 mL) were stirred until a homogenous solution. Boric acid (0.05 g) was added to the solution. The mixture was stirred for 2.5 h at 65 °C. Subsequently, the temperature of the mixture was increased to 95 °C and stirred for 2 h. The reaction scheme is shown in Figure 2.

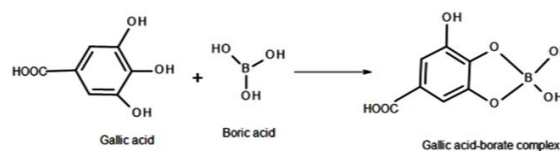


Figure 2. Synthesis pathway of gallic acid-borate (GAB) complex

2.5. Preparation of films

TOMA and DDA were used as anhydride and amine sources, respectively. All formulations were prepared with anhydride/epoxy ratios 1. The GA-borate complex was added to the two formulations as 0.001 g and 0.03 g. The names of the prepared formulations were TOMA-DDA, TOMA-DDA-0.001GAB, and TOMA-DDA-0.03GAB.

III. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. FTIR Spectra

The structural analysis of the product obtained from the reaction of tung oil and maleic anhydride was performed using FTIR spectroscopy. The FTIR spectrum of TO and TOMA is given in Figure 3. Figure 3a shows the FTIR spectrum of TO. The characteristic aliphatic C-H peaks of tung oil were observed in the 2900-2800 cm^{-1} region. The peak observed at 1740 cm^{-1} is attributed to the carbonyl stretching linked to glycerol units in vegetable oil [18]. The C-O stretching is observed at 1115 cm^{-1} . Additionally, the sharp peak observed at 990 cm^{-1} is due to the unsaturated groups in the fatty acid units. After the modification of anhydride groups, new peaks were observed (Figure 3a). The characteristic carbonyl stretching of the anhydride ring appeared at 1847 cm^{-1} and 1740 cm^{-1} . The peaks at 1210 and 1094 cm^{-1} correspond to the C-O stretching of TO [16].

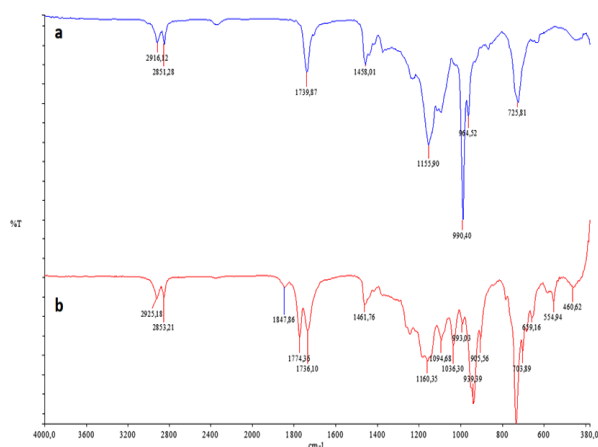


Figure 3. FTIR spectra of (a) TO and (b) TOMA

3.2. Thermal Analysis

The TGA spectrum of boric acid and CA-borate is shown in Figure 4. Up to approximately 120 $^{\circ}\text{C}$, no mass loss of boric acid was observed in the TGA spectrum. After this temperature, a two-step decomposition curve was observed. The first mass loss occurred in the temperature range up to 200 $^{\circ}\text{C}$. In this region, metaboric acid (HBO_2) is formed through the dehydration of boric acid. As metaboric acid is heated at higher temperatures, boron trioxide (B_2O_3) is formed. The first mass loss is due to dehydration, and the second is due to the conversion of HBO_2 to B_2O_3 [19]. After gallic acid bonded to boric acid, the decomposition temperatures shifted to higher temperatures. This indicates that the thermal stability of the resulting GA-borate complex is higher. Additionally, the ash percentage decreased due to the increase in organic content from GA.

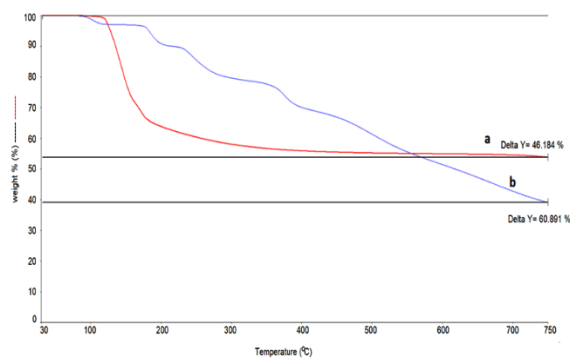


Figure 4. TGA curves of (a) Boric acid and (b) GA-borate

Figures 5a and b show the TGA and DTG curves of TO and TOMA. The mass loss of TO was observed between 400-510 $^{\circ}\text{C}$. However, the two-step degradation profile was observed with the grafting of anhydride groups onto TO. Two spectrums have similar degradation profiles.

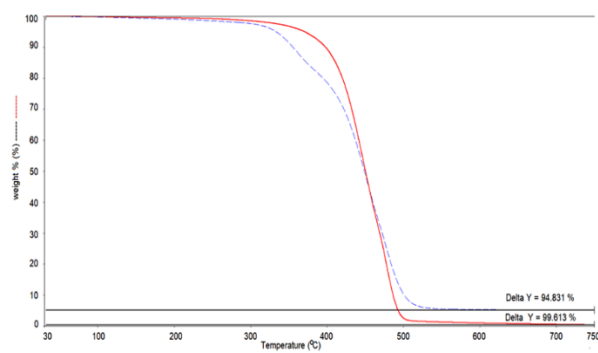


Figure 5a. TGA curves of TO and TOMA

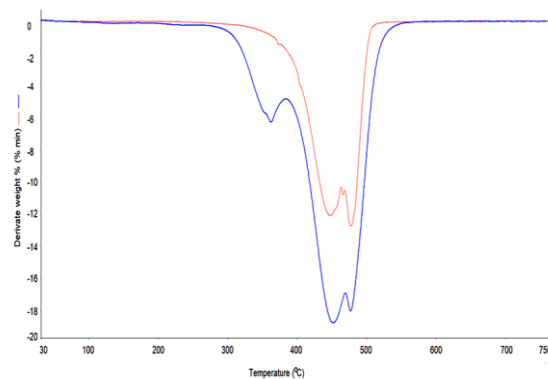


Figure 5b. DTG curves of TO and TOMA

The thermal stability and degradation mechanism of the prepared fully bio-based films were investigated by TGA analysis. TGA curves and data are given in Figure 6. All samples exhibited a one-step degradation profile. The initial decomposition temperature of the materials increased with the rise in the amount of GAB. Samples containing free GAB (TOMA-DDA) and 0.01% of

GAB (TOMA-DDA-0.001GAB) exhibited decomposition at similar temperatures. However, with the increase in GAB content (TOMA-DDA-0.03GAB), the temperature shifted to a higher value. In addition, the ash content also increased with the rise in boron content.

Table 1. Thermal degradation temperatures and ash values of the materials

Samples	TOMA-DDA	TOMA-DDA-0.001GAB	TOMA-DDA-0.03GAB
T _{5%} (°C)	206	205	338
T _{50%} (°C)	473	476	478
Char (%)	1.32	2.5	12.17
Gel content (%)	90	66	50
T _g (°C)	-2	-5	-9

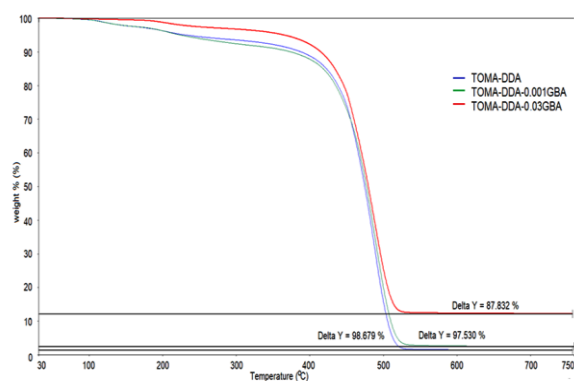


Figure 6. TGA curves of the films

The glass transition temperatures (T_g) values of the materials were measured using DSC. The results are given in Table 1. T_g is ranged from -9 to -2 °C. The T_g value of TOMA-DDA is -2 °C. however, the T_g values of TOMA-DDA-0.001GAB and TOMA-DDA-0.03GAB samples have shifted to lower temperatures. It can be stated that the cross-link density in samples containing GAB is lower compared to the TOMA-DDA sample. This is consistent with the gel content results. There is a decrease in gel content values from TOMA-DDA to TOMA-DDA-0.03GAB.

3.3. Self-healing performance of the films

The films were cut in half to examine the self-healing properties. First, the films were cut into two parts. Then two parts of the films were re-adhered by press at room temperature, 80 °C and 100 °C, respectively. The films

were kept for 15 minutes at each temperature value. The images showing the healing profile of the films are presented in Figure 7-9.

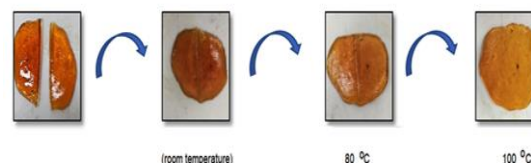


Figure 7. The healing process of TOMA-DDA

For TOMA-DDA, no recovery is observed at room temperature and 80 °C. However, full healing of the film is observed with the increase in temperature to 100 °C (Figure 7). The healing of the sample is facilitated by the reversible amide-imide bond between TOMA and DDA [10]. Since this bond exchange occurs above 80 °C, the healing is limited at temperatures below 80 °C. However, full recovery can be achieved when the temperature exceeds 80 °C.

The images of the healing process on TOMA-DDA-0.001GAB films are shown in Figure 8. This formulation contains reversible amid-imide bond and also boronic ester bonds that contribute to the healing. Boronic ester bonds are expected to be effective in the healing process at below 80 °C. However, these bonds were not sufficient for full recovery. This may be due to the limited amount of GAB (0.0001 g GAB) used in the formulation. Complete healing was not observed under room temperature and 80 °C conditions. As in the case of the TOMA-DDA sample, full recovery was achieved when the temperature exceeded 80 °C.

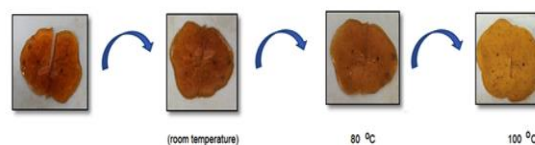


Figure 8. The healing process of TOMA-DDA-0.001GAB

The healing in films containing GBA is expected to occur through the metathesis of boronic acid esters [20]. Boronic ester metathesis reaction occurs without the addition of any catalyst at low temperatures [21]. It has been observed that boronic ester bonds contribute to the recovery in the case of TOMA-DDA-0.03GAB (Figure 9). For TOMA-DDA-0.03GAB, higher healing rate is observed at room temperature, while full recovery is achieved at 80 °C. In addition, amic acid groups are converted to imide groups through imidization [10], and full healing was achieved at 100 °C.

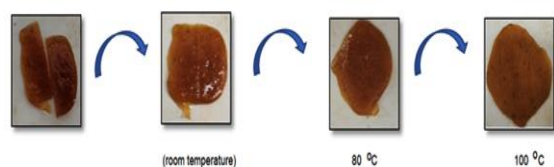


Figure 9. The healing process of TOMA-DDA-0.03GAB

IV. CONCLUSION

In recent years, there has been an increasing interest in reusable materials to prevent environmental damage and reduce raw material waste. In this study, vegetable oil based films containing tung oil and fatty acid diamine were prepared using a simple, fast, and environmentally friendly method. Additionally, a dynamic bond concept has been incorporated into the prepared materials, providing them with self-healing properties. Dynamic covalent network structures allow materials to be reprocessed repeatedly. Therefore, prevents raw material waste and also reduces environmental pollution. For this study, two dynamic covalent bond concepts created an amide-imide exchange reaction and boric acid ester bonds. Boric ester bonds enable the deformed material to return to its original state under room temperature and 80 °C. When the temperature rises above 80 °C, the amide-imide exchange reaction contributes to the renewal. Among all samples, TOMA-DDA-0.03GBA has exhibited the best healing process. It is expected that using this concept will lead to the development of functional materials and contribute to sustainability.

REFERENCES

- [1] Wu, J., Yu, X., Zhang, H., Guo, J., Hu, J., & Li, M. H. (2020). Fully biobased vitrimers from glycyrrhizic acid and soybean oil for self-healing, shape memory, weldable, and recyclable materials. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(16), 6479-6487.
- [2] Liu, X., Zhang, E., Feng, Z., Liu, J., Chen, B., & Liang, L. (2021). Degradable bio-based epoxy vitrimers based on imine chemistry and their application in recyclable carbon fiber composites. *Journal of Materials Science*, 56, 15733-15751.
- [3] Gandini, A., Lacerda, T.M., Carvalho, A.J.F., Trovatti, E., (2016). Progress of polymers from renewable resources: furans, vegetable oils, and polysaccharides. *Chem. Rev.* 116, 1637–1669.
- [4] Altuna, F.I., Pettarin, V., Williams, R.J.J., 2013. Self-healable polymer networks based on the cross-linking of epoxidised soybean oil by an aqueous citric acid solution. *Green Chem.* 15, 3360–3366.
- [5] Zhang, S., Liu, T., Hao, C., Wang, L.W., Han, J.R., Liu, H., Zhang, J.W., 2018. Preparation of a lignin-based vitrimer material and its potential use for recoverable adhesives. *Green Chem.* 20, 2995–3000.
- [6] Shibata, M., Teramoto, N., & Nakamura, Y. (2011). High performance bio-based thermosetting resins composed of tung oil and bismaleimide. *Journal of Applied Polymer Science*, 119(2), 896-901.
- [7] Li, F., & Larock, R. C. (2003). Synthesis, structure and properties of new tung oil– styrene–divinylbenzene copolymers prepared by thermal polymerization. *Biomacromolecules*, 4(4), 1018-1025.
- [8] Casado, U., Marcovich, N. E., Aranguren, M. I., & Mosiewicki, M. A. (2009). High-strength composites based on tung oil polyurethane and wood flour: Effect of the filler concentration on the mechanical properties. *Polymer Engineering & Science*, 49(4), 713-721.
- [9] Biermann, U., Bornscheuer, U., Meier, M. A., Metzger, J. O., & Schäfer, H. J. (2011). Oils and fats as renewable raw materials in chemistry. *Angewandte Chemie International Edition*, 50(17), 3854-3871.
- [10] Chen, Y., Zhang, H., Majumdar, S., van Benthem, R. A., Heuts, J. P., & Sijbesma, R. P. (2021). Dynamic polyamide networks via amide–imide exchange. *Macromolecules*, 54(20), 9703-9711.
- [11] Zhang, H., Majumdar, S., van Benthem, R. A., Sijbesma, R. P., & Heuts, J. P. (2020). Intramolecularly catalyzed dynamic polyester networks using neighboring carboxylic and sulfonic acid groups. *ACS Macro Letters*, 9(2), 272-277.
- [12] Delahaye, M.; Winne, J. M.; Du Prez, F. E. *Internal Catalysis in Covalent Adaptable Networks: Phthalate Monoester Transesterification As a Versatile Dynamic Cross-Linking Chemistry.* *J. Am. Chem. Soc.* 2019, 141, 15277–15287.
- [13] Liu, Z.; Yu, C.; Zhang, C.; Shi, Z.; Yin, J. Revisiting Acetoacetyl Chemistry to Build Malleable Cross-Linked Polymer Networks via Transamidation. *ACS Macro Lett.* 2019, 8, 233–238.
- [14] Gallart-Sirvent, P., Li, A., Li, K., Villorbina, G., & Canela-Garayoa, R. (2017). Preparation of pressure-sensitive adhesives from tung oil via Diels-Alder reaction. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 78, 67-73.

- [15] Chen, L., Li, Z., Ma, Y., Shang, Q., Hu, Y., Huang, Q., Zhou, Y. (2023). Tung Oil-Based Degradable Vitramer for Reprocessable and Recyclable Vitramer–MWCNT Composites with Self-Healing Ability Triggered by Multiple Stimuli. *ACS Applied Polymer Materials*, 5(11), 9203-9212.
- [16] Oktay, B., Türkcan, J. H., Özdemir, O. K., & Kayaman-Apohan, N. (2023). Vegetable oil-based epoxy coating materials for self-healing and anticorrosive applications. *Macromolecular Research*, 31(11), 1077-1086.
- [17] Schmidt, M. P., Siciliano, S. D., & Peak, D. (2021). The role of monodentate tetrahedral borate complexes in boric acid binding to a soil organic matter analogue. *Chemosphere*, 276, 130150.
- [18] Güneş, I., & Oktay, B. (2023). Fabrication of Eco-friendly Sustainable Superhydrophobic and Anticorrosive Coatings from Acrylated Soybean Oil and Biobased Amine by the Aza-Michael Reaction. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11(42), 15253-15261.
- [19] Hernández, M. F., Suárez, G., Cipollone, M., Conconi, M. S., Aglietti, E. F., & Rendtorff, N. M. (2017). Formation, microstructure and properties of aluminum borate ceramics obtained from alumina and boric acid. *Ceramics International*, 43(2), 2188-2195.
- [20] Teotonico, J., Mantione, D., Ballester-Bayarri, L., Ximenis, M., Sardon, H., Ballard, N., & Ruipérez, F. (2024). A combined computational and experimental study of metathesis and nucleophile-mediated exchange mechanisms in boronic ester-containing vitrimers. *Polymer Chemistry*, 15(3), 181-192.
- [21] M. Röttger, T. Domenech, R. Van Der Weegen, A. Breuillac, R. Nicolaÿ and L. Leibler, High-Performance Vitrimers from Commodity Thermoplastics through Dioxaborolane Metathesis, *Science*, 2017, 356(6333), 62–65.

The Parameter Optimization of Support Vector Machine with Genetic Algorithm in Risk Early Warning Models

Muhammed İŞİK¹ 

¹Marmara University, Institute of Pure and Applied Sciences, Department of Industrial Engineering, 34722, Istanbul, Turkey

Abstract

Machine Learning algorithms are widely used by lenders in risk early warning models. With Machine Learning, the risk levels of individual and corporate customers are determined at the account and customer level. Lenders want to manage risk by evaluating the payment performance of customer or account with the help of Machine Learning algorithms. Banks, which have an important place among lenders, develop risk early warning models with the help of learning algorithms using customer information. In the development process of risk early warning models, while banks generally use customer information and credit bureau information for the individual segment, they use financial, non-financial and behaviour-based information for the corporate segment. In this study, it is planned to develop a risk early model for customers in corporate service segment. For the customers of corporate service segment, Balance Sheet and Income Statement items were used and the financial ratios were calculated for risk early warning models. In the development of risk early warning models, Mutual Information method was used as a novel feature selection approach and Support Vector Machine method (linear function, radial basis function and sigmoid function) was used as a supervised learning approach. By changing the neighbourhood metric (k), important patterns were discovered with the Mutual Information method in feature selection process. The optimal C and gamma parameters for Support Vector Machine models have been tried to be determined with the Genetic Algorithm, which is among the Meta-Heuristic algorithms. In order to find the optimal metrics in this study, the metric values for all parameters of the SVM model (function specific) have been kept quite wide. In this dataset of corporate service customers, the small neighbourhood metric has been found to have a significant impact on model learning and performance.

Keywords: Risk Early Warning Models, Mutual Information, Support Vector Machine, Parameter Optimization, Genetic Algorithm

I. INTRODUCTION

In measurement and management of credit risk, Machine Learning (ML) models are frequently used by many institutions, especially banking, leasing, factoring. ML models are quite successful compared to the classic models such as regression models in credit risk [1,2]. Although they are difficult to implement in organizational processes compared to classical models, ML models are generally preferred by managers or decision makers due to their high performance. It is very important to know the use cases, assumptions and how to interpret the results obtained depending on the modelling process of ML models [3]. In the world of credit, ML models are frequently used to predict financial crisis by institutions [4]. ML models are used by financial institutions in many modelling studies such as early warning, disruption and anomaly detection [5]. In different risk modelling studies, financial information obtained from financial statements are used such as Balance Sheet (BALSH), Income Statement (INCSTAT) and Cash Flow (CASHFL). The information obtained from financial statements show how the customer will perform in the future. It is very important that the financial statements received from customers are not made up. Inaccurate financial information complicates the requirements of data quality such as continuity, accuracy and completeness. The validity of the models developed using unreliable information is questioned and the performance of these models is quite low [6].

In the modelling process, financial ratios are obtained by using the information requested from financial institutions. In the model development process, financial ratios are used as explanatory variables for features. In the univariate and multivariate analysis process of the modelling, the valuable financial ratios and the components obtained from the financial ratios are tried to be determined. Various feature selection methods are used in the

Corresponding Author: MUHAMMED İŞİK, Tel: : 0(543) 353 58 75, E-mail: muhammedisik@marun.edu.tr

Submitted: 20.07.2024, **Revised:** 13.10.2024, **Accepted:** 20.10.2024

determination of important financial ratio variables and components. In feature selection, analysis studies can be carried out in linear space such as dimension reduction, as well as analysis studies in non-linear space such as manifold learning. The main goal of feature selection is to reveal important patterns with various techniques. Significant patterns obtained with feature selection are used as inputs in development of the model pattern. Supervised, unsupervised, semi-supervised and hybrid models are widely used in the development of the ML model pattern. The results of model trials are compared with each other and tested. There are many performance metrics used to compare models in the modelling world. In comparison of models, accuracy, recall, precision, gmean and f1-score metrics are frequently used as well as receiver operating characteristic curve, confusion matrix and lift table. The use of performance metrics may vary taking into structure and distribution of the data set [7]. In models using balanced data sets, accuracy can be used as a performance measure. However, it may be wrong to use only accuracy metric in models using imbalanced data sets. It would be more accurate to use recall, precision and f1-score in models where imbalanced datasets are used. It is known that banks, which are constantly faced with crisis, resort to analytical solutions in order to define and manage credit risk with ML models. In the world of banking, analytical and expert opinion-based scorecards are developed to define and manage credit risk. With the developed scorecards, the performances of customers or accounts are measured, and performance outputs are produced from the scorecard [8]. In scorecards, assigning the customer to the correct risk class is very important for risk management [9]. Early payment of loans and additional collateral may be requested from low-performing customers.

On the other hand, customers with high performance can be offered options by banks such as limit increase and cross-selling. In the credit world, risk early warning scorecards are developed, and analytical decision processes are created within the bank. It is known that risk early warning models make significant contributions to bank credit management. Credit allocation processes will be simplified in terms of time and work process by analysing customer behaviour with risk early warning models. In addition, by using the outputs of these models in the bank's internal systems, the workload of the disruption and monitoring units will be reduced.

II. LITERATURE REVIEW

2.1. Financial ratios

Financial statement analysis, financial intelligence and scoring are studies to measure the financial status of Small and Medium-sized Enterprises (SMEs), companies and institutions. Financial statements provide information about the financial situation of SMEs, companies and institutions at certain periods of

each year. In order to show the financial situation, the BALSHE is generally shared in the last period of the fiscal year. The BALSHE consisting of assets, liabilities and shareholders' equity and has a static structure on the contrary the INCSTATE [10]. The INCSTATE is the statement that shows the net profit or loss status by using the sales and expense items of the company. The INCSTATE is the statement showing the company's performance in the financial year and provides convenience to decision makers in many ways [11]. In financial analysis, BALSHE and INCSTATE information is frequently used in determining expert opinions and improving analytical processes. These financial statements not only show the current situation of the companies but also provide information about their future performance.

Financial ratios created using financial statements have an importance on sector basis [12]. By looking at financial ratios, it is possible to comment on the future of the financial institution in the sector and turnover basis. It is very important to make the necessary analyses of the financial statements and to interpret the results correctly. The information obtained from the financial statements affects both the financial institution requesting the loan and the lending institution. The scoring model is developed by evaluating the financial, non-financial and behaviour information of the financial institution with analysis methods. Scoring studies are based on modelling information from institution and non-institution with appropriate model patterns. By using the results of the scoring model, risk warning information are obtained at the customer or account level for institution. Scorecards are frequently used to measure and determine financial performance in risk early warning models. With risk early warning models, closer timely risk measurements can be made compared to traditional credit risk parameters (such as Probability of Default). In particular, the running of the scorecards developed for the early warning model on a daily and weekly basis will be very useful in understanding and managing risks.

2.2. Risk early warning decision systems

Data Science and Big Data have profoundly affected many areas from the individual segment to the corporate segment in financial systems. In risk early warning models, there are significant differences between segments regarding datasets, predictive purposes, and processes. For example, while credit bureau information is important for individual segment customers in risk early warning models, cash flow information may be very important for corporate segment customers. Risk early warning models are developed in order to predict the payment performance and financial status of borrowers [13]. Risk early warning models make predictions about the future performance of the borrower obtaining patterns from historical information. In early warning models,

developments are made by considering that the risk may be disrupted for 30 days or more within 3 or 6 months. Early warning models differ from traditional credit risk modelling techniques where definitions are known. Also, this approach used in creating the disruption status (target variable) may differ among modelling teams. In this respect, risk early warning models are included in business models that progress with the definition of model developers. By using the historical information of the customers, the disruption status is examined within a certain date range in risk early warning models.

Financial, non-financial and behavioural datasets are used in commercial risk early warning models developed by banks. With the help of patterns obtained from financial, non-financial and behavioural datasets, scorecards are developed as a commercial risk early warning model. In commercial risk early warning models, disruption information is estimated before the customer legal follows up [14]. BALSH, INCSTAT and CASHFL statements are included in the financial module data set [15]. In the non-financial module datasets, the partnership status and information of the partners are included. In behaviour module datasets, the customer's performance is examined by obtaining credit payment information at the product or customer level. Risk situations of customers are analysed with risk early warning models and different actions are taken for customers predicted to be risky [16]. Additional collateral and limit reductions can be made for customers who are predicted to be risky in early warning models. In risk warning models, after the model development process, the model template is embedded in bank processes and run at certain periods. By using the patterns obtained from the historical information, the financial changes of the customers are analysed, and decision systems can be developed for the management of the results. It is very important that the decision system established in the risk early warning model is easily implemented into the bank process [17]. In the decision system of the early warning model, not only the predictive power should be considered, but also the intelligibility and ease of use of the model.

III. METHODOLOGY

3.1. Support vector machine

Support Vector Machine (SVM) has gained more attention and adopted in classification and regression problems so as to find a good solution space. SVM is a ML algorithm that wants to create a high-performance model pattern without overfitting problem while developing a model [18]. SVM algorithm aims to create the model pattern by moving the data set from the input space to the feature space with kernel transform functions [19]. In kernel transformation process, SVM algorithm tries to control the margin between the positive hyperplane ($\vec{w} \cdot \vec{x} + b = 1$) and the negative

hyperplane ($\vec{w} \cdot \vec{x} + b = -1$) with support vectors by minimizing the loss function [20,21].

In SVM algorithm, when linear structure is used as kernel transformer for training dataset, linear vectors are used as parser. In this linear approach, which is called the linear SVM model, there is only the C parameter for regularization tuning. If misclassification is acceptable at the end of the model development process, soft margin is selected in regularization tuning. If misclassification is not accepted by the decision maker or modeler, hard margin is selected in model development. In nonlinear approach of SVM, the model tries to draw curvilinear boundaries that can best separate the training datasets. On the other hand, in non-linear SVM algorithms, besides the C regularization parameter, there is also the gamma free parameter [22]. In non-linear SVM algorithms, kernel functions with C and gamma parameters varied according to the training datasets.

3.2. Genetic algorithm

Genetic Algorithm (GA) is a adaptive Meta-Heuristic algorithm based on developed over natural selection inspired by evolution process of genetics [23]. GA is among evolutionary algorithms and GA is used in real life problems such as Traveling Salesman Problem, Network Design Problem, Scheduling Problem, Feature Selection, Data Clustering and Parameter Optimization. In GA, optimal solutions are tried to be determined by applying selection, crossover, mutation and elitism stages on the population. While completing the basic stages of GA, the fitness function is tried to be optimized for each cycle [24]. Especially, while the fitness function is evaluated in selection phase, the most suitable members are directed to the next generation in elitism phase. In each generation of GA, changes are made on the candidate chromosomes through crossover and mutation stages. Fitness function is controlled by using the offsprings created in GA and decisions are made by looking at the criteria of the Meta-Heuristic algorithm. GA is very easy to code in several programming languages and GA is used as an auxiliary model in many different fields.

3.3. Parameter optimization

Parameters have a huge impact on the efficiency and effectiveness in search [25]. In the Parameter Optimization (PO) of ML algorithms, parameter tuning can provide greater flexibility and robustness but requires a good initialization in the tuning process. While developing models, it is very important to determine the initial parameters of the training dataset. In process called hyper parameter tuning, the parameters of the developed models are assigned. PO is a time-consuming process and as the number of parameters increases, it becomes more difficult to determine the optimal values. In PO, iteratively progresses over all values of the parameters used in modelling. In PO, the used program and environment

capacity have also a very important place. In the parameter assignment process, the model success (score) is maximized, and the process is terminated for model patterns. In the PO of ML models, GA is widely used in practical problems that focus on searching for optimal model parameters [26]. First of all, for PO of models, model population (generations) is created with some predefined hyperparameters on training data set [27]. In models, performance metric values are calculated for each model population (generation) such as accuracy ratio, recall, precision, f-1 score, etc. By comparing the values of model performance metrics, the most successful model is tried to be determined with GA.

IV. EMPIRICAL ANALYSIS

4.1. Data description

In corporate segment, risk models are developed by using the ratios obtained from BALS and INCSTAT

items [28]. In this study, service customers were taken as reference to financial information between January 2022 and September 2023 time intervals in order to develop risk early warning model [29]. Financial ratios were calculated by taking financial information of service customers from BALS and INCSTAT items. In the dataset of this risk study, financial ratios of service customers were used as exploration variables in analysis and classification stages. After financial ratios were obtained for service customers, customers (324 uniq rows) were observed for 1 year and target flags were determined as 'Default' ('flag1'-128 uniq rows) and 'Live' ('flag0'-196 uniq rows) in this study. In the credit monitoring process, if bank considers the service customer's performance bad during fiscal period, the reference customer status is assigned as 1 for time interval. In credit life cycle, if service customer performance is not bad, the reference customer status is assigned as 0 for fiscal period. The data set of financial information is shown in Table 1.

Table 1. Exploration variables

Variables	Resource
Current rate	BALS
Acid-Test ratio	BALS
Cash rate	BALS
Stocks to total assets	BALS
Financial leverage ratio	BALS
Short-term receivables to total assets	BALS
Long-term liabilities to total resources	BALS
Short-term liabilities to total resources	BALS
Long-term foreign resources to continuous capital	BALS
Stock values turnover speed	BALS
Current assets to total assets	BALS
Receivable turnover speed	INCSTAT
Stock turnover speed	INCSTAT
Fixed assets to equity	INCSTAT
Rotating asset turnover rate	INCSTAT
Fixed asset turnover rate	INCSTAT
Equity turnover	INCSTAT
Total asset turnover rate	INCSTAT
Profitability ratio of equity	INCSTAT
Profit before interest and tax to total resources	INCSTAT
Profitability ratio of total assets	INCSTAT
Financing expenses to net sales	INCSTAT
Gross profit margin	INCSTAT
Net profit margin	INCSTAT
Operating profit margin	INCSTAT

4.2. Feature selection process

In ML world, models developed with a noise-free training data set are easier and more effective to interpret and adapt. In ML studies, feature selection approaches are used to eliminate noise on the training data set [30]. With feature selection approach, it is tried to obtain high quality variables by reducing the noise in training data set. In feature selection, Mutual Information (MI) is an effective method for interdependence degree among variables which is not restricted linear and curvilinear relationships [31]. In the feature selection process where MI is used, the most important features select and ranks them starting with the most relevant [32,33]. In feature selection with MI, Kullback–Leibler (KL) divergence is used to examine whether there is a distributional relationship between the variables X (independent) and y (dependent). The calculation of MI coefficient is shown in Eq.1.

$$MI(X, y) = \sum_y y_i \sum_x X_i [P(X, y) \log\left(\frac{P(X, y)}{P(X)P(y)}\right)] \quad (1)$$

In the modelling process, all data set is divided into training data set (75%) and testing data set (25%) using stratified sampling approach. MI method was applied to training dataset for feature selection. It has been tried to determine appropriate variables for modelling by changing neighbours parameter (k). In feature selection process, among the 25 variables, the most relevant 10 features were tried to be determined. In feature selection stage, python libraries were widely used such as numpy, pandas and scikit-learn. When important features are examined, it is seen that variables ‘Proportion of profitability of equity’, ‘Profit before interest and tax to total resources’ and ‘Operating profit margin’ are in a strong relationship with target variable. There are strong relationships between equity & profitability variables and target variable in the training data set. At the end of the feature selection process, the most important features according to the k metric are shown in Table 2.

Table 2. The most relevant 10 features

k = 2	k = 3	k = 4
Important features	Important features	Important features
Profitability ratio of equity	Profitability ratio of equity	Profitability ratio of equity
Operating profit margin	Profit before interest and tax to total resources	Profit before interest and tax to total resources
Profit before interest and tax to total resources	Operating profit margin	Long-term liabilities to total resources
Acid-Test ratio	Financial leverage ratio	Operating profit margin
Fixed assets to equity	Long-term liabilities to total resources	Receivable turnover speed
Receivable turnover speed	Financing expenses to net sales	Fixed assets to equity
Long-term liabilities to total resources	Fixed assets to equity	Current assets to total assets
Net profit margin	Acid-Test ratio	Financial leverage ratio
Long-term foreign resources to continuous capital	Receivable turnover speed	Financing expenses to net sales
Current assets to total assets	Long-term foreign resources to continuous capital	Fixed asset turnover rate

In this modelling process, the SVM as classification algorithm is trained on the training dataset with important features and forms a pattern with the help of the patterns they have learned. In the next step, the SVM model predictions on the test data with this model pattern. Within the scope of this study, SVM model tries were carried out with important features determined according to neighbours k coefficient.

4.3. Experimental setup

In banking, SVM models are especially used to predict various cases, including risk early warning studies. In risk early warning studies, the efficiency of SVM model relies on the correct setting of hyperparameters such as C, gamma and tolerance value. In this paper,

different (linear function, radial basis function and sigmoid function) topological approaches of SVM models were applied to training dataset. In model tries with different SVM approaches, C is in ranges [1, 1000], gamma is in ranges [1e-5, 100] and tolerance is ranges in [1e-5, 1e-1].

In this study, in order not to miss the optimum metrics, the metric values for all parameters of the SVM approaches were kept quite wide. In this paper, for each one kernel function and neighbours k coefficient, GA algorithm was used to determine optimal C, gamma and tolerance parameters. For each model trial, tpot tools of python programming language were used in order to determine optimal parameters. Google Colab (GPU)

platform was used in all analysis and modelling studies. The parameters of the GA used for local search are shown in Table 3.

Table 3. Parameters of the GA

Parameter	Value
Number of generations	5
Population size	25
Offspring size	25
Crossover rate	0.1
Mutation rate	0.9
Crossover type	Two-point crossover
Selection method	Elite selection

V. RESULTS AND DISCUSSIONS

In paper, model tries were carried out on the basis of different kernel functions {'linear function', 'radial basis function' and 'sigmoid function'} and neighbours k {2,3,4} coefficients. In each model trial, local search studies were performed on the training dataset via GA. In model trials, optimal parameters (C, gamma and tolerance values) for SVM models were determined by GA local search method. In order to analyse model trials, it is necessary to examine the model in terms of model performance metrics. The performance of classification models such as SVM is generally controlled by model performance metrics derived from the confusion matrix. In classification models, model performance metrics such as True Positive Rate (TPR) and False Positive Rate (FPR) are calculated by using the confusion matrix. Not only the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve but also the optimal threshold values (default threshold: 0.5) can be calculated from TPR and FPR metrics.

In this article, optimum threshold values were calculated on the training dataset for each model trial. Recall, precision, f-1 score and accuracy ratio performance metrics were calculated using reference optimal threshold values. Detailed tables containing all performance metrics are in the appendices section. Among the performance metrics of classification models, accuracy ratio is generally used for balanced datasets. In this paper, since the training and testing datasets were balanced in terms of target variable, accuracy ratio referenced as the main model evaluation metric. When the performance metrics of the model tries is analysed in terms of accuracy ratio values of the training and testing datasets, it is seen that the best model is radial basis function (RBF) Kernel (C=654,

gamma= 0.01, tolerance value=0.001) SVM model with neighbours k (2) parameter. In fact, when model trials are examined, it is concluded that RBF Kernel SVM model with the neighbours k (2) is the best model in terms of other performance (recall, precision and f1 score) metrics as well. Fig.1. shows the ROC curve of the most successful model among the model trials. For RBF Kernel (C=654, gamma= 0.01, tolerance value=0.001) SVM model with neighbours k (2) parameter, while Fig.2(a) and Fig.2(b) depict the probability distribution on the basis of target flag in the training dataset, Fig.3(a) and Fig.3(b) depict the probability distribution on the basis of target flag in the testing data set.

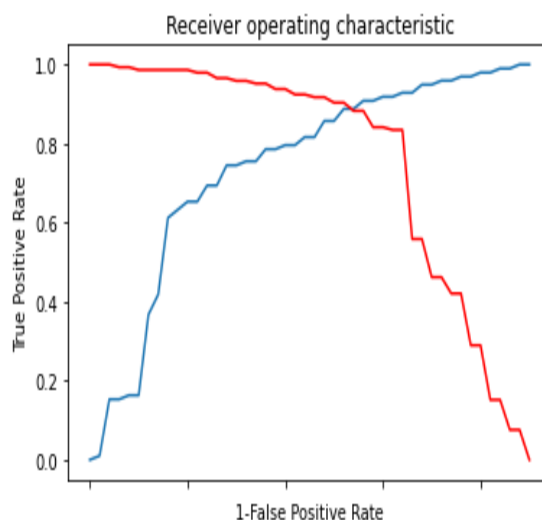


Figure. 1. The ROC curve of RBF kernel SVM model with neighbours k (2) parameter

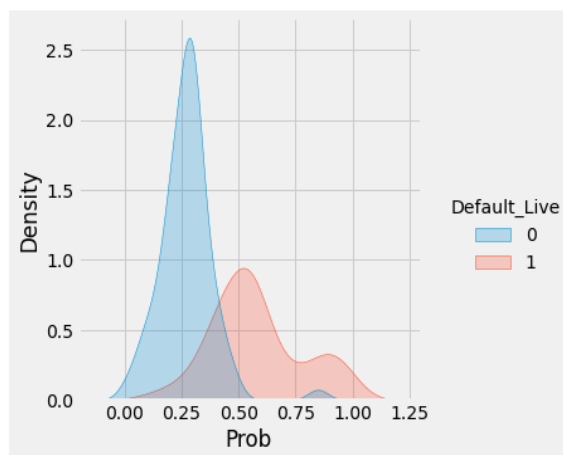


Figure. 2(a). The probability distribution graph in training data set

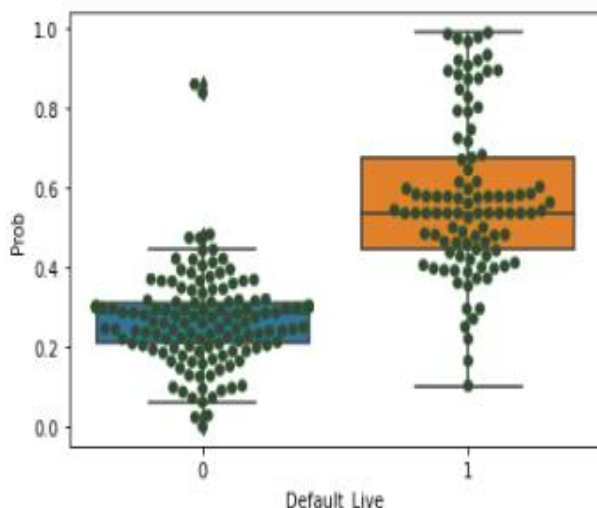


Figure. 2(b). The box and whisker diagram in training data set

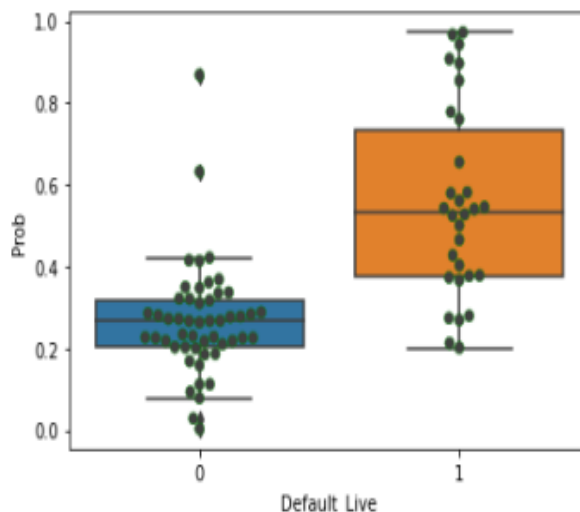


Figure. 3(b). The box and whisker diagram in testing data set

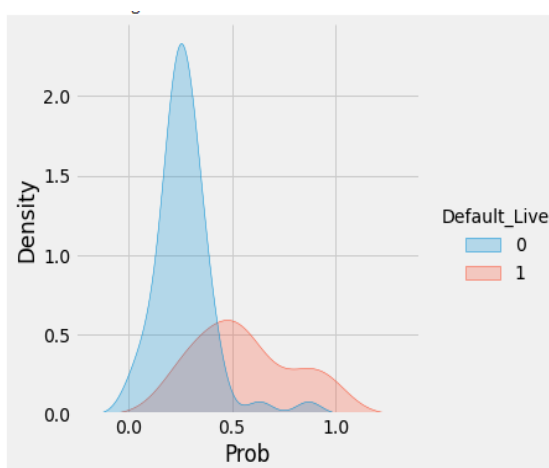


Figure. 3(a). The probability distribution graph in testing data set

For benchmarking, successful models have been identified based on the k parameter and kernel approach. In the paper, not only the GA technique was used, but also search algorithms such as grid search and randomized search were used. Table 4 shows the results of optimization approaches based on the k parameter and kernel approach. When Table 4 is examined, in PO studies, it is concluded that the GA technique is more successful than search algorithms such as grid search and randomized search.

Table 4. Benchmarking studies with Grid Search and Randomized Search

n	Approach	Optimization Techniques	C	Gamma	Tolerance	Accuracy Ratio
k = 2	Linear	Genetic Algorithm	13	---	0,01	86,24%
		Grid Search	9	---	0,00001	84,72%
		Randomized Search	8	---	0,001	84,66%
	RBF	Genetic Algorithm	654	0,01	0,001	87,45%
		Grid Search	56	0,01	0,00001	86,35%
		Randomized Search	12	0,001	0,01	86,12%
Sigmoid	Genetic Algorithm	73	0,001	0,00001	62,46%	
	Grid Search	15	0,001	0,00001	61,90%	
	Randomized Search	12	0,01	0,0001	61,57%	

Table 4. Benchmarking studies with Grid Search and Randomized Search (cont.)

k = 3	Linear	Genetic Algorithm	12	---	0,0001	85,76%
		Grid Search	8	---	0,00001	82,75%
		Randomized Search	8	---	0,01	82,46%
	RBF	Genetic Algorithm	763	0,001	0,001	86,17%
		Grid Search	79	0,001	0,0001	85,33%
		Randomized Search	21	0,001	0,01	85,12%
	Sigmoid	Genetic Algorithm	76	0,001	0,001	62,12%
		Grid Search	20	0,001	0,0001	61,21%
		Randomized Search	14	0,01	0,01	61,02%
k = 4	Linear	Genetic Algorithm	8	---	0,00001	84,68%
		Grid Search	5	---	0,00001	82,23%
		Randomized Search	3	---	0,1	82,12%
	RBF	Genetic Algorithm	752	0,01	0,001	85,90%
		Grid Search	88	0,001	0,00001	85,44%
		Randomized Search	26	0,01	0,001	85,05%
	Sigmoid	Genetic Algorithm	64	0,001	0,001	61,06%
		Grid Search	50	0,001	0,00001	60,89%
		Randomized Search	50	50	0,00001	60,65%

VI. CONCLUSIONS

PO has vital importance to the model development processes of supervised and unsupervised learning. Especially, in supervised learning algorithms, model performance varies depending on the dataset and algorithm parameters. High-performance models can be developed by determining optimal parameters on training datasets. In this study, optimal parameters for SVM models were determined by using the corporate service customer dataset. Local search tools are frequently used such as grid search and random search in parameter determination. Apart from local search algorithms, Meta-Heuristic algorithms have started to be used such as GA for PO. With Meta-Heuristic algorithms, optimal coordinates are determined, and appropriate parameters are detected in the solution space. In this study, training datasets were created by grouping the features determined by variable selection. In the feature selection of risk early warning model, MI

method as a novel method was used. In the next stage, the parameters of different kernel functions on the SVM algorithm were tried to be determined using GA. Instead of the 0.5 threshold (default) value for SVM-based candidate models, the optimal threshold value as a novel approach was calculated with TPR and FPR. This study has some limitations. The desire of corporate service companies not to share their data prevents the increase in the number of rows. The conservative approach of corporate service companies negatively affects the knowledge discovery process in models. In the study, BALSH and INCSTAT were used as financial dataset. In future studies, the model process can be developed by using tables such as cash flow in addition to BALSH and INCSTAT. In addition, the modelling process can be enriched by using non-financial and behavioural data as well as financial data in the modelling process.

REFERENCES

- [1] Farooq, U., Jibrán Qamar, M. A., & Haque, A. (2018). A three-stage dynamic model of financial distress. *Managerial Finance*, 44(9), 1101–1116. <https://doi.org/10.1108/MF-07-2017-0244>
- [2] Kumbure, M. M., Lohrmann, C., Luukka, P., & Porras, J. (2022). Machine learning techniques and data for stock market forecasting: A literature review. *Expert Systems with Applications*, 197, 116659. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116659>
- [3] Geršl, A., & Jašová, M. (2018). Credit-based early warning indicators of banking crises in emerging markets. *Economic Systems*, 42(1), 18–31. <https://doi.org/10.1016/j.ecosys.2017.05.004>
- [4] Shen, C., Lee, Y., & Fang, H. (2020). Predicting banking crises based on credit, housing and capital booms. *International Finance*, 23(3), 472–505. <https://doi.org/10.1111/infi.12367>
- [5] Zhang, C., Wang, Z., & Lv, J. (2022). Research on early warning of agricultural credit and guarantee risk based on deep learning. *Neural Computing and Applications*, 34(9), 6673–6682. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06114-3>
- [6] Feng, Q., Chen, H., & Jiang, R. (2021). Analysis of early warning of corporate financial risk via deep learning artificial neural network. *Microprocessors and Microsystems*, 87, 104387. <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2021.104387>
- [7] Kou, G., Xu, Y., Peng, Y., Shen, F., Chen, Y., Chang, K., & Kou, S. (2021). Bankruptcy prediction for SMEs using transactional data and two-stage multiobjective feature selection. *Decision Support Systems*, 140, 113429. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2020.113429>
- [8] Du, G., Liu, Z., & Lu, H. (2021). Application of innovative risk early warning mode under big data technology in Internet credit financial risk assessment. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 386, 113260. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2020.113260>
- [9] Wen, C., Yang, J., Gan, L., & Pan, Y. (2021). Big data driven Internet of Things for credit evaluation and early warning in finance. *Future Generation Computer Systems*, 124, 295–307. <https://doi.org/10.1016/j.future.2021.06.003>
- [10] Rosa, N. L. (2020). *Analysing Financial Performance: Using Integrated Ratio Analysis (1st ed.)*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003092575>
- [11] Ravisankar, P., Ravi, V., Raghava Rao, G., & Bose, I. (2011). Detection of Financial Statement Fraud and Feature Selection using Data Mining Techniques. *Decision Support Systems*, 50(2), 491–500. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2010.11.006>
- [12] Zhang, J. (2020). Investment risk model based on intelligent fuzzy neural network and VaR. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 371, 112707. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2019.112707>
- [13] Lin, M. (2022). Innovative Risk Early Warning Model under Data Mining Approach in Risk Assessment of Internet Credit Finance. *Computational Economics*, 59(4), 1443–1464. <https://doi.org/10.1007/s10614-021-10180-z>
- [14] Lahmiri, S., Bekiros, S., Giakoumelou, A., & Bezzina, F. (2020). Performance assessment of ensemble learning systems in financial data classification. *Intelligent Systems in Accounting, Finance and Management*, 27(1), 3–9. <https://doi.org/10.1002/isaf.1460>
- [15] Bhatore, S., Mohan, L., & Reddy, Y. R. (2020). Machine Learning Techniques for Credit Risk Evaluation: A Systematic Literature Review. *Journal of Banking and Financial Technology*, 4(1), 111–138. <https://doi.org/10.1007/s42786-020-00020-3>
- [16] Zhang, W., He, H., & Zhang, S. (2019). A Novel Multi-Stage Hybrid Model with Enhanced Multi-Population Niche Genetic Algorithm: An Application in Credit Scoring. *Expert Systems with Applications*, 121, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.12.020>
- [17] Catullo, E., Gallegati, M., & Palestrini, A. (2015). Towards a credit network based early warning indicator for crises. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 50, 78–97. <https://doi.org/10.1016/j.jedc.2014.08.011>
- [18] Luo, C., Wu, D., & Wu, D. (2017). A deep learning approach for credit scoring using credit default swaps. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 65, 465–470. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2016.12.002>
- [19] Hilal, W., Gadsden, S. A., & Yawney, J. (2022). Financial Fraud: A Review of Anomaly Detection Techniques and Recent Advances. *Expert Systems with Applications*, 193, 116429. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.116429>
- [20] Bequé, A., & Lessmann, S. (2017). Extreme Learning Machines for Credit Scoring: An Empirical Evaluation. *Expert Systems with Applications*, 86, 42–53. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.05.050>
- [21] Koutanaei, F. N., Sajedi, H., & Khanbabaie, M. (2015). A hybrid data mining model of feature selection algorithms and ensemble learning classifiers for credit scoring. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 27, 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2015.07.003>
- [22] Nguyen, M. H., & de la Torre, F. (2010). Optimal feature selection for support vector machines. *Pattern Recognition*, 43(3), 584–591. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2009.09.003>

- [23] Jadhav, S., He, H., & Jenkins, K. (2018). Information Gain Directed Genetic Algorithm Wrapper Feature Selection for Credit Rating. *Applied Soft Computing*, 69, 541–553. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.04.033>
- [24] Vijayanand, R., Devaraj, D., & Kannapiran, B. (2018). Intrusion Detection System for Wireless Mesh Network using Multiple Support Vector Machine Classifiers with Genetic-Algorithm-Based Feature Selection. *Computers & Security*, 77, 304–314. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2018.04.010>
- [25] Talbi, E.-G. (2009). *Metaheuristics: From Design To Implementation*. John Wiley & Sons.
- [26] Manurung, J., Mawengkang, H., & Zamzami, E. (2017). Optimizing Support Vector Machine Parameters with Genetic Algorithm for Credit Risk Assessment. *Journal of Physics: Conference Series*, 930, 012026. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/930/1/012026>
- [27] İlhan, İ., & Tezel, G. (2013). A genetic algorithm–support vector machine method with parameter optimization for selecting the tag SNPs. *Journal of Biomedical Informatics*, 46(2), 328–340. <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2012.12.002>
- [28] Onay, C., & Öztürk, E. (2018). A review of credit scoring research in the age of Big Data. *Journal of Financial Regulation and Compliance*, 26(3), 382–405. <https://doi.org/10.1108/JFRC-06-2017-0054>
- [29] Işık, M. (2023). Dataset. Işık, Muhammed (2023), “Early Warning Model Dataset for Corporate Segment”, Mendeley Data, V5, doi: 10.17632/pp599dy9c8.5
- [30] Bishop, C.M., 2006. *Pattern recognition and machine learning*, Information science and statistics. Springer, New York
- [31] Su, X., Li, L., Shi, F., & Qian, H. (2018). Research on the Fusion of Dependent Evidence Based on Mutual Information. *IEEE Access*, 6, 71839–71845. <https://doi.org/10.1109/Access.2018.2882545>
- [32] Barraza, N., Moro, S., Ferreyra, M., & de la Peña, A. (2019). Mutual Information and Sensitivity Analysis for Feature Selection in Customer Targeting: A Comparative Study. *Journal of Information Science*, 45(1), 53–67. <https://doi.org/10.1177/0165551518770967>
- [33] Yan, C., Kang, X., Li, M., & Wang, J. (2021). A Novel Feature Selection Method on Mutual Information and Improved Gravitational Search Algorithm for High Dimensional Biomedical Data. 2021 13th International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE), 24–30. <https://doi.org/10.1109/ICCAE51876.2021.9426130>

APPENDICES

	Kernel Approach	FPR	TPR	1-FPR	TF	Optimal Threshold	The Best Parameter (C)	The Best Parameter (gamma)	Tolerance Value
neighbours (2)	SVM Linear Model	0.1379	0.8571	0.8621	-0.005	0.3856	13	---	0.01
	SVM RBF Model	0.1172	0.8878	0.8828	-0.005	0.3759	654	0.01	0.001
	SVM Sigmoid Model	0.3655	0.6227	0.6345	-0.002	0.4244	73	0.001	0.00001

neighbours (2)	SVM Linear Model	Target Flag	Precision	Recall	F1-Score	Accuracy
	Training Dataset	Live	0.90	0.86	0.88	0.86
		Default	0.81	0.86	0.83	
	Testing Dataset	Live	0.87	0.90	0.88	0.85
Default		0.82	0.77	0.79		

neighbours (2)	SVM RBF Model	Target Flag	Precision	Recall	F1-Score	Accuracy
	Training Dataset	Live	0.92	0.88	0.90	0.88
		Default	0.84	0.89	0.86	
	Testing Dataset	Live	0.87	0.90	0.88	0.85
Default		0.82	0.77	0.79		

neighbours (2)	SVM Sigmoid Model	Target Flag	Precision	Recall	F1-Score	Accuracy
	Training Dataset	Live	0.72	0.63	0.67	0.63
		Default	0.54	0.63	0.58	
	Testing Dataset	Live	0.68	0.71	0.69	0.60
Default		0.46	0.43	0.45		

	Kernel Approach	FPR	TPR	1-FPR	TF	Optimal Threshold	The Best Parameter (C)	The Best Parameter (gamma)	Tolerance Value
neighbours (3)	SVM Linear Model	0.1586	0.8469	0.8613	0.005	0.4022	460	---	0.01
	SVM RBF Model	0.1241	0.8775	0.8758	0.001	0.3853	327	0.01	0.00001
	SVM Sigmoid Model	0.4482	0.5612	0.5517	0.009	0.4098	113	0.1	0.1

neighbours (3)	SVM Linear Model	Target Flag	Precision	Recall	F1-Score	Accuracy
	Training Dataset	Live	0.89	0.84	0.87	0.84
		Default	0.78	0.85	0.81	
Testing Dataset	Live	0.86	0.86	0.86	0.82	
	Default	0.77	0.77	0.77		

neighbours (3)	SVM RBF Model	Target Flag	Precision	Recall	F1-Score	Accuracy
	Training Dataset	Live	0.91	0.88	0.89	0.87
		Default	0.83	0.88	0.85	
Testing Dataset	Live	0.87	0.88	0.87	0.84	
	Default	0.79	0.77	0.78		

neighbours (3)	SVM Sigmoid Model	Target Flag	Precision	Recall	F1-Score	Accuracy
	Training Dataset	Live	0.65	0.55	0.59	0.55
		Default	0.45	0.55	0.50	
Testing Dataset	Live	0.68	0.59	0.63	0.56	
	Default	0.43	0.53	0.48		

neighbours (4)	Kernel Approach	FPR	TPR	1-FPR	TF	Optimal Threshold	The Best Parameter (C)	The Best Parameter (gamma)	Tolerance Value
	SVM Linear Model	0.1517	0.8469	0.8482	-0.001	0.3894	274	---	0.1
	SVM RBF Model	0.1241	0.8673	0.8758	-0.008	0.3640	441	0.001	0.01
	SVM Sigmoid Model	0.4965	0.5000	0.5034	-0.003	0.4064	586	0.0001	0.00001

neighbours (4)	SVM Linear Model	Target Flag	Precision	Recall	F1-Score	Accuracy
	Training Dataset	Live	0.88	0.85	0.87	0.84
		Default	0.79	0.84	0.81	
Testing Dataset	Live	0.88	0.90	0.89	0.86	
	Default	0.83	0.80	0.81		

neighbours (4)	SVM RBF Model	Target Flag	Precision	Recall	F1-Score	Accuracy
	Training Dataset	Live	0.90	0.88	0.89	0.87
		Default	0.82	0.86	0.84	
Testing Dataset	Live	0.86	0.84	0.85	0.81	
	Default	0.74	0.77	0.75		

neighbours (4)	SVM Sigmoid Model	Target Flag	Precision	Recall	F1-Score	Accuracy
	neighbours (4)	Training Dataset	Live	0.60	0.50	0.55
Default			0.40	0.50	0.45	
Testing Dataset		Live	0.67	0.43	0.52	0.50
		Default	0.40	0.63	0.49	

OECD Ülkelerinde Lojistik Performans ve Küresel Yetenek Rekabet Gücü: Entegre MEREC-AHP-TOPSIS Yaklaşımıyla Bir Analiz

Logistics Performance and Global Capability Competitiveness in OECD Countries: An Analysis with Integrated MEREC-AHP-TOPSIS Approach

Burak ÇİFTÇİ¹, Umut AYDIN²

¹Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi (BANÜ), Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Uluslararası Ticaret ve İşletmecilik Bölümü, Balıkesir, Türkiye

²İstanbul Ticaret Üniversitesi, İşletme Fakültesi, Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, İstanbul, Türkiye

Öz

Küreselleşmenin hız kazandığı ve rekabet gücünün giderek arttığı günümüz dünyasında, ulusal rekabet edilebilirlik için küresel düzeyde yetenek rekabetini anlamak ve etkin bir şekilde yönetmek giderek önem kazanmıştır. Aynı zamanda doğrudan ulusal ekonomiyi etkileyen ve rekabet gücünde kritik bir rol oynayan lojistik sektörü, performansı yüksek olan ülkelerin ekonomik büyümesini hızlandırarak rekabet avantajlarını artırmaktadır. Bu bağlamda, Küresel Yetenek Rekabeti Endeksi (GTCl) ve Lojistik Performans Endeksi (LPI), ülkelerin bu dinamik süreçteki konumlarını ve performanslarını değerlendirmede kritik öneme sahip göstergeler olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle çalışmada 2023 yılına ait Küresel Yetenek Rekabeti Endeksi (GTCl) ve Lojistik Performans Endeksi (LPI) veri setleri kullanarak OECD ülkelerinin performansları analiz edilmiştir. Çalışmada Çok Kriterli Karar Verme yöntemleri olan MEREC, AHP ve TOPSİS entegre edilmiştir. Objektif kriter ağırlığı hesaplamasında kullanılan MEREC ve subjektif kriter ağırlığı hesaplaması yapabilen AHP yöntemleriyle ülkelerin GTCl ve LPI kriter ağırlıkları belirlenmiş, TOPSİS yöntemiyle ülkeler performanslarına göre sıralanmıştır. Bilindiği kadarıyla literatürde ilk defa önerilen bu entegre yaklaşımla elde edilen bulgular sonucunda İsviçre birinci sırada, Amerika Birleşik Devletleri ikinci sırada ve Danimarka üçüncü sırada yer almıştır.

Anahtar Kelimeler: OECD, Lojistik Performans Endeksi, Küresel Yetenek Rekabet Gücü Endeksi, AHP, MEREC, TOPSİS, Çok Kriterli Karar Verme

Abstract

In today's world where globalization is accelerating and competitiveness is increasing, it has become increasingly important to understand and effectively manage global talent competition for national competitiveness. At the same time, the logistics sector, which directly affects the national economy and plays a critical role in competitiveness, accelerates the economic growth of countries with high performance and increases their competitive advantages. In this context, the Global Capability Competitiveness Index (GTCl) and the Logistics Performance Index (LPI) stand out as critical indicators in assessing the position and performance of countries in this dynamic process. For this reason, the study analyzes the performance of OECD countries using the Global Talent Competitiveness Index (GTCl) and Logistics Performance Index (LPI) data sets for 2023. In the study, Multi-Criteria Decision Making methods MEREC, AHP and TOPSİS are integrated. The GTCl and LPI criterion weights of the countries were determined by MEREC, which is used to calculate objective criterion weights, and AHP, which can calculate subjective criterion weights, and the countries were ranked according to their performance by TOPSİS method. As a result of the findings obtained with this integrated approach proposed for the first time in the literature, Switzerland ranked first, the United States ranked second and Denmark ranked third.

Keywords: OECD, Logistic Performance Index, Global Talent Competitiveness Index, AHP, MEREC, TOPSİS, Multi-Criteria Decision Making

I. GİRİŞ

Küreselleşmenin hız kazandığı ve rekabet gücünün giderek arttığı günümüz dünyasında, ulusal rekabet edilebilirlik kavramı, ülkelerin sürdürülebilir ekonomik büyümeleri ve uluslararası arenada öne çıkmaları açısından kritik bir önem taşımaktadır. Küresel düzeyde yetenek rekabetini anlamak ve etkin bir şekilde yönetmek, ülkelerin inovasyon kapasitelerini artırmalarının yanı sıra, ekonomik kalkınmalarına da doğrudan katkıda bulunmaktadır. Bu bağlamda, ulusal ekonomilerin önemli bir bileşeni olan lojistik sektörü, performansı yüksek olan ülkelerin ekonomik büyümesini hızlandırarak rekabet avantajlarını güçlendirmektedir. Dolayısıyla, ülkelerin bu dinamik süreçteki konumlarını ve performanslarını değerlendirmek, stratejik karar alma süreçlerinde büyük bir önem arz etmektedir.

Küresel Yetenek Rekabeti Endeksi (GTCI) ve Lojistik Performans Endeksi (LPI), ülkelerin yetenek çekme, geliştirme ve elde tutma kapasiteleri ile lojistik performanslarını ölçerek, ulusal rekabet edebilirliklerini değerlendirmede kritik göstergeler olarak öne çıkmaktadır. GTCI, ülkelerin yetenek yönetimi konusundaki performanslarını analiz ederken, LPI ise ülkelerin lojistik altyapı ve hizmet kalitesini değerlendirerek, ekonomik faaliyetlerin etkinliğini ortaya koymaktadır. Çalışmanın temel motivasyonlarından biri bu iki endeksin bir arada değerlendirilmesiyle, ülkelerin genel rekabet gücünü kapsamlı bir şekilde analiz etmektir.

Bu çalışmada, 2023 yılına ait GTCI ve LPI veri setleri kullanılarak OECD ülkelerinin performansları endekslere ait toplam 12 alt kriterden faydalanılarak analiz edilmiştir. Analizde Çok Kıstaslı Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri olan MEREC, AHP ve TOPSİS entegre edilmiştir. MEREC yöntemi, objektif kriter ağırlıklarını belirlemede kullanılırken, AHP yöntemi subjektif kriter ağırlıklarını hesaplamada kullanılmıştır. Sonraki adımda elde edilen objektif ve subjektif kriter ağırlıklarıyla birleştirilmiş ağırlıklar hesaplanmış ve son olarak da TOPSİS yöntemi ülkelerin performanslarını sıralamada kullanılarak, sonuçların daha bütüncül ve güvenilir olmasını sağlamıştır. Bu entegre yaklaşım, ülkelerin GTCI ve LPI kriterlerine göre ağırlıklarının belirlenmesinde daha dengeli ve kapsamlı bir değerlendirme yapılmasına olanak tanımıştır.

Literatürde bilindiği kadarıyla, MEREC ve AHP yöntemlerini entegre eden bu ağırlık bulma yaklaşımı ilk defa bu çalışmada önerilmektedir. Karar verme süreçlerinde karar probleminin yapısı gereği alternatifler değerlendirilirken sözel ve sayısal kriterlerden oluşan kriter setleri kullanılabilir. Sözel kriterler sayısal kriterlerin aksine direkt olarak ölçülemeyen, ölçüm için özel olarak geliştirilen araçlara ihtiyaç duymaktadır. Bu çalışma kapsamında kullanılan GTCI endeksinde yer alan olanaklar, çekicilik, büyüme, elde tutma kriterleri direkt olarak ölçülemeyen nitel kriterlerken; mesleki ve teknik yetenekler ile küresel bilgi becerileri kriterleri direkt olarak sayısal verilerle ölçülebilen kriterlerdir. Bu kriterlerin ölçümünde likert tipi ölçek, z-skor dönüşümleri, farklı ağırlıklandırma teknikleri ve farklı normalizasyon işlemlerinden faydalanılmaktadır. Benzer şekilde LPI kriterlerinden de altyapı kalitesi, uluslararası sevkiyatların kolaylığı, zamanında teslimat ve yük takibi ve izlenebilirliği kriterleri hariç diğer kriterler sözel kriterler olarak sınıflandırılabilir. İki endekte yer alan kriterler gibi kriterlerin bulunduğu veri setleriyle karar verme sürecinde değerlendirme yapılırken sadece sözel kriterler ve sadece sayısal kriterlerden faydalanan ÇKKV yaklaşımları dezavantajlı olabilmektedir. Bu sebeple bu çalışma kapsamında ağırlık hesaplaması aşamasında iki farklı ÇKKV yaklaşımı entegre edilmiştir. İlk aşamada iki endeks iki ana kriter olacak şekilde AHP yaklaşımı ile

endeksler iki farklı sözel kriter gibi varsayılarak uzman görüşleriyle ana kriter ağırlıkları hesaplanmıştır. AHP aşamasının ikinci fazında ise iki endekse ait alt kriterlerin hepsi sözel kriter olarak varsayılarak uzman değerlendirmeleri göz önünde bulundurulmak suretiyle ağırlıkları hesaplanmıştır. Ağırlık hesaplamasının ikinci aşamasında endekslerin ham halinde belirtilen farklı metodolojilerle gerçekleştirilen ölçüm sonuçlarından elde edilen değerler kullanılmış olup AHP aşamasındaki gibi hem ana endekslere ait değerler hem de alt kriterlere ait sayısal değerler kullanılarak MEREC yaklaşımıyla ağırlıklar hesaplanmıştır. Hem AHP hem de MEREC yönteminde hem ana kriterler için hem de alt kriterler için ağırlık hesaplamasından sonra her iki yöntemde de küresel ağırlıklar hesaplanmıştır. Ağırlık hesaplamasının son aşamasında ise AHP ve MEREC ile hesaplanan ağırlıklar entegre edilerek entegre ağırlıklar hesaplanmış ve son olarak da elde edilen ağırlık TOPSİS yönteminde kullanılarak ülkelerin sıralamaları hesaplanmıştır. Böylelikle hem endekslerin ham halinde yer alan ölçüm değerlerinden gelen bilgi hem de uzman görüşleri doğrultusunda elde edilen bilgi ağırlık hesaplamasında kullanılmıştır. Bahsedilen bu özellikleriyle önerilen yenilikçi entegre metodoloji kriterlerin dengeli bir şekilde hem objektif hem de subjektif önem değerlendirilmesini sağlayarak, ülkelerin performanslarının daha doğru ve güvenilir bir şekilde analiz edilmesine olanak tanımaktadır.

II. LİTERATÜR

2.1 Küresel Yetenek Rekabet Endeksi

Küresel yetenek rekabet gücüne yönelik araştırmalar incelendiğinde çeşitli yöntemler ve göstergeler kullanılarak ülkeler bazında analizler yapıldığı görülmektedir. Küresel Yetenek Rekabet Endeksi, INSEAD tarafından ilk olarak 2013 yılında yapılan kapsamlı bir çalışmanın ardından yayımlanmıştır. Bu endeks ülkelerin, yetenekli personelleri çekme, bölgelerin veya şehirlerin gelişme durumunu ve yetenekli personelleri elde tutma kapasitelerini değerlendirmek amacıyla geliştirilmiştir. Altıntaş (2022), G20 ülkelerinin yetenek rekabetçiliği performanslarının analizini CRITIC tabanlı CoCoSo yöntemi kullanarak değerlendirmiştir. Leikuma-Rimicane ve diğerleri (2021) küresel yetenek rekabet endeksi ile küresel rekabetçilik endeksinin kullanarak modern çağda ülkelerin ekonomik gelişiminde yeteneğin rolünü değerlendirmişlerdir. Steigertahl ve Mauer (2023), kümelenme teorisi ve bölgesel yenilik sistemlerini kullanarak İskandinav girişimcilik ekosisteminin başarı faktörlerinin araştırılmasını değerlendirmişlerdir. Huang ve diğerleri (2023), bulanık küme nitel karşılaştırmalı analiz yöntemini kullanarak inovasyon ekosistemleri ve ulusal yetenek rekabetçiliğini ülke bazında değerlendirmişlerdir. Serban ve Andanut (2014), 2013 KYRE raporunu küresel yetenek rekabetinin, ekonomik ortama etkisini değerlendirmiştir. Oliinyk ve diğerleri (2021), yüksek vasıflı işçilerin göçü ile ekonomik büyüme arasındaki bağlantıları ve ülkelerin rekabet gücünü

değerlendirmişlerdir. Xu ve diğerleri (2021) Çin'deki belirli şehirlere 2018 yılı için yetenek rekabetçiliği açısından performansları ENTROPI tabanlı TOPSİS yöntemi ile değerlendirmişlerdir.

2.2. Lojistik Performans Endeksi

Lojistik performansına yönelik ÇKKV yöntemine dayalı araştırmalar incelendiğinde, ülkeler veya bölgeler bazında performans değerlendirilmeleri yapıldığı görülmektedir. Kale ve Tilki (2024), 2023 yılı Lojistik Performans Endeksi verilerini ENTROPI ve TOPSİS yöntemlerini kullanarak dünya ülkelerinin Lojistik performanslarını değerlendirmişlerdir. Akbulut ve diğerleri (2024), hibrit bir Çok kistaslı karar verme model kullanarak G20 ülkelerinin lojistik performanslarını değerlendirmişlerdir. Alnıpak (2024), AHS ve CoCoSo yöntemleriyle APEC ülkelerinin lojistik performanslarını değerlendirmiştir. Mercan ve Aydın (2024), Afrika ülkelerinin 2023 Lojistik performans endeksi verilerini ENTROPI ve MOORA yöntemleri ile birlikte analiz etmişlerdir. Arman ve Organ (2023), AB'ye Üye ve aday ülkelerin lojistik performanslarını MEREC ve CoCoSo yöntemleriyle değerlendirmişlerdir. Haseki ve Avşar (2023), turizm ve lojistik odaklı verileri kullanarak Türkiye ve Avrupa birliği ülkelerinin PROMETHEE ve K-Ortalamlar yöntemleriyle analizini gerçekleştirmişlerdir. Ecemiş ve Avşar (2023), Türkiye'nin önde gelen ticaret ortağı olan ülkelerin lojistik verimliliklerini ÇKKV yöntemleriyle değerlendirmişlerdir. Pala (2023) MEREC-CORR ve SAW yöntemlerini kullanarak Türkiye ve Vişegrad dördünlüsü ülkelerin lojistik performanslarını değerlendirmişir amaçlanmıştır.

2.2. AHP, MEREC ve TOPSİS

Birimlerin ya da başka bir deyişle alternatiflerin belirlenen kriterlere göre performanslarını gösteren skorların hesaplanması ve bu skorlara göre en iyiden en düşük performans sahip olana doğru bir sıralama elde edilmesi mantığına dayanan farklı yaklaşımların araştırmacılar tarafından tercih edildiği görülmektedir. Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde performans analizi konusunda farklı bakış açılarıyla yaklaşan çalışmaların belirgin gruplar oluşturduğu gözlemlenmiştir. Koca & Demir Uslu (2022), Aydın & Kaya (2021), Ekinçi (2020), Öztürk & Yıldız (2016), Bilik vd. (2016), Tutulmaz & Şahin (2014) ve Koyubenbe & Özden, (2011) çalışmaları performans analizi için Stokastik Sınır Analizi yaklaşımıyla teknik etkinlik skoru hesaplamaktadır. Fakat bu yaklaşım girdi-çıkıtı mantığına dayanan bir yaklaşımdır ve birimleri kullandıkları girdilere göre elde ettikleri çıktı düzeylerini kıyaslamak yoluyla hesaplama yapmaktadır ve bu yaklaşımın en büyük kısıtı ise tek bir çıktı kullanımına müsaade etmesidir. Aydın & Kaya (2021) çalışmasında Temel Bileşenler Analizi'nden (TBA) faydalanarak çok sayıda değişkeni tek bir bileşene indirip söz konusu kısıtın etkilerini azaltmış olsalar da yöntemin yapısı gereği ortaya çıkan bilgi kaybı problemiyle karşılaşmaktadırlar.

Stokastik Sınır Analizi yaklaşımının bahsedilen özelliği sebebiyle araştırmacılar girdi-çıkıtı mantığına dayanan yaklaşımlardan faydalanmak için Veri Zarflama Analizi (VZA) gibi biden fazla çıktı kullanılabilen yaklaşımlara yönelmektedirler. Asker (2021), Peker & Birdoğan (2019), Akyüz vd. (2015) ve Karakaya vd. (2014) çalışmalarında geleneksel VZA spesifikasyonları; Keskin (2018), Doğan, (2015) ve Perçin & Çakır (2012) çalışmalarında süper etkinlik modellemesi; Asker vd. (2018), Çağlar & Öztaş (2016), Bakırcı vd. (2014) ve Doğan & Gencan (2014) çalışmalarında ise VZA yaklaşımlarıyla ÇKKV yaklaşımlarının entegre şekilde kullanıldığı görülmektedir.

Girdi-çıkıtı modellerinden farklı olarak sadece belirlenen çıktılar ile performans analizi gerçekleştiren çalışmalar da mevcuttur. Bu çalışmaların en önemli özelliği ise ÇKKV yaklaşımlarından faydalanmalarıdır. Bu çalışmada kullanılan ÇKKV yaklaşımlarıyla gerçekleştirilen farklı çalışmalar Tablo 1-3 ile gösterilmektedir.

Tablo 1. AHP Yöntemi Literatür Araştırması

Yazarlar	Metodoloji
Macit [34]	AHP; MAIRCA
Lestari vd. [35]	AHP
Kocakaya vd. [36]	AHP; TOPSİS
Nguyen vd. [37]	AHP;GRİ COPRAS
Arıkan ve Öztürk [38]	AHP; SWARA
Menon ve Ravi [39]	AHP; TOPSİS
Baroto vd. [40]	AHP; SAW
Erdoğan [41]	AHP; SD; PIV
Özekenci [42]	AHP; VIKOR

Tablo 2. MEREC Yöntemi Literatür Araştırması

Yazarlar	Metodoloji
Sönmez ve Toktaş [43]	MEREC; COCOSO
Kara vd. [44]	MEREC; AROMAN
Mishra vd. [45]	MEREC; MULTİMOORA
Toslak vd. [46]	MEREC; WEDBA
Puska vd. [47]	MEREC; CRADİS
Meral [48]	MEREC; MARCOS
Duran [49]	MEREC; EDAS; MARCOS; WASPAS
Shanmugasundar vd. [50]	MEREC; CODAS; COPRAS; COCOSO ; MABAC; VIKOR
Haq vd. [51]	MEREC; MARCOS

Tablo 3. TOPSİS Yöntemi Literatür Araştırması

Yazarlar	Metodoloji
Akandere ve Zerenler [52]	TOPSİS; CRITIC
Abdillah ve Chang [53]	TOPSİS; AHP
Sengupta vd. [54]	TOPSİS
Yerli ve Öztürk [55]	TOPSİS; AHP
Li vd. [56]	TOPSİS; ENTROPI
Al ve Demirel [57]	TOPSİS
Gül ve Erdem [58]	TOPSİS; ENTROPI

Tablo 1-3 incelendiğinde objektif kriter ağırlığı hesaplamasında kullanılan MEREC yönteminin ve sübjektif kriter hesaplamasında kullanılan AHP yönteminin alternatif sıralamasında kullanılan farklı ÇKKV yaklaşımlarıyla entegre şekilde kullanıldığı görülmektedir. Fakat literatür taraması göstermektedir ki bilindiği kadarıyla AHP ve MEREC yaklaşımlarını entegre bir şekilde kullanıp kriter ağırlığı hesaplaması yapan ve bu ağırlıklardan faydalanarak alternatifleri sıralamada TOPSİS yaklaşımını kullanan bir çalışma mevcut değildir. Bu çalışmada önerilen bu yeni yaklaşım ile OECD ülkelerinin LPI ve GTCI endekslerinden faydalanarak performansları adım adım uygulamalı olarak değerlendirilmiştir.

III. MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada, sübjektif ağırlıklandırma yöntemi olan AHP ile objektif ağırlıklandırma yöntemi olan MEREC yaklaşımlarını kombine ederek ağırlıkları hesaplayan ve bu ağırlıkları kullanarak TOPSİS yöntemiyle alternatiflerin sıralandığı entegre bir metodoloji önerilmiştir. Literatür taraması sonucunda, bilindiği kadarıyla bahsedilen objektif ve sübjektif ağırlıklandırma yöntemlerini entegre olarak kullanan metodoloji çalışmalarının oldukça sınırlı olduğu tespit edilmiştir.

Önerilen entegre metodolojinin uygulama adımları aşağıdaki gibidir;

Adım 1: AHP Yöntemi, Thomas L. Saaty tarafından 1977'de tasarlanmış olan bir karar verme yaklaşımıdır. Bu yöntem, çeşitli kriterlerin hem niteliksel hem de niceliksel olarak değerlendirilmesi, sıralanması ve seçilmesi sürecinde kullanılan çok kıstaslı karar verme aracı olarak bilinmektedir [59]. Bu yöntem basit ve kullanışlı olması sebebiyle yöneticiler ve araştırmacılar tarafından çokça tercih edilmektedir. Esasen, Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), karmaşık sistemlere sistemli bir yaklaşım sunmakta, ölçüm ve derecelendirme süreçlerinde karar alıcıya rehberlik etmekte ve geniş bir kullanım alanına sahip olmaktadır. Uzmanların veya karar vericilerin görüşlerini matematiksel ikili karşılaştırma yapma imkanı sunmaktadır. Bu yöntemin en belirgin avantajlarından biri ise sonuçların beklenen çıktılarla ve yöneticinin algısıyla uyum içinde

olmasıdır [60]. Yöntemin adımları aşağıdaki şekilde özetlenebilir [61].

Adım 1.1: Bu adımda ikili karşılaştırmaların yapılacağı karşılaştırma matrisi oluşturulmaktadır.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Köşegen üzerindeki değerler bir kriterin kendisi ile karşılaştırmasını gösterdiğinden 1 değerini alır. Kriterlerin ikili karşılaştırması yapılırken tabloda yer alan Saaty tarafından hazırlanmış 1-9 ölçeği kullanılması önerilmektedir [62].

Tablo 4. AHP değerlendirme ölçeği

Kriter Kodu	Performans Kriteri	Açıklama
1	Eşit Önemli	Her iki faaliyet de aynı seviyede amaci gerçekleştirilmektedir.
3	Biri Diğere Göre Çok Az Önemli	Deneyim ve değerlendirme, bir faaliyeti diğere kısmen tercih etmektedir.
5	Kuvvetli Derecede Önemli	Deneyim ve değerlendirme, bir faaliyeti diğere daha fazla tercih etmektedir.
7	Çok Kuvvetli Derecede Önemli	Bir faaliyetin, diğere göre üstünlüğü ve baskınlığı uygulamada açıkça görülebilmektedir.
9	Aşırı Derecede Önemli	Bir faaliyetin diğere üstünlüğü kanıtlanmış ve faaliyet en yüksek kabul seviyesindedir.
2,4,6,8	Ara Değerler	Önem dereceleri konusunda tam bir karar verilememesi durumu.

[62]

Adım 1.2: Oluşturulan karşılaştırma matrisi eşitlik (2) yardımıyla normalize edilmektedir. Normalizasyon işlemi için sütun toplamları alındıktan sonra her değer kendi sütun toplamına bölünmektedir.

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{j=1}^n a_{ij}} \quad (2)$$

Adım 1.3: Bu adımda eşitlik (3) de yer alan formül kullanılarak normalizasyon işlemi gerçekleştirilen karar matrisinde aritmetik ortalama işlemiyle ağırlıklar hesaplanır.

$$w_j^A = \frac{\sum_{i=1}^n c_{ij}}{n} \quad (3)$$

Adım 1.4: Ağırlıklar hesaplamasından sonra KV'lerden gelen matrislerin tutarlı olup olmadığı incelenir. Tutarlılık hesaplamasında "tutarlılık indeksi (CI)" olarak isimlendirilen tutarlılığa yakınlık göstergesi belirlenmektedir. Tutarlılık indeksinin hesaplanmasında $CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1)$ denkleminde faydalanılır.

Sonrasında ise elde edilen CI değeriyle "tutarlılık oranı" olan " $CR = CI/RI$ " rasyosu hesaplanmaktadır. Denklemdaki RI Ortalama Rassal Tutarlılık olarak tanımlanmakta olup, Tablo 5 kullanılarak elde edilmektedir [63].

Tablo 5. Rassal Göstergeler

N	1	2	3	4	5
RI	0	0	0,58	0,9	1,12
N	6	7	8	9	10
RI	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

[63]

AHP hesaplamaları aşamasında tutarlılık oranının 0,10'dan küçük olması arzu edilmektedir fakat bu değer 0,10'dan büyük ise, karar verici değerlendirmesinin tutarsız olduğu anlamına gelir ve ikili karşılaştırma matrisinin yeniden oluşturulması gerekmektedir.

Adım 2: MEREC yöntemi, Keshavarz-Ghorabae [64] tarafından geliştirilmiş olup, kriterlerin alternatiflerin performansı üzerindeki etkisini ortadan kaldırarak kriter ağırlıklarını nesnel bir şekilde belirlemektedir. MEREC'in, diğer objektif ağırlıklandırma yöntemlerinden farklı olarak, mutlak sapma ölçütünü kullanması dikkat çekicidir. Bu ölçüt, genel alternatif performansı ile her bir kriterin etkisi kaldırıldığında elde edilen performans arasındaki farkı tanımlamaktadır.

MEREC yönteminin işlem adımları aşağıdaki gibidir.

Adım 2.1: Eşitlik (4) kullanılarak karar matrisi oluşturulur. Bu matris, m alternatif ve n kriter bulunduğu varsayımıyla, d_{ij} ifadesi i . alternatifin j . kritere göre performans değerini gösterir.

($i \in \{1,2, \dots, m\}$ ve $j \in \{1,2, \dots, n\}$).

$$d_{ij} = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Adım 2.2: Karar matrisi, aşağıda verilen eşitlikler kullanılarak normalize edilmektedir. Fayda kriterleri Eşitlik 5, maliyet kriterleri ise Eşitlik 6 ile normalize edilmektedir.

$$d_{ij}^* = \frac{\min d_{ij}}{d_{ij}} \quad (5)$$

$$d_{ij}^* = \frac{d_{ij}}{\max d_{ij}} \quad (6)$$

Adım 2.3: Eşitlik 7 alternatiflerin toplam performans değerleri (S_i) hesaplamasında kullanılır.

$$S_i = \ln \left(1 + \left(\frac{1}{m} \sum_j |\ln(d_{ij}^*)| \right) \right) \quad (7)$$

Adım 2.4: MEREC yaklaşımının karakteristik özelliği olarak her bir kriterin sahip olduğu değer çıkartılmak suretiyle alternatiflere ait performans değişiklikleri hesaplaması için S'_{ij} Eşitlik 8 kullanılır.

$$S'_{ij} = \ln \left(1 + \left(\frac{1}{m} \sum_{k,k \neq j} |\ln(d_{ik}^*)| \right) \right) \quad (8)$$

Adım 2.5: Kriterin sahip olduğu çıkartılma etkisi ölçümü için Mutlak sapmaların toplamı (E_j) elde edilir.

$$E_j = \sum_i |S'_{ij} - S_i| \quad (9)$$

Adım 2.6: Kriterler için objektif ağırlık hesaplaması w_j^M eşitlik 10 kullanılarak gerçekleştirilir.

$$w_j^M = \frac{E_j}{\sum_k E_k} \quad (10)$$

Adım 3: AHP ile hesaplanan subjektif kriter ağırlıkları ile MEREC Yöntemiyle elde edilen objektif kriter ağırlıklarının ağırlıklı ortalaması alınarak elde edilen birleştirilmiş Kriter Ağırlıkları denklemler yardımıyla elde edilir.

$$w = \lambda \times w_j^A + (1 - \lambda) \times w_j^M \quad (11)$$

Adım 4: TOPSİS, Hwang [65] tarafından geliştirilen bir ÇKKV yaklaşımıdır. Ana amacı, karar matrisindeki alternatiflerinden, matriste yer alan kriterlerle elde edilen pozitif ideal çözüme olan en yakın mesafede olanı ile negatif ideal çözüme en uzak mesafede olan alternatifi en iyi alternatif olarak belirlemektir. Pozitif ideal çözüm, mümkün olan en üstün ölçütler birleşimini ifade ederken, negatif ideal çözüm ise bunun tam zıttı olarak tanımlanır [66]. Yaklaşımın işlem adımları aşağıdaki gibidir [67].

Adım 4.1: Karar problemine özgü kriter ve alternatifleri içeren karar matrisinin matematiksel gösterimi eşitlik 12'de olduğu gibidir.

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Adım 4.2: Alternatiflerin her bir kriter bazında sahip olduğu değerlerden kaynaklı farklılıkları ortadan kaldırmak amacıyla normalizasyon işlemleri eşitlik 13 ile gösterildiği gibi gerçekleştirilir.

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m a_{kj}^2}} \quad (13)$$

Adım 4.3: Belirlenen kriter ağırlıkları ve normalize matris kullanılarak Ağırlıklandırılmış karar matrisi hesaplanır.

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} w_{11}r_{11} & \cdots & w_n r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 r_{m1} & \cdots & w_n r_{mn} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Adım 4.4: Eşitlik 15'te gösterilen İdeal (A^*) ve negatif ideal (A^-) çözümler her bir alternatifin kıyaslanması için hesaplanır.

$$A^* = \{(max_i v_{ij} | j \in J), (min_i v_{ij} | j \in J')\} \quad (15)$$

$$A^* = \{v_1^*, v_2^*, \dots, v_n^*\}$$

$$A^- = \{(min_i v_{ij} | j \in J), (max_i v_{ij} | j \in J')\} \quad (15)$$

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\}$$

Adım 4.5: Her bir alternatif için önceki adımda hesaplanan ideal çözümlere uzaklıklar eşitlik 16 ile hesaplanır.

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^*)^2} \quad (16)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^-)^2}$$

Adım 4.6: İdeal çözümlere uzaklıklar içerisinde negatif ideal çözüme uzaklığın hesaplanması eşitlik 17 ile gerçekleştirilir.

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^*} \quad (17)$$

Adım 4.7: Önceki adımda yapılan hesaplamalar TOPSİS'in temel mantığı gereği pozitif ideal çözüme en yakın ve aynı zamanda negatif ideal çözüme en uzak alternatifi belirleyen C_i^* skoruna göre en yüksek skora sahip olan en iyi alternatif olacak şekilde alternatifler sıralanır.

IV. UYGULAMA VE BULGULAR

Lojistik Performans Endeksi (LPI), Dünya Bankası tarafından 2007 yılında ilk kez yayınlanan ve ülkelerin lojistik performansını değerlendiren bir endekstir. Bu endeks, uluslararası ticaretin etkinliğini ve verimliliğini belirlemeye yardımcı olmak amacıyla geliştirilmiştir. Ülkelerin lojistik performansını ve rekabet gücünü anlamak için kapsamlı bir bakış sunar. LPI, iki yılda bir Dünya Bankası tarafından yayınlanmakta ve küresel ticaretin lojistik açıdan hangi noktalarda iyileştirmelere ihtiyaç duyduğunu göstermektedir.

LPI, altı temel kriter üzerinden değerlendirme yapar: gümrük işlemleri ve sınır yönetimi, altyapı kalitesi,

uluslararası sevkiyatların kolaylığı, lojistik hizmetlerinin kalitesi, yük takibi ve izlenebilirliği ile sevkiyatların zamanında teslim edilme oranı [11].

Küresel Yetenek Rekabet Gücü Endeksi (GTCI) ülkelerin yetenek çekme, geliştirme ve elde tutma konusundaki performansını değerlendiren bir endekstir. İlk kez 2013 yılında yayınlanan bu endeks, INSEAD, Adecco Group ve Tata Communications iş birliğiyle oluşturulmaktadır. Ülkelerin yetenek yönetimi süreçlerini ve yetenek havuzlarının kalitesini ölçmeyi amaçlar. Her yıl yayınlanan GTCI, hükümetlerin, işletmelerin ve eğitim kurumlarının yetenek geliştirme stratejilerini şekillendirmelerine yardımcı olmak için kapsamlı veriler ve analizler sunar.

GTCI, yetenek rekabetçiliğini belirlemek için altı ana kriter kullanır: olanaklar, çekicilik, büyüme, elde tutma, mesleki ve teknik yetenekler ile küresel bilgi becerileri [1].

GTCI ve LPI endekslerinde yer alan kriterlerin her biri, doğrudan sayısal verilerle ölçülebilen sayısal kriterler veya niteliksel verilerle değerlendirilen sözel kriterler olarak sınıflandırılabilir. Lanvin and Evans (2013) ve Mustra (2011) çalışmalarına göre aşağıda bu endekslerde yer alan kriterlerin her birinin sözel veya sayısal özelliklere sahip olup olmadığı açıklanmıştır:

GTCI endeksi kriterleri

Olanaklar: Bir ülkenin yetenek geliştirme ve çekme kapasitesini destekleyen politikalar, iş ortamı ve piyasa koşulları gibi faktörleri içerir. Bu faktörler, çoğunlukla niteliksel değerlendirmelere dayanır, çünkü ülkelerin yasal çerçeveleri, eğitim politikaları ve iş ortamı gibi unsurlar doğrudan sayısal olarak ölçülemeyebilir, ancak uzman değerlendirmeleri ve anketlerle analiz edilebilir.

Çekicilik: Bir ülkenin veya şehrin yetenekleri çekme kapasitesini değerlendirir. Bu, dış ve iç çekicilik gibi unsurları kapsar, örneğin yabancı yetenekleri çekme kapasitesi veya iç pazarın çeşitlilik politikaları. Bu faktörler genellikle sözel olarak değerlendirilir, çünkü yetenek çekme kapasitesi sosyal ve kültürel faktörlere dayanır.

Büyüme: Bir ülkenin eğitim ve yaşam boyu öğrenme yoluyla yetenek geliştirme kapasitesini ölçer. Bu, eğitim sisteminin kalitesi, mesleki eğitim olanakları gibi unsurları içerir. Eğitim sisteminin kalitesi gibi niteliksel unsurlar, çoğunlukla sözel kriterler olarak değerlendirilir.

Elde Tutma: Elde tutma kriteri, bir ülkenin yetenekleri elde tutma kapasitesini değerlendirir. Bu, yaşam kalitesi, iş memnuniyeti ve sosyal güvenlik gibi unsurları içerir. Yaşam kalitesi ve iş memnuniyeti gibi unsurlar, genellikle subjektif değerlendirmelere dayandığından, bu kriterler sözel olarak sınıflandırılır.

Mesleki ve Teknik Yetenekler: Bu kriter, iş gücünün mesleki ve teknik becerilerini değerlendirir. Mesleki eğitim almış bireylerin sayısı, teknik becerilere sahip iş gücü oranı gibi unsurlar doğrudan ölçülebilir ve sayısal verilerle ifade edilir.

Küresel Bilgi Becerileri: Küresel bilgi becerileri kriteri, inovasyon kapasitesi, girişimcilik, yüksek vasıflı iş gücü gibi faktörleri kapsar. Bu faktörler genellikle patent sayısı, Ar-Ge harcamaları, yüksek eğitim düzeyine sahip iş gücü oranı gibi sayısal verilerle ölçülebilir.

LPI endeksi kriterleri

Gümrük İşlemleri ve Sınır Yönetimi: Gümrük işlemlerinin etkinliği, hız ve güvenilirlik gibi unsurları kapsar. Bu tür unsurlar, genellikle anketler ve uzman değerlendirmeleri yoluyla ölçülür, bu nedenle sözel olarak kabul edilir.

Altyapı Kalitesi: Altyapı kalitesi, bir ülkenin lojistik performansını destekleyen yollar, limanlar, havaalanları gibi fiziksel altyapıyı içerir. Bu tür unsurlar genellikle sayısal verilerle, örneğin kilometre başına yol kalitesi veya liman verimliliği ile ölçülür.

Uluslararası Sevkiyatların Kolaylığı: Lojistik hizmetlerin etkinliğini ve hacmini değerlendirir. Sevkiyat sayısı, sevkiyat hacmi gibi ölçülebilir verilerle sayısal olarak ifade edilir.

Lojistik Hizmetlerin Kalitesi: Lojistik hizmet sağlayıcılarının kalite ve yetkinliğini değerlendirir. Bu tür kalite değerlendirmeleri, çoğunlukla kullanıcı deneyimleri ve uzman görüşlerine dayanır, bu nedenle sözel kriter olarak kabul edilir.

Yük Takibi ve İzlenebilirliği: Lojistik süreçlerin izlenebilirliği, sevkiyatların takibi gibi unsurları içerir. Bu unsurlar genellikle sayısal verilerle, örneğin takip edilebilir sevkiyat yüzdesi ile ölçülür.

Sevkiyatların Zamanında Teslim Edilme Oranı: Teslimatların zamanında gerçekleştirilme oranı, bu kriterin temel unsurlarından biridir. Zamanında teslimat oranları gibi doğrudan ölçülebilir veriler kullanılır, bu yüzden sayısal bir kriterdir.

Adım 1: Önerilen entegre metodolojinin ilk adımında kriterlere ait subjektif ağırlıklar AHP yöntemi ile hesaplanır. Bu aşamada global ağırlıkları elde edebilmek adına öncelikle ana kriterlere ait ağırlıklar hesaplanmış ve sonraki alt adım olarak da her bir endeksin alt kriterlerine ait ağırlık hesaplaması yapılmıştır.

Adım 1.1: Ana kriterlerin subjektif ağırlıkları, AHP yöntemi ile elde edilmiştir.

Adım 1.1.1: Karar vericilerin ana kriterleri ikili karşılaştırma yaptığı karar matrisleri oluşturulmuştur. Bu karar matrisleri oluşturulurken Saaty [62] tarafından

hazırlanmış 1-9 ölçeği kullanılmıştır. Çalışmada 3 farklı karar verici karşılaştırma yapmıştır. Kriterlerin subjektif ağırlıkları hesaplanırken görüşleri alınan karar vericilerden ilki Türkiye’de yer alan bir üniversitede Lojistik Yönetimi Anabilim Dalında öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. İkinci karar verici ise uluslararası ölçekteki bir lojistik firmasında orta düzey yönetici olarak çalışmaktadır ve son karar verici de aynı firmada insan kaynakları departmanında çalışmaktadır. Karar vericiler özellikle çalıştıkları pozisyonlar sebebiyle doğal olarak sahip olmaları beklenen bilgi düzeyleri sebebiyle bu çalışma kapsamında görüşleri alınmak üzere seçilmişlerdir. C1 kriteri Küresel Yetenek Rekabeti Endeksi C2 kriteri ise Lojistik Performans Endeksidir.

Tablo 6. Karar Matrisleri

DM1	C1	C2
C1	1,00	4,00
C2	0,25	1,00
DM2	C1	C2
C1	1,00	3,00
C2	0,33	1,00
DM3	C1	C2
C1	1,00	6,00
C2	0,17	1,00

Adım 1.1.2: Ana kriterler için 3 farklı karar vericinin oluşturduğu matrislerin geometrik ortalamalarını alarak toplulaştırılmış karar matrisi elde edilmiştir.

Tablo 7. Toplulaştırılmış Karar Matrisi

TOP.	C1	C2
C1	1,00	4,16
C2	0,24	1,00

Adım 1.1.3: Oluşturulan karar matrisleri eşitlik (2) de yer alan formül ile normalize edilmiştir. Tablo 8 de verilmiştir.

Adım 1.1.4: Eşitlik (3)’de yer alan formül ile normalize edilen karar matrislerinin aritmetik ortalamaları alınarak ağırlıkların oluşması sağlanmaktadır. Tablo 9 da verilmiştir.

Tablo 8. Normalize edilmiş karar matrisleri

DM1	C1.1	C1.2
C1.1	0,80	0,80
C1.2	0,20	0,20
DM2	C1.1	C1.2
C1.1	0,75	0,75
C1.2	0,25	0,25
DM3	C1.1	C1.2
C1.1	0,75	0,75
C1.2	0,25	0,25

Tablo 9. Ağırlıkların hesaplanması

DM1	C1.1	C1.2	W	A*W	D
C1.1	0,80	0,80	0,80	1,60	2,00
C1.2	0,20	0,20	0,20	0,40	2,00
DM2	C1.1	C1.2	W	A*W	D
C1.1	0,75	0,75	0,75	1,50	2,00
C1.2	0,25	0,25	0,25	0,50	2,00
DM3	C1.1	C1.2	W	A*W	D
C1.1	0,75	0,75	0,75	2,25	3,00
C1.2	0,25	0,25	0,25	0,37	1,50

Adım 1.1.5: Ağırlıkları bulunan karar matrislerini toplulaştırılmış matrisi oluşturulmuştur.

Tablo 10. Ağırlığı hesaplanmış toplulaştırılmış matrisler

	C1.1	C1.2	W	A*W	D
C1.1	0,80	0,80	0,80	1,97	2,44
C1.2	0,19	0,19	0,19	0,33	1,69

2 ana kriter olduğundan tutarlılık kontrolüne gerek yoktur.

Adım 1.2: Alt kriterlerin global ağırlıklarının hesaplanması için ana kriterlerin ağırlık hesaplamalarının yanı sıra alt kriterler için de bireysel ağırlıklar hesaplanmalıdır.

Adım 1.2.1: Karar vericilerin ana kriterlerin alt kriterlerini ikili karşılaştırma ile değerlendirdiği karar matrisleri oluşturulmuştur. C1 kriterleri Küresel Yetenek Rekabeti Endeksinin alt kriterlerini göstermektedir.

C2 kriterleri ise Lojistik Performans Endeksinin alt kriterlerini göstermektedir.

Tablo 11. Küresel Yetenek Rekabeti Endeksinin alt kriterleri

DM1	C1.1	C1.2	C1.3	C1.4	C1.5	C1.6
C1.1	1,00	3,00	0,25	2,00	3,00	4,00
C1.2	0,33	1,00	0,50	1,00	2,00	0,50
C1.3	4,00	2,00	1,00	2,00	3,00	2,00
C1.4	0,50	1,00	0,50	1,00	2,00	0,50
C1.5	0,33	0,50	0,33	0,50	1,00	0,25
C1.6	0,25	2,00	0,50	2,00	4,00	1,00
DM2	C1.1	C1.2	C1.3	C1.4	C1.5	C1.6
C1.1	1,00	2,00	0,50	1,00	2,00	3,00
C1.2	0,50	1,00	0,50	1,00	2,00	0,50
C1.3	2,00	2,00	1,00	3,00	1,00	2,00
C1.4	1,00	1,00	0,33	1,00	0,50	1,00
C1.5	0,50	0,50	1,00	2,00	1,00	0,50
C1.6	0,33	2,00	0,50	1,00	2,00	1,00
DM3	C1.1	C1.2	C1.3	C1.4	C1.5	C1.6
C1.1	1,00	4,00	0,50	2,00	1,00	3,00
C1.2	0,25	1,00	0,50	2,00	1,00	2,00
C1.3	2,00	2,00	1,00	4,00	2,00	3,00
C1.4	0,50	0,50	0,25	1,00	0,50	2,00
C1.5	1,00	1,00	0,50	2,00	1,00	0,50
C1.6	0,33	0,50	0,33	0,50	2,00	1,00

Tablo 12. Lojistik Performans Endeksinin alt kriterleri

DM1	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4	C2.5	C2.6
C2.1	1,00	2,00	1,00	3,00	4,00	2,00
C2.2	0,50	1,00	0,50	3,00	2,00	4,00
C2.3	1,00	2,00	1,00	2,00	1,00	3,00
C2.4	0,33	0,33	0,50	1,00	0,50	4,00
C2.5	0,25	0,50	1,00	2,00	1,00	2,00
C2.6	0,50	0,25	0,33	0,25	0,50	1,00
DM2	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4	C2.5	C2.6
C2.1	1,00	3,00	2,00	2,00	5,00	3,00
C2.2	0,33	1,00	3,00	1,00	2,00	2,00
C2.3	0,50	0,33	1,00	0,50	4,00	2,00
C2.4	0,50	1,00	2,00	1,00	2,00	4,00
C2.5	0,20	0,50	0,25	0,50	1,00	3,00

Tablo 12. Lojistik Performans Endeksinin alt kriterleri (devamı)

DM2	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4	C2.5	C2.6
C2.6	0,33	0,50	0,50	0,25	0,33	1,00
DM3	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4	C2.5	C2.6
C2.1	1,00	0,50	1,00	3,00	5,00	4,00
C2.2	2,00	1,00	2,00	1,00	2,00	3,00
C2.3	1,00	0,50	1,00	0,50	2,00	1,00
C2.4	0,33	1,00	2,00	1,00	2,00	2,00
C2.5	0,20	0,50	0,50	0,50	1,00	3,00
C2.6	0,25	0,33	1,00	0,50	0,33	1,00

Adım 1.2.2: 3 farklı karar vericinin oluşturduğu matrisleri geometrik ortalamalarını alarak toplulaştırılmış karar matrisi Tablo 13 ile gösterildiği gibi elde edilmiştir.

Tablo 13. Küresel Yetenek Rekabeti Endeksinin alt kriterlerinin toplulaştırılmış karar matrisi

Toplu. matris	C1.1	C1.2	C1.3	C1.4	C1.5	C1.6
C1.1	1	2,88	0,39	1,58	1,81	3,30
C1.2	0,34	1	0,5	1,25	1,58	0,79
C1.3	2,51	2	1	2,88	1,81	2,28
C1.4	0,62	0,79	0,34	1	0,79	1
C1.5	0,55	0,62	0,55	1,25	1	0,39
C1.6	0,30	1,25	0,43	1	2,51	1

Tablo 14. Lojistik Performans Endeksinin alt kriterlerinin toplulaştırılmış karar matrisi

Toplu. matris	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4	C2.5	C2.6
C2.1	1	1,44	1,25	2,62	4,64	2,88
C2.2	0,69	1	1,44	1,44	2	2,88
C2.3	0,79	0,69	1	0,79	2	1,81
C2.4	0,38	0,69	1,25	1	1,25	3,17
C2.5	0,21	0,5	0,5	0,79	1	2,62
C2.6	0,34	0,34	0,55	0,31	0,38	1

Adım 1.2.3: Oluşturulan karar matrisleri eşitlik (2) de yer alan formül ile normalize edilmiştir.

Tablo 15. Küresel Yetenek Rekabeti Endeksinin alt kriterleri normalize değerleri

DM1	C1.1	C1.2	C1.3	C1.4	C1.5	C1.6
C1.1	0,15	0,31	0,08	0,23	0,20	0,48
C1.2	0,05	0,10	0,16	0,11	0,13	0,06
C1.3	0,62	0,21	0,32	0,23	0,20	0,24
C1.4	0,07	0,10	0,16	0,11	0,13	0,06
C1.5	0,05	0,05	0,10	0,05	0,06	0,03
C1.6	0,03	0,21	0,16	0,23	0,26	0,12
DM2	C1.1	C1.2	C1.3	C1.4	C1.5	C1.6
C1.1	0,18	0,23	0,13	0,11	0,23	0,37
C1.2	0,09	0,11	0,13	0,11	0,23	0,06
C1.3	0,37	0,23	0,26	0,33	0,11	0,25
C1.4	0,18	0,11	0,08	0,11	0,05	0,12
C1.5	0,09	0,05	0,26	0,22	0,11	0,06
C1.6	0,06	0,23	0,13	0,11	0,23	0,12
DM3	C1.1	C1.2	C1.3	C1.4	C1.5	C1.6
C1.1	0,19	0,44	0,16	0,17	0,13	0,26
C1.2	0,04	0,11	0,16	0,17	0,13	0,17
C1.3	0,39	0,22	0,32	0,34	0,26	0,26
C1.4	0,09	0,05	0,08	0,08	0,06	0,17
C1.5	0,19	0,11	0,16	0,17	0,13	0,04
C1.6	0,06	0,05	0,10	0,04	0,26	0,08

Tablo 16. Lojistik Performans Endeksinin alt kriterleri normalize değerleri

DM1	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4	C2.5	C2.6
C2.1	0,27	0,32	0,23	0,26	0,44	0,12
C2.2	0,14	0,16	0,11	0,26	0,22	0,25
C2.3	0,27	0,32	0,23	0,17	0,11	0,18
C2.4	0,09	0,05	0,11	0,08	0,05	0,25
C2.5	0,07	0,08	0,23	0,17	0,11	0,12
C2.6	0,14	0,04	0,07	0,02	0,05	0,06
DM2	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4	C2.5	C2.6
C2.1	0,34	0,47	0,22	0,38	0,34	0,20
C2.2	0,11	0,15	0,34	0,19	0,14	0,13
C2.3	0,17	0,05	0,11	0,09	0,27	0,13
C2.4	0,17	0,15	0,22	0,19	0,14	0,26
C2.5	0,07	0,07	0,02	0,09	0,07	0,20
C2.6	0,11	0,07	0,05	0,04	0,02	0,06
DM3	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4	C2.5	C2.6

Tablo 16. Lojistik Performans Endeksinin alt kriterleri normalize değerleri (devamı)

DM3	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4	C2.5	C2.6
C2.1	0,20	0,13	0,13	0,46	0,40	0,28
C2.2	0,41	0,26	0,26	0,15	0,16	0,21
C2.3	0,20	0,13	0,13	0,07	0,16	0,07
C2.4	0,07	0,26	0,26	0,15	0,16	0,14
C2.5	0,04	0,13	0,06	0,07	0,08	0,21
C2.6	0,05	0,08	0,13	0,07	0,02	0,07

Adım 1.2.4: Eşitlik (3)'de yer alan formül ile normalize edilen karar matrislerinin aritmetik ortalamaları alınarak ağırlıklar Tablo 17 ile gösterildiği gibi elde edilmektedir ve sonrasında da tutarlılık analizi için ihtiyaç duyulan metrikler hesaplanmaktadır.

Tablo 17. Ağırlıkların hesaplanması

	DM1	C1.1	C1.2	C1.3	C1.4	C1.5	C1.6	W	A*W	D
	C1.1	0,15	0,31	0,08	0,23	0,20	0,48	0,24	1,73	7,05
	C1.2	0,05	0,10	0,16	0,11	0,13	0,06	0,10	0,66	6,26
	C1.3	0,62	0,21	0,32	0,23	0,20	0,24	0,30	2,25	7,34
	C1.4	0,07	0,10	0,16	0,11	0,13	0,06	0,10	0,70	6,38
	C1.5	0,05	0,05	0,10	0,05	0,06	0,03	0,06	0,40	6,44
	C1.6	0,03	0,21	0,16	0,23	0,26	0,12	0,17	1,06	6,15
	DM2	C1.1	C1.2	C1.3	C1.4	C1.5	C1.6	W	A*W	D
	C1.1	0,18	0,23	0,13	0,11	0,23	0,37	0,21	1,43	6,73
	C1.2	0,09	0,11	0,13	0,11	0,23	0,06	0,12	0,82	6,58
	C1.3	0,37	0,23	0,26	0,33	0,11	0,25	0,26	1,72	6,55
	C1.4	0,18	0,11	0,08	0,11	0,05	0,12	0,11	0,76	6,61
	C1.5	0,09	0,05	0,26	0,22	0,11	0,06	0,13	0,87	6,40
	C1.6	0,06	0,23	0,13	0,11	0,23	0,12	0,15	0,99	6,59
	DM3	C1.1	C1.2	C1.3	C1.4	C1.5	C1.6	W	A*W	D
	C1.1	0,19	0,44	0,16	0,17	0,13	0,26	0,22	1,55	6,79
	C1.2	0,04	0,11	0,16	0,17	0,13	0,17	0,13	0,88	6,53
	C1.3	0,39	0,22	0,32	0,34	0,26	0,26	0,30	1,99	6,57
	C1.4	0,09	0,05	0,08	0,08	0,06	0,17	0,09	0,63	6,69
	C1.5	0,19	0,11	0,16	0,17	0,13	0,04	0,13	0,89	6,50
	C1.6	0,06	0,05	0,10	0,04	0,26	0,08	0,10	0,67	6,40
	DM1	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4	C2.5	C2.6	W	A*W	D
	C2.1	0,27	0,32	0,23	0,26	0,44	0,12	0,27	1,88	6,72
	C2.2	0,14	0,16	0,11	0,26	0,22	0,25	0,19	1,30	6,74
	C2.3	0,27	0,32	0,23	0,17	0,11	0,18	0,21	1,44	6,54
	C2.4	0,09	0,05	0,11	0,08	0,05	0,25	0,11	0,71	6,46
	C2.5	0,07	0,08	0,23	0,17	0,11	0,12	0,13	0,87	6,55
	C2.6	0,14	0,04	0,07	0,02	0,05	0,06	0,06	0,42	6,34

Tablo 17. Ağırlıkların hesaplanması (devamı)

DM2	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4	C2.5	C2.6	W	A*W	D
C2.1	0,34	0,47	0,22	0,38	0,34	0,20	0,33	2,19	6,62
C2.2	0,11	0,15	0,34	0,19	0,14	0,13	0,18	1,22	6,76
C2.3	0,17	0,05	0,11	0,09	0,27	0,13	0,14	0,95	6,74
C2.4	0,17	0,15	0,22	0,19	0,14	0,26	0,19	1,26	6,54
C2.5	0,07	0,07	0,02	0,09	0,07	0,20	0,09	0,57	6,34
C2.6	0,11	0,07	0,05	0,04	0,02	0,06	0,06	0,41	6,37
DM3	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4	C2.5	C2.6	W	A*W	D
C2.1	0,20	0,13	0,13	0,46	0,40	0,28	0,27	1,86	6,86
C2.2	0,41	0,26	0,26	0,15	0,16	0,21	0,24	1,65	6,71
C2.3	0,20	0,13	0,13	0,07	0,16	0,07	0,13	0,89	6,82
C2.4	0,07	0,26	0,26	0,15	0,16	0,14	0,17	1,13	6,40
C2.5	0,04	0,13	0,06	0,07	0,08	0,21	0,10	0,66	6,44
C2.6	0,05	0,08	0,13	0,07	0,02	0,07	0,07	0,48	6,38

Adım 1.2.5: Adım 1.4 yer alan formüller kullanılarak tutarlılık hesapları yapılmıştır. C1 alt kriterlerin tutarlılıkları aşağıdaki gibidir.

Tablo 18. GTCI Tutarlılık hesaplanması

DM	Tutarlılık Değeri
DM1	0,09787
DM2	0,09344
DM3	0,09457

C2 alt kriterlerini içeren matrisinin tutarlılıkları aşağıdaki gibidir.

Tablo 19. LPI Tutarlılık hesaplanması

DM	Tutarlılık Değeri
DM1	0,090853
DM2	0,091106
DM3	0,097845

Adım 1.2.6: Ağırlıkları bulunan karar matrislerini toplulaştırılmış matrisi oluşturulmuştur.

Tablo 20. Ağırlığı hesaplanmış alt kriterlerin toplulaştırılmış matrisleri

Top. Matris	C1.1	C1.2	C1.3	C1.4	C1.5	C1.6	W	A*W	D
C1.1	0,18	0,33	0,12	0,17	0,19	0,37	0,23	1,52	6,54
C1.2	0,06	0,11	0,15	0,14	0,16	0,09	0,12	0,76	6,22
C1.3	0,47	0,23	0,31	0,32	0,19	0,26	0,29	1,94	6,50
C1.4	0,11	0,09	0,10	0,11	0,08	0,11	0,10	0,67	6,44
C1.5	0,10	0,07	0,17	0,14	0,10	0,04	0,10	0,66	6,22
C1.6	0,05	0,14	0,13	0,11	0,26	0,11	0,13	0,86	6,25
Top. Matris	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4	C2.5	C2.6	W	A*W	D
C2.1	0,29	0,30	0,21	0,37	0,41	0,20	0,30	1,91	6,36
C2.2	0,20	0,21	0,24	0,20	0,17	0,20	0,20	1,29	6,21
C2.3	0,23	0,14	0,16	0,11	0,17	0,12	0,16	1,01	6,25
C2.4	0,11	0,14	0,21	0,14	0,11	0,22	0,15	0,97	6,16
C2.5	0,06	0,10	0,08	0,11	0,08	0,18	0,10	0,66	6,21
C2.6	0,10	0,07	0,09	0,04	0,03	0,07	0,06	0,42	6,11

Adım 1.2.7: Oluşturulan toplulaştırılmış matrislere ait tutarlılık değerleri hesaplandığında LPI alt kriterlerinin toplulaştırılmış matrisine ait tutarlılık değeri 0,059; GTCI alt kriterlerine ait matrisin tutarlılık değeri ise 0,035 olarak hesaplanmıştır ve bu değerler 0,1 değerinden küçük olduğu için subjektif ağırlık hesaplamasında yapılan değerlendirmeler tutarlıdır

Adım 1.2.8: Ana kriterlerden elde edilen ağırlıklar, ilgili kriterin alt kriter ağırlıkları ile çarpılarak global ağırlıkları tablo 21 ile gösterildiği gibi hesaplanmıştır. Örneğin C1.1 için C1 ana kriter ağırlığı ile C1.1 alt kriterinin ağırlığı çarpılarak 0.18 değeri elde edilmiştir.

Tablo 21. Kriterlere ait subjektif global ağırlıklar (w_j^A)

Kriter	Ağırlık	Kriter	Ağırlık
C1.1	0,18	C2.1	0,05
C1.2	0,09	C2.2	0,04
C1.3	0,23	C2.3	0,03
C1.4	0,08	C2.4	0,03
C1.5	0,08	C2.5	0,02
C.16	0,11	C2.6	0,01

Adım 2: Entegre metodolojinin ikinci aşamasında ise yine ilk adımda olduğu gibi global kriter ağırlıklarına erişebilmek için hem ana hem de alt kriterlere ait objektif ağırlıklar hesaplanmıştır.

Adım 2.1: Ana kriterlerin objektif ağırlıkları, MEREC yöntemi ile elde edilmiştir.

Adım 2.1.1: Araştırmada ikinci olarak MEREC yöntemi kullanılarak ana kriter bileşenlerinin önem dereceleri ölçülmüştür. Bu kapsamda MEREC yönteminin birinci adımında Eşitlik (4) ile karar matrisi oluşturulmuştur. Oluşturulan karar matrisi değerleri tablo 22’de gösterilmiştir.

Tablo 22. Ana kriter karar matrisi

Ülke	C1	C2
A.B.D.	76,60	3,80
Almanya	69,88	4,10
Avusturya	69,05	4,00
Belçika	69,12	4,00
İngiltere	73,75	3,70
Danimarka	76,54	4,10
Fransa	66,91	3,90
Hollanda	74,76	4,10
İrlanda	70,45	3,60
İspanya	60,36	3,90
İsveç	73,86	4,00

Tablo 22. Ana kriter karar matrisi (devamı)

Ülke	C1	C2
İsviçre	78,96	4,10
İtalya	58,07	3,70
İzlanda	69,38	3,60
Kanada	70,13	4,00
Lüksemburg	72,88	3,60
Norveç	73,96	3,70
Portekiz	61,60	3,40
Türkiye	40,20	3,40
Yunanistan	52,75	3,70
Japonya	61,65	3,90
Finlandiya	74,35	4,20
Avustralya	73,93	3,70
Yeni Zellanda	67,26	3,60
Meksika	42,17	2,90
Çekya	62,43	3,30
Macaristan	53,91	3,20
Polonya	54,10	3,60
Güney Kore	62,21	3,80
Slovakya	54,24	3,30
Şili	55,48	3,00
Estonya	64,29	3,60
Slovenya	60,62	3,30
İsrail	62,20	3,60
Letonya	56,78	3,50
Litvanya	58,73	3,40
Kolombiya	42,44	2,90
Kosta Rika	50,20	2,90

Adım 2.1.2: Eşitlik (5) ile eşitlik (6) yardımıyla karar matrisi normalize edilmiştir. Normalize edilen değerler tablo 23’te gösterilmektedir.

Tablo 23. Ana kriterlerin normalize değerleri

Ülke	C1	C2
A.B.D.	0,52	0,76
Almanya	0,58	0,71
Avusturya	0,58	0,73
Belçika	0,58	0,73
İngiltere	0,55	0,78
Danimarka	0,53	0,71
Fransa	0,60	0,74
Hollanda	0,54	0,71

Tablo 23. Ana kriterlerin normalize değerleri (devamı)

Ülke	C1	C2
İrlanda	0,57	0,81
İspanya	0,67	0,74
İsveç	0,54	0,73
İsviçre	0,51	0,71
İtalya	0,69	0,78
İzlanda	0,58	0,81
Kanada	0,57	0,73
Lüksemburg	0,55	0,81
Norveç	0,54	0,78
Portekiz	0,65	0,85
Türkiye	1,00	0,85
Yunanistan	0,76	0,78
Japonya	0,65	0,74
Finlandiya	0,54	0,69
Avustralya	0,54	0,78
Yeni Zellanda	0,60	0,81
Meksika	0,95	1,00
Çekya	0,64	0,88
Macaristan	0,75	0,91
Polonya	0,74	0,81
Güney Kore	0,65	0,76
Slovakya	0,74	0,88
Şili	0,72	0,97
Estonya	0,63	0,81
Slovenya	0,66	0,88
İsrail	0,65	0,81
Letonya	0,71	0,83
Litvanya	0,68	0,85
Kolombiya	0,95	1,00
Kosta Rika	0,80	1,00

Adım 2.1.3: Alternatiflerin toplam performans değeri (S_i) eşitlik (7) yardımıyla ölçülmüştür.

Tablo 24. Ülkelerin ana kriter performans değerindeki değişiklikler (S'_{ij})

	S_i
A.B.D.	0,37
Almanya	0,37
Avusturya	0,35
Belçika	0,35

Tablo 24. Ülkelerin ana kriter performans değerindeki değişiklikler (S'_{ij}) (devamı)

	S_i
İngiltere	0,35
Danimarka	0,40
Fransa	0,33
Hollanda	0,39
İrlanda	0,32
İspanya	0,30
İsveç	0,38
İsviçre	0,41
İtalya	0,26
İzlanda	0,32
Kanada	0,36
Lüksemburg	0,34
Norveç	0,35
Portekiz	0,25
Türkiye	0,07
Yunanistan	0,22
Japonya	0,30
Finlandiya	0,40
Avustralya	0,35
Yeni Zellanda	0,31
Meksika	0,02
Çekya	0,25
Macaristan	0,17
Polonya	0,22
Güney Kore	0,30
Slovakya	0,19
Şili	0,16
Estonya	0,29
Slovenya	0,23
İsrail	0,28
Letonya	0,23
Litvanya	0,23
Kolombiya	0,02
Kosta Rika	0,10

Adım 2.1.4: Eşitlik (8) kullanılarak OECD ülkelerinin performanslarında gerçekleşen değişiklikler (S'_{ij}) hesaplanmıştır.

Tablo 25. Ülkelerin ana kriter performanslarındaki değişiklikler (S'_{ij})

Ülke	C1	C2
A.B.D.	0,12	0,27
Almanya	0,15	0,24
Avusturya	0,14	0,23
Belçika	0,14	0,23
İngiltere	0,11	0,26
Danimarka	0,15	0,27
Fransa	0,13	0,22
Hollanda	0,15	0,27
İrlanda	0,10	0,24
İspanya	0,13	0,18
İsveç	0,14	0,26
İsviçre	0,15	0,29
İtalya	0,11	0,16
İzlanda	0,10	0,24
Kanada	0,14	0,24
Lüksemburg	0,10	0,26
Norveç	0,11	0,26
Portekiz	0,07	0,19
Türkiye	0,07	0
Yunanistan	0,11	0,12
Japonya	0,13	0,19
Finlandiya	0,16	0,26
Avustralya	0,11	0,26
Yeni Zellanda	0,10	0,22
Meksika	0	0,02
Çekya	0,06	0,19
Macaristan	0,04	0,13
Polonya	0,10	0,13
Güney Kore	0,12	0,19
Slovakya	0,06	0,13
Şili	0,01	0,14
Estonya	0,10	0,21
Slovenya	0,06	0,18
İsrail	0,10	0,19
Letonya	0,08	0,15
Litvanya	0,07	0,17
Kolombiya	0	0,02
Kosta Rika	0	0,10

Adım 2.1.5: Mutlak sapmaların toplamı eşitlik (9) yardımıyla (E_j) hesaplanmıştır. Bu adımda kriterin maruz kaldığı çıkartılma etkisi hesaplanır.

Tablo 26. Mutlak sapmaların toplamı tablosu

Ülke	C1	C2
A.B.D.	0,24	0,09
Almanya	0,21	0,12
Avusturya	0,20	0,11
Belçika	0,20	0,11
İngiltere	0,23	0,08
Danimarka	0,24	0,12
Fransa	0,20	0,11
Hollanda	0,23	0,12
İrlanda	0,22	0,08
İspanya	0,16	0,11
İsveç	0,23	0,11
İsviçre	0,25	0,12
İtalya	0,15	0,09
İzlanda	0,22	0,08
Kanada	0,21	0,11
Lüksemburg	0,23	0,08
Norveç	0,24	0,08
Portekiz	0,18	0,06
Türkiye	0	0,07
Yunanistan	0,11	0,10
Japonya	0,17	0,11
Finlandiya	0,23	0,13
Avustralya	0,24	0,08
Yeni Zellanda	0,20	0,08
Meksika	0,02	0
Çekya	0,18	0,05
Macaristan	0,13	0,04
Polonya	0,12	0,08
Güney Kore	0,17	0,10
Slovakya	0,13	0,05
Şili	0,14	0,01
Estonya	0,19	0,08
Slovenya	0,17	0,05
İsrail	0,17	0,08
Letonya	0,14	0,07
Litvanya	0,16	0,06
Kolombiya	0,02	0
Kosta Rika	0,10	0

Adım 2.1.6: eşitlik (10) yardımıyla öncelikle ana kriterlerin önemlilik dereceleri hesaplanır sonrasında ise tablo 26'da gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

Tablo 26. Önemlilik dereceleri ve ana kriter ağırlıkları

	C1	C2	C1	C2
wj	0,68	0,31	Ej	6,79
				3,19

Adım 2.2: Kriterlere ait global ağırlıkları bulmak için aşağıdaki işlem adımlarında olduğu üzere alt kriterler için de ağırlık hesaplaması yapılmıştır.

Adım 2.2.1: MEREK yöntemi kullanılarak alt kriter bileşenlerinin önem dereceleri ölçülmüştür. Bu kapsamda MEREK yönteminin birinci adımında Eşitlik (4) ile karar matrisi oluşturulmuştur. Oluşturulan karar matrisi değerleri tablo 27'de gösterilmiştir.

Adım 2.2.2 Eşitlik (5) ile eşitlik (6) yardımıyla karar matrisi normalize edilmiştir. Normalize edilen değerler tablo 28 ile gösterilmektedir.

Tablo 27. Alt kriterlere ait karar matrisi

Ülke	C1.1	C1.2	C1.3	C1.4	C1.5	C1.6	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4	C2.5	C2.6
A.B.D.	82,5	70,1	85,0	82,3	75,7	63,8	3,7	3,9	3,4	3,9	3,8	4,2
Almanya	75,7	73,3	63,9	88,5	72,1	45,5	3,9	4,3	3,7	4,2	4,1	4,2
Avusturya	74,3	73,0	60,3	89,5	72,7	44,3	3,7	3,9	3,8	4,0	4,3	4,2
Belçika	73,2	72,8	68,9	80,3	67,7	51,6	3,9	4,1	3,8	4,2	4,2	4,0
İngiltere	75,1	75,1	78,1	85,4	62,1	66,4	3,5	3,7	3,5	3,7	3,7	4,0
Danimarka	85,4	78,5	71,0	91,0	71,6	61,5	4,1	4,1	3,6	4,1	4,1	4,3
Fransa	69,1	66,4	71,3	81,4	63,5	49,6	3,7	3,8	3,7	3,8	4,1	4,0
Hollanda	82,2	78,1	76,8	86,7	68,3	56,0	3,9	4,2	3,7	4,2	4,0	4,2
İrlanda	68,2	80,3	69,8	83,9	63,9	56,2	3,4	3,5	3,6	3,6	3,7	3,7
İspanya	61,4	64,9	62,6	81,7	49,4	41,8	3,6	3,8	3,7	3,9	4,2	4,1
İsveç	82,1	75,6	64,6	88,2	69,6	62,8	4,0	4,2	3,4	4,2	4,2	4,1
İsviçre	87,3	82,5	75,4	92,0	75,3	61	4,1	4,4	3,6	4,3	4,2	4,2
İtalya	59,6	58,3	54,8	77,0	62,1	36,4	3,4	3,8	3,4	3,8	3,9	3,9
İzlanda	69,8	73	55,6	84,5	68,7	64,3	3,7	3,6	3,3	3,5	3,6	3,7
Kanada	74,2	76,3	70,7	78,6	67,0	53,9	4,0	4,3	3,6	4,2	4,1	4,1
Lüksemburg	74,9	91,6	55,8	88,1	66,6	60,0	3,6	3,6	3,6	3,9	3,5	3,5
Norveç	78,3	74,3	65,6	90,7	72,0	62,5	3,8	3,9	3,0	3,8	4,0	3,7
Portekiz	59,3	73,1	54,8	80,8	55,9	45,4	3,2	3,6	3,1	3,6	3,6	3,2
Türkiye	37,7	38,7	42,7	53,0	41,3	27,6	3,0	3,4	3,4	3,5	3,6	3,5
Yunanistan	48,8	57,1	48,5	77,3	48,6	35,9	3,2	3,7	3,8	3,8	3,9	3,9
Japonya	76,0	57,5	56,3	80,5	59,0	40,3	3,9	4,2	3,3	4,1	4,0	4,0
Finlandiya	85,2	77,4	64,7	90,6	73,2	54,7	4,0	4,2	4,1	4,2	4,3	4,2
Avustralya	74,2	78,6	74,9	83,5	66,2	65,9	3,7	4,1	3,1	3,9	3,6	4,1
Yeni Zelanda	75,2	75,4	59,9	80,6	51,3	60,8	3,4	3,8	3,2	3,7	3,8	3,8
Meksika	39,3	41,7	47,0	58,8	41,6	24,3	2,5	2,8	2,8	3,0	3,5	3,1
Çekya	63,4	64,3	53,8	80,7	69,7	42,5	3,0	3,0	3,4	3,6	3,7	3,2
Macaristan	52,8	56,0	42,4	71,8	61,6	38,7	2,7	3,1	3,4	3,1	3,6	3,4
Polonya	53,0	49,3	48,8	70,2	64,9	38,1	3,4	3,5	3,3	3,6	3,9	3,8
Güney Kore	65,8	52,5	51,9	77,8	62,9	61,9	3,9	4,1	3,4	3,8	3,8	3,8

Tablo 27. Alt kriterlere ait karar matrisi (devamı)

Ülke	C1.1	C1.2	C1.3	C1.4	C1.5	C1.6	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4	C2.5	C2.6
Slovakya	53,0	54,2	42,2	75,9	63,9	36,1	3,2	3,3	3,0	3,4	3,5	3,3
Şili	54,5	62,3	49,1	73,8	57,5	35,5	3,0	2,8	2,7	3,1	3,2	3,0
Estonya	65,4	68,6	51,5	81,5	61,3	57,1	3,2	3,5	3,4	3,7	4,1	3,8
Slovenya	58,8	62,7	52,1	79,5	66,6	43,8	3,4	3,6	3,4	3,3	3,3	3,0
İsrail	65,0	56,8	46,3	80,0	68,2	56,6	3,4	3,7	3,5	3,8	3,8	3,7
Letonya	54,6	60,2	48,0	74,7	60,5	42,3	3,3	3,3	3,2	3,7	4,0	3,6
Litvanya	61,0	63,1	48,9	79	56,9	43,2	3,2	3,5	3,4	3,6	3,6	3,1
Kolombiya	42,1	49,6	45,4	48,1	43,7	25,5	2,5	2,9	3,0	3,1	3,2	3,1
Kosta Rika	53,9	63,6	48,5	64,2	46,8	23,9	2,8	2,7	2,8	2,9	3,2	2,9

Tablo 28. Alt kriterlerin normalize değerleri

	C1.1	C1.2	C1.3	C1.4	C1.5	C1.6	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4	C2.5	C2.6
A.B.D.	0,45	0,55	0,49	0,58	0,54	0,37	0,67	0,69	0,79	0,74	0,84	0,69
Almanya	0,49	0,52	0,66	0,54	0,57	0,52	0,64	0,62	0,72	0,69	0,78	0,69
Avusturya	0,50	0,53	0,70	0,53	0,56	0,53	0,67	0,69	0,71	0,725	0,74	0,69
Belçika	0,51	0,53	0,61	0,59	0,61	0,46	0,64	0,65	0,71	0,69	0,76	0,725
İngiltere	0,50	0,51	0,54	0,5	0,66	0,35	0,71	0,72	0,77	0,78	0,86	0,72
Danimarka	0,44	0,49	0,59	0,52	0,57	0,38	0,60	0,65	0,75	0,70	0,78	0,67
Fransa	0,54	0,58	0,59	0,590	0,65	0,48	0,67	0,71	0,72	0,76	0,78	0,72
Hollanda	0,45	0,49	0,54	0,55	0,60	0,42	0,64	0,64	0,72	0,69	0,8	0,69
İrlanda	0,55	0,48	0,60	0,57	0,64	0,42	0,73	0,77	0,75	0,80	0,86	0,78
İspanya	0,61	0,59	0,67	0,58	0,83	0,57	0,69	0,71	0,72	0,74	0,76	0,70
İsveç	0,45	0,51	0,65	0,54	0,59	0,38	0,62	0,64	0,79	0,69	0,76	0,70
İsviçre	0,43	0,46	0,56	0,52	0,54	0,39	0,60	0,61	0,75	0,67	0,76	0,69
İtalya	0,63	0,66	0,77	0,62	0,66	0,65	0,73	0,71	0,79	0,76	0,82	0,74
İzlanda	0,53	0,53	0,75	0,56	0,60	0,37	0,67	0,75	0,81	0,82	0,88	0,78
Kanada	0,50	0,50	0,59	0,61	0,61	0,44	0,62	0,62	0,75	0,69	0,78	0,70
Lüksemburg	0,50	0,42	0,75	0,54	0,62	0,39	0,69	0,75	0,75	0,74	0,91	0,82
Norveç	0,48	0,52	0,64	0,53	0,57	0,38	0,65	0,69	0,9	0,76	0,8	0,78
Portekiz	0,63	0,52	0,77	0,59	0,73	0,52	0,78	0,75	0,87	0,80	0,88	0,90
Türkiye	1	1	0,98	0,90	1	0,86	0,83	0,79	0,79	0,82	0,88	0,82
Yunanistan	0,77	0,67	0,87	0,62	0,84	0,66	0,78	0,72	0,71	0,76	0,82	0,74
Japonya	0,49	0,67	0,75	0,59	0,70	0,59	0,64	0,64	0,81	0,70	0,8	0,72
Finlandiya	0,44	0,49	0,65	0,53	0,56	0,43	0,62	0,64	0,65	0,69	0,74	0,69
Avustralya	0,50	0,49	0,56	0,57	0,62	0,36	0,67	0,65	0,87	0,74	0,88	0,70
Yeni Zelanda	0,50	0,51	0,70	0,59	0,80	0,39	0,73	0,71	0,84	0,78	0,84	0,76
Meksika	0,95	0,92	0,89	0,81	0,99	0,98	1	0,96	0,96	0,96	0,91	0,93

Tablo 28. Alt kriterlerin normalize değerleri (devamı)

	C1.1	C1.2	C1.3	C1.4	C1.5	C1.6	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4	C2.5	C2.6
Çekya	0,59	0,60	0,78	0,59	0,59	0,56	0,83	0,9	0,79	0,80	0,86	0,90
Macaristan	0,71	0,69	0,99	0,67	0,67	0,61	0,92	0,87	0,79	0,93	0,88	0,85
Polonya	0,71	0,78	0,86	0,68	0,63	0,62	0,73	0,77	0,81	0,80	0,82	0,76
Güney Kore	0,57	0,73	0,81	0,61	0,65	0,38	0,64	0,65	0,79	0,76	0,84	0,76
Slovakya	0,71	0,71	1	0,63	0,64	0,66	0,78	0,81	0,90	0,85	0,91	0,87
Şili	0,69	0,62	0,86	0,65	0,71	0,67	0,83	0,96	1	0,93	1	0,96
Estonya	0,57	0,56	0,81	0,59	0,67	0,41	0,78	0,77	0,79	0,78	0,78	0,76
Slovenya	0,64	0,61	0,81	0,60	0,62	0,54	0,73	0,75	0,79	0,87	0,96	0,96
İsrail	0,57	0,68	0,91	0,60	0,60	0,42	0,73	0,72	0,77	0,76	0,84	0,78
Letonya	0,68	0,64	0,87	0,64	0,68	0,56	0,75	0,81	0,84	0,78	0,80	0,80
Litvanya	0,61	0,61	0,86	0,60	0,72	0,55	0,78	0,77	0,79	0,80	0,88	0,93
Kolombiya	0,89	0,77	0,92	1	0,94	0,93	1	0,93	0,9	0,93	1	0,93
Kosta Rika	0,69	0,60	0,87	0,74	0,88	1	0,89	1	0,96	1	1	1

Adım 2.2.3: Alternatiflerin alt kriter toplam performans değeri (S_i) eşitlik (7) yardımıyla ölçülmüştür.

Tablo 29. Alternatiflerin alt kriter toplam performans değerleri

Ülke	S_i	Ülke	S_i	Ülke	S_i	Ülke	S_i
A.B.D.	0,40	İsveç	0,41	Japonya	0,33	Şili	0,18
Almanya	0,39	İsviçre	0,44	Finlandiya	0,42	Estonya	0,32
Avusturya	0,38	İtalya	0,29	Avustralya	0,38	Slovenya	0,27
Belçika	0,39	İzlanda	0,34	Yeni Zelanda	0,34	İsrail	0,31
İngiltere	0,38	Kanada	0,39	Meksika	0,05	Letonya	0,26
Danimarka	0,42	Lüksemburg	0,36	Çekya	0,27	Litvanya	0,26
Fransa	0,36	Norveç	0,38	Macaristan	0,20	Kolombiya	0,06
Hollanda	0,41	Portekiz	0,28	Polonya	0,25	Kosta Rika	0,12
İrlanda	0,35	Türkiye	0,10	Güney Kore	0,33		
İspanya	0,32	Yunanistan	0,25	Slovakya	0,21		

Adım 2.2.4: Eşitlik (8) ile tüm alt kriterlerin değeri çıkartılarak ülkelerin performanslarındaki değişiklikler (S'_{ij}) hesaplanmıştır.

Tablo 29. Alt kriterler için ülkelerin performanslarındaki değişiklikler (S'_{ij})

Ülke	C1.1	C1.2	C1.3	C1.4	C1.5	C1.6	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4	C2.5	C2.6
A.B.D.	0,36	0,37	0,37	0,38	0,37	0,35	0,39	0,39	0,39	0,39	0,40	0,39
Almanya	0,35	0,36	0,37	0,36	0,36	0,36	0,37	0,37	0,37	0,37	0,38	0,37
Avusturya	0,34	0,34	0,36	0,34	0,35	0,34	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36
Belçika	0,35	0,35	0,36	0,36	0,36	0,35	0,36	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37

Tablo 29. Alt kriterler için ülkelerin performanslarındaki değişiklikler (S'_{ij}) (devamı)

Ülke	C1.1	C1.2	C1.3	C1.4	C1.5	C1.6	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4	C2.5	C2.6
İngiltere	0,34	0,34	0,35	0,35	0,36	0,32	0,36	0,36	0,37	0,37	0,37	0,36
Danimarka	0,38	0,39	0,40	0,39	0,40	0,37	0,40	0,40	0,41	0,41	0,41	0,40
Fransa	0,33	0,33	0,33	0,33	0,34	0,32	0,34	0,34	0,34	0,35	0,35	0,34
Hollanda	0,37	0,38	0,38	0,38	0,39	0,37	0,39	0,39	0,40	0,40	0,40	0,40
İrlanda	0,32	0,31	0,33	0,32	0,33	0,31	0,34	0,34	0,34	0,34	0,35	0,34
İspanya	0,29	0,29	0,30	0,29	0,31	0,29	0,30	0,30	0,31	0,31	0,31	0,30
İsveç	0,37	0,37	0,39	0,38	0,38	0,36	0,38	0,39	0,40	0,39	0,40	0,39
İsviçre	0,40	0,40	0,41	0,41	0,41	0,39	0,42	0,42	0,43	0,42	0,43	0,42
İtalya	0,26	0,27	0,28	0,26	0,27	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,27
İzlanda	0,31	0,31	0,33	0,32	0,32	0,29	0,33	0,33	0,34	0,34	0,34	0,34
Kanada	0,36	0,36	0,37	0,37	0,37	0,35	0,37	0,37	0,38	0,38	0,38	0,38
Lüksemburg	0,33	0,32	0,35	0,33	0,34	0,31	0,35	0,35	0,35	0,35	0,36	0,36
Norveç	0,34	0,35	0,36	0,35	0,35	0,33	0,36	0,36	0,38	0,37	0,37	0,37
Portekiz	0,25	0,24	0,27	0,25	0,26	0,24	0,27	0,26	0,27	0,27	0,28	0,28
Türkiye	0,11	0,11	0,11	0,10	0,11	0,10	0,10	0,09	0,09	0,10	0,10	0,10
Yunanistan	0,24	0,23	0,25	0,22	0,25	0,23	0,24	0,24	0,23	0,24	0,24	0,24
Japonya	0,29	0,31	0,32	0,30	0,31	0,30	0,31	0,31	0,32	0,31	0,32	0,31
Finlandiya	0,38	0,39	0,40	0,39	0,39	0,38	0,40	0,40	0,40	0,40	0,41	0,40
Avustralya	0,35	0,35	0,36	0,36	0,36	0,33	0,37	0,37	0,38	0,37	0,38	0,37
Yeni Zelanda	0,30	0,30	0,32	0,31	0,33	0,28	0,32	0,32	0,33	0,33	0,33	0,33
Meksika	0,05	0,05	0,05	0,04	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05
Çekya	0,25	0,25	0,26	0,25	0,25	0,24	0,27	0,27	0,26	0,27	0,27	0,27
Macaristan	0,19	0,18	0,21	0,18	0,18	0,18	0,20	0,20	0,19	0,20	0,20	0,20
Polonya	0,23	0,24	0,25	0,23	0,22	0,22	0,23	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
Güney Kore	0,30	0,31	0,32	0,30	0,31	0,27	0,31	0,31	0,32	0,32	0,32	0,32
Slovakya	0,19	0,19	0,22	0,19	0,19	0,19	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21	0,21
Şili	0,16	0,15	0,18	0,16	0,16	0,16	0,17	0,18	0,19	0,18	0,19	0,18
Estonya	0,29	0,29	0,31	0,29	0,30	0,27	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
Slovenya	0,24	0,24	0,26	0,24	0,24	0,23	0,25	0,25	0,26	0,26	0,27	0,27
İsrail	0,28	0,29	0,31	0,28	0,29	0,26	0,30	0,30	0,30	0,30	0,31	0,30
Letonya	0,24	0,24	0,26	0,24	0,24	0,23	0,25	0,25	0,26	0,25	0,25	0,25
Litvanya	0,24	0,23	0,26	0,23	0,25	0,23	0,25	0,25	0,25	0,25	0,26	0,26
Kolombiya	0,06	0,05	0,06	0,07	0,07	0,06	0,07	0,06	0,06	0,06	0,07	0,06
Kosta Rika	0,10	0,08	0,11	0,10	0,11	0,12	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12

Adım 2.2.5 Mutlak sapmaların toplamı eşitlik (9) yardımıyla (E_j) hesaplanmıştır. Bu adımda kriterin kendisi üzerindeki çıkartılma etkisi ölçülür.

Tablo 30. Alt kriterler için mutlak sapmaların toplamı tablosu

Ülke	C1.1	C1.2	C1.3	C1.4	C1.5	C1.6	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4	C2.5	C2.6
A.B.D.	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,06	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02
Almanya	0,04	0,04	0,02	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,02
Avusturya	0,04	0,04	0,02	0,04	0,03	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Belçika	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
İngiltere	0,04	0,04	0,04	0,03	0,02	0,06	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02
Danimarka	0,05	0,04	0,03	0,04	0,03	0,05	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02
Fransa	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02
Hollanda	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,05	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02
İrlanda	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,05	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
İspanya	0,03	0,03	0,02	0,03	0,01	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
İsveç	0,04	0,04	0,02	0,03	0,03	0,05	0,03	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02
İsviçre	0,05	0,04	0,03	0,04	0,03	0,05	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,02
İtalya	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02
İzlanda	0,04	0,04	0,02	0,03	0,03	0,06	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
Kanada	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,05	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,02
Lüksemburg	0,04	0,05	0,02	0,04	0,03	0,05	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01
Norveç	0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,06	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01
Portekiz	0,03	0,04	0,02	0,03	0,02	0,04	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
Türkiye	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
Yunanistan	0,02	0,03	0,01	0,03	0,01	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02
Japonya	0,04	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,01	0,02	0,01	0,02
Finlandiya	0,05	0,04	0,02	0,04	0,03	0,05	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Avustralya	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,06	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02
Yeni Zelanda	0,04	0,04	0,02	0,03	0,01	0,06	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02
Meksika	0,00	0,01	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
Çekya	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Macaristan	0,02	0,03	0,00	0,03	0,03	0,03	0,01	0,01	0,02	0,00	0,01	0,01
Polonya	0,02	0,02	0,01	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02
Güney Kore	0,03	0,02	0,01	0,03	0,03	0,06	0,03	0,03	0,01	0,02	0,01	0,02
Slovakya	0,02	0,02	0,00	0,03	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Şili	0,03	0,03	0,01	0,03	0,02	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Estonya	0,03	0,04	0,01	0,03	0,02	0,05	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02
Slovenya	0,03	0,03	0,01	0,03	0,03	0,04	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00
İsrail	0,03	0,02	0,01	0,03	0,03	0,05	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01
Letonya	0,02	0,03	0,01	0,03	0,02	0,04	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
Litvanya	0,03	0,03	0,01	0,03	0,02	0,04	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00
Kolombiya	0,01	0,02	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
Kosta Rika	0,03	0,04	0,01	0,02	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Adım 2.2.6 eşitlik (10) yardımı ile kriterlerin önemlilik dereceleri hesaplanır. Bu bağlamda E_j ve w değerleri tablo 31’de verilmiştir.

Tablo 31. Alt kriterler için önemlilik dereceleri ve ağırlıklar

	C1.1	C1.2	C1.3	C1.4	C1.5	C1.6
w	0,18	0,18	0,10	0,16	0,13	0,22
E_j	1,23	1,21	0,69	1,13	0,91	1,52
	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4	C2.5	C2.6
w	0,21	0,19	0,15	0,16	0,11	0,16
E_j	0,72	0,68	0,51	0,56	0,38	0,55

Adım 2.2.7 Ana kriterlerin ağırlıkları ile ilgili alt kriterlerin ağırlıkları çarpılarak global ağırlıklar bulunur.

Tablo 32. Global ağırlıklar tablosu

	C1.1	C1.2	C1.3	C1.4	C1.5	C1.6
w_j^M	0,12	0,12	0,07	0,11	0,09	0,15
	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4	C2.5	C2.6
w_j^M	0,06	0,06	0,04	0,05	0,03	0,05

Adım 3 Entegre ağırlıkların hesaplanması için subjektif ağırlıkların ve objektif ağırlıklardan elde ettiğimiz ağırlıkların ağırlıklı ortalaması alınmaktadır. AHP

Tablo 34. Normalize edilmiş karar matrisi

Ülke	C1.1	C1.2	C1.3	C1.4	C1.5	C1.6	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4	C2.5	C2.6
A.B.D.	0,20	0,17	0,23	0,17	0,19	0,21	0,17	0,17	0,16	0,17	0,16	0,18
Almanya	0,18	0,18	0,17	0,18	0,19	0,15	0,18	0,19	0,18	0,18	0,17	0,18
Avusturya	0,18	0,18	0,16	0,18	0,19	0,14	0,17	0,17	0,18	0,17	0,18	0,18
Belçika	0,18	0,17	0,19	0,16	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,17
İngiltere	0,18	0,18	0,21	0,17	0,16	0,22	0,16	0,16	0,17	0,16	0,16	0,17
Danimarka	0,21	0,19	0,19	0,18	0,18	0,20	0,19	0,18	0,17	0,18	0,17	0,19
Fransa	0,17	0,16	0,19	0,17	0,16	0,16	0,17	0,17	0,18	0,16	0,17	0,17
Hollanda	0,20	0,19	0,21	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,17	0,18
İrlanda	0,16	0,19	0,19	0,17	0,16	0,18	0,16	0,15	0,17	0,16	0,16	0,16
İspanya	0,15	0,16	0,17	0,17	0,13	0,14	0,17	0,17	0,18	0,17	0,18	0,18
İsveç	0,20	0,18	0,18	0,18	0,18	0,20	0,19	0,18	0,16	0,18	0,18	0,18
İsviçre	0,21	0,20	0,20	0,19	0,19	0,20	0,19	0,19	0,17	0,19	0,18	0,18
İtalya	0,14	0,14	0,15	0,16	0,16	0,12	0,16	0,17	0,16	0,16	0,17	0,17
İzlanda	0,17	0,18	0,15	0,17	0,18	0,21	0,17	0,16	0,16	0,15	0,15	0,16
Kanada	0,18	0,18	0,19	0,16	0,17	0,18	0,19	0,19	0,17	0,18	0,17	0,18
Lüksemburg	0,18	0,22	0,15	0,18	0,17	0,20	0,17	0,16	0,17	0,17	0,15	0,15

Yöntemi ile elde edilen subjektif kriter ağırlıkları (w_j^A) ile MEREC yöntemiyle elde edilen objektif kriter ağırlıklarının (w_j^M) ağırlıklı ortalaması alınarak elde edilen birleştirilmiş kriter ağırlıkları w_j eşitlik 11 yardımıyla Tablo 33 ile gösterildiği gibi elde edilir.

Tablo 33. Birleştirilmiş kriter ağırlıkları

	C1.1	C1.2	C1.3	C1.4	C1.5	C1.6
w_j	0,15	0,11	0,15	0,09	0,08	0,13
	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4	C2.5	C2.6
w_j	0,06	0,05	0,03	0,04	0,02	0,03

Adım 4 AHP ve MEREC yöntemlerini kullanarak elde edilen birleştirilmiş ağırlıkların kullanıldığı TOPSİS yaklaşımıyla ülkeler için performans skorları hesaplanarak sıralamalar elde edilir.

Adım 4.1: TOPSİS yaklaşımının ilk aşamasında da Tablo 27 ile gösterilen karar matrisi oluşturulur.

Adım 4.2: Karar matrisi değerlerinin ölçülmesinde kullanılan birimlerin farklılıklarından kaynaklı etkileri ortadan kaldırmak için normalizasyon işlemleri eşitlik (13) yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

Tablo 34. Normalize edilmiş karar matrisi (devamı)

Ülke	C1.1	C1.2	C1.3	C1.4	C1.5	C1.6	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4	C2.5	C2.6
Norveç	0,19	0,18	0,18	0,18	0,19	0,20	0,18	0,17	0,14	0,16	0,17	0,16
Portekiz	0,14	0,18	0,15	0,16	0,14	0,15	0,15	0,16	0,15	0,16	0,15	0,14
Türkiye	0,09	0,09	0,12	0,11	0,11	0,09	0,14	0,15	0,16	0,15	0,15	0,15
Yunanistan	0,12	0,14	0,13	0,16	0,13	0,12	0,15	0,16	0,18	0,16	0,17	0,17
Japonya	0,18	0,14	0,15	0,16	0,15	0,13	0,18	0,18	0,16	0,18	0,17	0,17
Finlandiya	0,21	0,19	0,18	0,18	0,19	0,18	0,19	0,18	0,19	0,18	0,18	0,18
Avustralya	0,18	0,19	0,20	0,17	0,17	0,21	0,17	0,18	0,15	0,17	0,15	0,18
Yeni Zelanda	0,18	0,18	0,16	0,16	0,13	0,20	0,16	0,17	0,15	0,16	0,16	0,16
Meksika	0,09	0,10	0,13	0,12	0,11	0,08	0,12	0,12	0,13	0,13	0,15	0,13
Çekya	0,15	0,15	0,15	0,16	0,18	0,14	0,14	0,13	0,16	0,16	0,16	0,14
Macaristan	0,13	0,13	0,12	0,15	0,16	0,13	0,13	0,14	0,16	0,13	0,15	0,15
Polonya	0,13	0,12	0,13	0,14	0,17	0,12	0,16	0,15	0,16	0,16	0,17	0,16
Güney Kore	0,16	0,13	0,14	0,16	0,16	0,20	0,18	0,18	0,16	0,16	0,16	0,16
Slovakya	0,13	0,13	0,11	0,15	0,16	0,12	0,15	0,14	0,14	0,15	0,15	0,14
Şili	0,13	0,15	0,13	0,15	0,15	0,12	0,14	0,12	0,13	0,13	0,14	0,13
Estonya	0,16	0,16	0,14	0,17	0,16	0,19	0,15	0,15	0,16	0,16	0,17	0,16
Slovenya	0,14	0,15	0,14	0,16	0,17	0,14	0,16	0,16	0,16	0,14	0,14	0,13
İsrail	0,16	0,14	0,13	0,16	0,18	0,18	0,16	0,16	0,17	0,16	0,16	0,16
Letonya	0,13	0,14	0,13	0,15	0,16	0,14	0,15	0,14	0,15	0,16	0,17	0,16
Litvanya	0,15	0,15	0,13	0,16	0,15	0,14	0,15	0,15	0,16	0,16	0,15	0,13
Kolombiya	0,10	0,12	0,12	0,10	0,11	0,08	0,12	0,13	0,14	0,13	0,14	0,13
Kosta Rika	0,13	0,15	0,13	0,13	0,12	0,08	0,13	0,12	0,13	0,13	0,14	0,13

Adım 4.3: Elde edilen global ağırlıklar ve normalize karar matrisi kullanılarak Ağırlıklandırılmış normalize karar matrisi eşitlik (14) yardımıyla Tablo 40 ile gösterildiği gibi oluşturulmuştur.

Tablo 35. Ağırlıklandırılmış normalize karar matrisi tablosu

Ülke	C1.1	C1.2	C1.3	C1.4	C1.5	C1.6	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4	C2.5	C2.6
A.B.D.	0,03	0,02	0,04	0,02	0,02	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
Almanya	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
Avusturya	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Belçika	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
İngiltere	0,03	0,02	0,03	0,02	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
Danimarka	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
Fransa	0,03	0,02	0,03	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
Hollanda	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
İrlanda	0,03	0,02	0,03	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
İspanya	0,02	0,02	0,03	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Tablo 35. Ağırlıklandırılmış normalize karar matrisi tablosu (devamı)

Ülke	C1.1	C1.2	C1.3	C1.4	C1.5	C1.6	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4	C2.5	C2.6
İsveç	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
İsviçre	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
İtalya	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
İzlanda	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
Kanada	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
Lüksemburg	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
Norveç	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
Portekiz	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
Türkiye	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
Yunanistan	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
Japonya	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
Finlandiya	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Avustralya	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
Yeni Zelanda	0,03	0,02	0,03	0,02	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
Meksika	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
Çekya	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
Macaristan	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
Polonya	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
Güney Kore	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
Slovakya	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
Şili	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
Estonya	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
Slovenya	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
İsrail	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
Letonya	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
Litvanya	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
Kolombiya	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
Kosta Rika	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00

Adım 4.4: Her bir alternatifin sıralamasını belirlemek için İdeal (A*) ve negatif ideal (A-) çözümleri eşitlik (15) yardımıyla oluşturulmuştur. Tablo 36 da verilmiştir.

Adım 4.5: Ağırlıklı karar matrisi değerleriyle pozitif (S+) ve negatif (S-) ideal çözümler eşitlik (16) ile hesaplanmıştır ve tablo 37 ve tablo 38 ile gösterilmektedir.

Tablo 36. İdeal ve negatif ideal çözümler

	C1.1	C1.2	C1.3	C1.4	C1.5	C1.6
A*	0,03	0,02	0,03	0,01	0,01	0,02
A-	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01
	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4	C2.5	C2.6
A*	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
A-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0

Tablo 37. Pozitif ideal ayırım ölçümleri tablosu

	C1.1	C1.2	C1.3	C1.4	C1.5	C1.6	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4	C2.5	C2.6
S1*	3,27E-06	3,25E-05	0,00E+003,86E-06	0,00E+001,33E-06	1,36E-06	1,29E-06	1,74E-06	5,13E-07	3,64E-07	1,98E-08		
S2*	1,89E-05	2,37E-05	7,89E-05	4,93E-07	6,89E-07	8,18E-05	3,40E-07	5,17E-08	5,68E-07	3,21E-08	5,83E-08	1,98E-08
S3*	2,37E-05	2,44E-05	1,08E-04	2,59E-07	4,77E-07	9,10E-05	1,36E-06	1,29E-06	3,20E-07	2,89E-07	0,00E+001,98E-08	
S4*	2,80E-05	2,49E-05	4,60E-05	5,63E-06	3,31E-06	4,11E-05	3,40E-07	4,66E-07	3,20E-07	3,21E-08	1,46E-08	1,78E-07
S5*	2,11E-05	1,92E-05	8,35E-06	1,79E-06	9,66E-06	0,00E+003,06E-06	2,53E-06	1,28E-06	1,15E-06	5,24E-07	1,78E-07	
S6*	5,19E-07	1,20E-05	3,46E-05	4,49E-08	8,79E-07	4,55E-06	0,00E+004,66E-07	8,88E-07	1,28E-07	5,83E-08	0,00E+00	
S7*	4,66E-05	4,46E-05	3,36E-05	4,63E-06	7,79E-06	5,30E-05	1,36E-06	1,86E-06	5,68E-07	8,02E-07	5,83E-08	1,78E-07
S8*	3,59E-06	1,29E-05	1,18E-05	1,14E-06	2,83E-06	2,01E-05	3,40E-07	2,07E-07	5,68E-07	3,21E-08	1,31E-07	1,98E-08
S9*	5,13E-05	8,91E-06	4,08E-05	2,68E-06	7,22E-06	1,94E-05	4,17E-06	4,19E-06	8,88E-07	1,57E-06	5,24E-07	7,11E-07
S10*	9,41E-05	5,01E-05	8,91E-05	4,35E-06	3,62E-05	1,13E-04	2,13E-06	1,86E-06	5,68E-07	5,13E-07	1,46E-08	7,90E-08
S11*	3,85E-06	1,81E-05	7,38E-05	5,91E-07	1,95E-06	2,39E-06	8,51E-08	2,07E-07	1,74E-06	3,21E-08	1,46E-08	7,90E-08
S12*	0,00E+005,80E-06	1,64E-05	0,00E+006,78E-09	5,58E-06	0,00E+000,00E+008,88E-07	0,00E+001,46E-08	1,98E-08					
S13*	1,08E-04	7,79E-05	1,62E-04	9,21E-06	9,73E-06	1,69E-04	4,17E-06	1,86E-06	1,74E-06	8,02E-07	2,33E-07	3,16E-07
S14*	4,29E-05	2,44E-05	1,53E-04	2,29E-06	2,53E-06	8,15E-07	1,36E-06	3,31E-06	2,27E-06	2,05E-06	7,14E-07	7,11E-07
S15*	2,43E-05	1,65E-05	3,64E-05	7,39E-06	3,98E-06	2,94E-05	8,51E-08	5,17E-08	8,88E-07	3,21E-08	5,83E-08	7,90E-08
S16*	2,15E-05	0,00E+001,52E-04	6,23E-07	4,33E-06	7,59E-06	2,13E-06	3,31E-06	8,88E-07	5,13E-07	9,32E-07	1,26E-06	
S17*	1,14E-05	2,11E-05	6,65E-05	6,88E-08	7,08E-07	2,87E-06	7,66E-07	1,29E-06	4,30E-06	8,02E-07	4,86E-07	5,33E-07
S18*	2,45E-05	0,00E+002,33E-05	6,88E-08	6,77E-07	1,14E-06	2,13E-06	3,31E-06	8,88E-07	1,15E-06	1,46E-08	2,53E-07	
S19*	1,92E-05	1,05E-05	3,10E-05	6,23E-07	6,77E-07	6,30E-05	2,13E-06	2,59E-06	1,74E-06	1,15E-06	4,86E-07	1,98E-08
S20*	7,11E-05	3,79E-05	2,65E-04	6,88E-08	2,53E-06	1,04E-04	8,51E-08	3,31E-06	1,74E-06	5,13E-07	7,14E-07	1,26E-06
S21*	1,36E-05	1,56E-05	1,65E-04	2,29E-06	4,33E-06	7,59E-06	2,13E-06	2,07E-07	1,74E-06	5,13E-07	9,32E-07	1,26E-06
S22*	2,15E-05	1,62E-05	1,41E-05	1,14E-06	1,57E-06	2,74E-05	1,36E-06	2,07E-07	8,88E-07	8,02E-07	5,24E-07	7,11E-07
S23*	3,85E-05	1,62E-05	7,38E-05	2,14E-06	1,95E-06	1,39E-05	3,06E-06	4,66E-07	1,74E-06	3,21E-08	1,46E-08	7,90E-08
S24*	0,00E+004,66E-06	1,64E-05	2,14E-06	6,78E-09	5,58E-06	0,00E+002,07E-07	1,28E-07	3,21E-08	5,83E-08	1,98E-08		
S25*	1,08E-04	2,07E-05	1,62E-04	4,29E-06	3,95E-06	1,69E-04	3,06E-06	1,29E-06	3,20E-07	2,89E-07	0,00E+001,98E-08	
S26*	2,80E-05	2,49E-05	4,60E-05	1,79E-06	2,53E-06	4,11E-05	3,40E-07	4,66E-07	3,20E-07	3,21E-08	1,46E-08	1,78E-07
S27*	2,11E-05	1,92E-05	8,35E-06	1,14E-06	9,66E-06	0,00E+002,13E-06	2,07E-07	8,88E-07	8,02E-07	5,24E-07	7,11E-07	
S28*	3,27E-06	3,25E-05	0,00E+001,14E-06	0,00E+001,33E-06	1,36E-06	2,07E-07	8,88E-07	5,13E-07	3,64E-07	7,11E-07		
S29*	1,89E-05	2,37E-05	7,89E-05	4,93E-07	6,89E-07	8,18E-05	3,40E-07	2,07E-07	1,28E-07	3,21E-08	5,83E-08	1,98E-08
S30*	2,37E-05	2,44E-05	1,08E-04	2,14E-06	4,77E-07	9,10E-05	1,36E-06	4,66E-07	3,20E-07	2,89E-07	0,00E+001,98E-08	
S31*	2,80E-05	2,49E-05	4,60E-05	5,63E-06	3,31E-06	4,11E-05	3,40E-07	4,66E-07	3,20E-07	3,21E-08	1,46E-08	1,78E-07
S32*	2,11E-05	1,92E-05	8,35E-06	1,14E-06	9,66E-06	0,00E+003,06E-06	2,07E-07	1,28E-07	1,15E-06	5,24E-07	1,78E-07	
S33*	5,19E-07	1,20E-05	3,46E-05	4,49E-08	8,79E-07	4,55E-06	0,00E+004,66E-07	3,20E-07	1,28E-07	5,83E-08	0,00E+00	
S34*	4,66E-05	4,46E-05	3,36E-05	4,63E-06	7,79E-06	5,30E-05	1,36E-06	1,86E-06	5,68E-07	8,02E-07	5,83E-08	1,78E-07
S35*	3,59E-06	1,29E-05	1,18E-05	1,14E-06	2,83E-06	2,01E-05	3,40E-07	2,07E-07	5,68E-07	3,21E-08	1,31E-07	1,98E-08
S36*	5,13E-05	8,91E-06	4,08E-05	2,68E-06	7,22E-06	1,94E-05	4,17E-06	4,19E-06	8,88E-07	1,57E-06	5,24E-07	7,11E-07
S37*	9,41E-05	5,01E-05	8,91E-05	4,35E-06	3,62E-05	1,13E-04	2,13E-06	1,86E-06	5,68E-07	5,13E-07	1,46E-08	7,11E-07
S38*	1,91E-05	3,44E-05	7,67E-05	1,53E-06	2,25E-06	3,22E-05	1,36E-06	1,03E-06	3,20E-07	2,89E-07	0,00E+001,98E-08	

Tablo 38. Negatif ideal ayırım ölçümleri tablosu

	C1.1	C1.2	C1.3	C1.4	C1.5	C1.6	C2.1	C2.2	C2.3	C2.4	C2.5	C2.6
<i>S1</i>	2,82E-04	6,97E-05	3,25E-04	4,77E-05	6,18E-05	2,97E-04	1,22E-05	7,45E-06	1,74E-06	3,21E-06	5,24E-07	3,34E-06
<i>S2</i>	2,04E-04	8,44E-05	8,36E-05	6,68E-05	4,94E-05	8,71E-05	1,67E-05	1,32E-05	3,55E-06	5,42E-06	1,18E-06	3,34E-06
<i>S3</i>	1,89E-04	8,30E-05	5,79E-05	7,00E-05	5,14E-05	7,81E-05	1,22E-05	7,45E-06	4,30E-06	3,88E-06	1,76E-06	3,34E-06
<i>S4</i>	1,77E-04	8,22E-05	1,26E-04	4,22E-05	3,65E-05	1,43E-04	1,67E-05	1,01E-05	4,30E-06	5,42E-06	1,46E-06	2,39E-06
<i>S5</i>	1,97E-04	9,36E-05	2,29E-04	5,68E-05	2,26E-05	3,38E-04	8,51E-06	5,17E-06	2,27E-06	2,05E-06	3,64E-07	2,39E-06
<i>S6</i>	3,20E-04	1,12E-04	1,47E-04	7,50E-05	4,79E-05	2,64E-04	2,18E-05	1,01E-05	2,88E-06	4,62E-06	1,18E-06	3,87E-06
<i>S7</i>	1,39E-04	5,43E-05	1,50E-04	4,52E-05	2,57E-05	1,23E-04	1,22E-05	6,26E-06	3,55E-06	2,60E-06	1,18E-06	2,39E-06
<i>S8</i>	2,80E-04	1,10E-04	2,13E-04	6,09E-05	3,82E-05	1,93E-04	1,67E-05	1,16E-05	3,55E-06	5,42E-06	9,32E-07	3,34E-06
<i>S9</i>	1,31E-04	1,23E-04	1,35E-04	5,24E-05	2,68E-05	1,95E-04	6,89E-06	3,31E-06	2,88E-06	1,57E-06	3,64E-07	1,26E-06
<i>S10</i>	7,95E-05	4,87E-05	7,37E-05	4,61E-05	3,41E-06	6,02E-05	1,03E-05	6,26E-06	3,55E-06	3,21E-06	1,46E-06	2,84E-06
<i>S11</i>	2,77E-04	9,61E-05	8,90E-05	6,57E-05	4,18E-05	2,83E-04	1,91E-05	1,16E-05	1,74E-06	5,42E-06	1,46E-06	2,84E-06
<i>S12</i>	3,47E-04	1,36E-04	1,95E-04	7,87E-05	6,05E-05	2,56E-04	2,18E-05	1,50E-05	2,88E-06	6,28E-06	1,46E-06	3,34E-06
<i>S13</i>	6,77E-05	2,73E-05	2,81E-05	3,41E-05	2,25E-05	2,91E-05	6,89E-06	6,26E-06	1,74E-06	2,60E-06	7,14E-07	1,98E-06
<i>S14</i>	1,46E-04	8,30E-05	3,19E-05	5,42E-05	3,93E-05	3,05E-04	1,22E-05	4,19E-06	1,28E-06	1,15E-06	2,33E-07	1,26E-06
<i>S15</i>	1,87E-04	9,99E-05	1,44E-04	3,79E-05	3,44E-05	1,68E-04	1,91E-05	1,32E-05	2,88E-06	5,42E-06	1,18E-06	2,84E-06
<i>S16</i>	1,95E-04	1,97E-04	3,26E-05	6,53E-05	3,34E-05	2,44E-04	1,03E-05	4,19E-06	2,88E-06	3,21E-06	1,31E-07	7,11E-07
<i>S17</i>	2,32E-04	8,96E-05	9,74E-05	7,41E-05	4,93E-05	2,78E-04	1,44E-05	7,45E-06	3,20E-07	2,60E-06	9,32E-07	1,26E-06
<i>S18</i>	6,60E-05	8,38E-05	2,79E-05	4,37E-05	1,12E-05	8,62E-05	4,17E-06	4,19E-06	5,68E-07	1,57E-06	2,33E-07	1,78E-07
<i>S19</i>	0,00E+000	0,00E+003	5,9E-08	1,01E-06	0,00E+002	5,8E-06	2,13E-06	2,53E-06	1,74E-06	1,15E-06	2,33E-07	7,11E-07
<i>S20</i>	1,75E-05	2,40E-05	7,02E-06	3,48E-05	2,80E-06	2,68E-05	4,17E-06	5,17E-06	4,30E-06	2,60E-06	7,14E-07	1,98E-06
<i>S21</i>	2,07E-04	2,51E-05	3,51E-05	4,30E-05	1,63E-05	5,01E-05	1,67E-05	1,16E-05	1,28E-06	4,62E-06	9,32E-07	2,39E-06
<i>S22</i>	3,18E-04	1,06E-04	8,99E-05	7,36E-05	5,32E-05	1,77E-04	1,91E-05	1,16E-05	6,96E-06	5,42E-06	1,76E-06	3,34E-06
<i>S23</i>	1,88E-04	1,12E-04	1,90E-04	5,12E-05	3,23E-05	3,29E-04	1,22E-05	1,01E-05	5,68E-07	3,21E-06	2,33E-07	2,84E-06
<i>S24</i>	1,85E-04	9,24E-05	2,41E-04	5,12E-05	1,51E-05	1,70E-04	1,22E-05	7,45E-06	3,20E-07	1,15E-06	2,33E-07	7,11E-07
<i>S25</i>	3,21E-04	1,36E-04	1,24E-04	8,30E-05	6,72E-05	1,57E-04	1,91E-05	1,16E-05	1,28E-06	5,42E-06	7,14E-07	1,26E-06
<i>S26</i>	5,63E-05	2,21E-05	3,64E-05	4,29E-05	2,91E-05	7,89E-05	8,51E-06	7,45E-06	1,28E-06	1,57E-06	2,33E-07	1,26E-06
<i>S27</i>	1,83E-04	8,97E-05	5,19E-05	3,68E-05	2,39E-05	1,23E-04	1,22E-05	6,26E-06	1,28E-06	2,60E-06	2,33E-07	1,26E-06
<i>S28</i>	1,36E-04	5,75E-05	3,15E-05	3,82E-05	3,47E-05	4,97E-05	8,51E-06	4,19E-06	3,55E-06	2,60E-06	9,32E-07	1,26E-06
<i>S29</i>	2,19E-04	6,28E-05	3,25E-05	6,30E-05	3,45E-05	7,65E-05	8,51E-06	4,19E-06	3,55E-06	1,15E-06	1,18E-06	2,84E-06
<i>S30</i>	5,10E-05	1,69E-05	3,51E-05	1,44E-05	1,12E-05	7,30E-05	4,17E-06	6,26E-06	3,55E-06	1,57E-06	2,33E-07	1,26E-06
<i>S31</i>	4,47E-05	3,01E-05	1,50E-05	2,88E-05	1,57E-05	4,97E-05	2,13E-06	6,26E-06	1,28E-06	3,21E-06	2,33E-07	1,98E-06
<i>S32</i>	1,22E-04	6,84E-05	2,28E-05	4,72E-05	2,25E-05	8,17E-05	8,51E-06	5,17E-06	2,88E-06	2,60E-06	3,64E-07	1,26E-06
<i>S33</i>	2,10E-04	9,45E-05	1,92E-04	6,32E-05	4,12E-05	1,91E-04	1,22E-05	6,26E-06	2,88E-06	3,21E-06	1,18E-06	2,84E-06
<i>S34</i>	1,67E-04	7,89E-05	1,74E-04	5,68E-05	3,25E-05	1,52E-04	1,22E-05	5,17E-06	3,55E-06	2,60E-06	7,14E-07	1,26E-06
<i>S35</i>	1,94E-04	9,12E-05	1,89E-04	6,25E-05	4,02E-05	1,88E-04	1,22E-05	7,45E-06	2,88E-06	2,60E-06	9,32E-07	2,84E-06
<i>S36</i>	2,02E-04	9,45E-05	1,92E-04	6,32E-05	4,12E-05	1,91E-04	1,22E-05	6,26E-06	2,88E-06	3,21E-06	1,18E-06	2,84E-06
<i>S37</i>	1,89E-04	8,30E-05	1,74E-04	5,68E-05	3,25E-05	1,52E-04	1,22E-05	5,17E-06	3,55E-06	2,60E-06	7,14E-07	1,26E-06
<i>S38</i>	2,01E-04	9,12E-05	1,89E-04	6,25E-05	4,02E-05	1,88E-04	1,22E-05	7,45E-06	2,88E-06	2,60E-06	9,32E-07	2,84E-06

Adım 4.6: İdeal çözümlere uzaklıklar ve buna göre yine her bir alternatif için hesaplanan skorlar ve skorlara

göre olan sıralamalar Tablo 39 ile gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

Tablo 39. Göreli yakınlıklar ve ülkelerin sıralamaları

Ülke	S_i^*	S_i^-	C_i^*	Sıra	GTCI Sıra	LPI Sıra
A.B.D.	0,006801	0,033345	0,83059	2	3	17
Almanya	0,014336	0,024867	0,634303	15	14	3
Avusturya	0,015863	0,023714	0,599181	18	17	7
Belçika	0,012259	0,025464	0,675033	12	16	7
İngiltere	0,008291	0,030941	0,788665	5	10	19
Danimarka	0,007357	0,031798	0,812101	3	4	3
Fransa	0,013966	0,023775	0,629946	16	19	13
Hollanda	0,007324	0,030588	0,806826	4	5	3
İrlanda	0,011932	0,026072	0,686036	11	12	26
İspanya	0,019794	0,018415	0,481963	23	29	13
İsveç	0,010139	0,029924	0,746931	7	9	7
İsviçre	0,005354	0,033527	0,862294	1	1	3
İtalya	0,023332	0,015131	0,393388	28	32	19
İzlanda	0,015382	0,02607	0,628919	17	15	26
Kanada	0,010914	0,026757	0,71027	10	13	7
Lüksemburg	0,013955	0,0281	0,668167	13	11	26
Norveç	0,010515	0,029123	0,734722	8	7	19
Portekiz	0,020571	0,018155	0,468805	24	27	38
Türkiye	0,035894	0,003482	0,088429	37	81	38
Yunanistan	0,027589	0,011479	0,293819	34	39	19
Japonya	0,019924	0,020357	0,505384	21	26	13
Finlandiya	0,010687	0,029431	0,733609	9	6	2
Avustralya	0,008268	0,030534	0,786926	6	8	19
Yeni Zelanda	0,014269	0,025909	0,644854	14	18	26
Meksika	0,035256	0,003202	0,083271	38	74	66
Çekya	0,021131	0,017886	0,458414	25	23	43
Macaristan	0,028	0,011933	0,298832	32	38	51
Polonya	0,026679	0,012295	0,315467	31	37	26
Güney Kore	0,019776	0,022496	0,532178	20	24	17
Slovakya	0,028316	0,011979	0,297284	33	36	43
Şili	0,026276	0,012478	0,321968	30	34	61
Estonya	0,018692	0,021768	0,538008	19	20	26
Slovenya	0,022114	0,016789	0,43156	26	28	43
İsrail	0,021382	0,020726	0,492204	22	25	26

Tablo 39. Göreli yakınlıklar ve ülkelerin sıralamaları (devamı)

Ülke	S_i^*	S_i^-	C_i^*	Sıra	GTCI Sıra	LPI Sıra
Letonya	0,024739	0,01425	0,365486	29	31	34
Litvanya	0,023008	0,016099	0,411659	27	33	38
Kolombiya	0,034374	0,003814	0,099876	36	72	66
Kosta Rika	0,030141	0,010051	0,250077	35	47	66

Adım 4.7 Alternatiflerin önem sıralaması yapılmıştır. Alternatiflerin önem sıralaması C_i^* skoru en yüksek olan en iyi performansa sahip olacak şekilde yapılmıştır.

Buna göre GTCI ve LPI endekslerinin alt kriterleri ile OECD ülkelerinin bütüncül bir şekilde değerlendirilmesi sonucunda en iyi performansa sahip olan ülke İsviçre olarak gözlemlenmiştir. En düşük performansa sahip ülke Meksika iken Türkiye Meksika'dan sonra en düşük performansa sahip ülke olarak bulunmuştur.

V. SONUÇ

Bu çalışmada, OECD ülkelerinin lojistik performansları ve küresel yetenek rekabet gücü, entegre bir MEREC-AHP-TOPSIS yaklaşımı kullanılarak analiz edilmiştir. Bu yenilikçi metodoloji hem sübjektif hem de objektif kriter ağırlıklarını dikkate alarak ülkelerin performansını daha dengeli ve kapsamlı bir şekilde değerlendirmeyi mümkün kılmıştır. Analiz sonucunda İsviçre, Amerika Birleşik Devletleri ve Danimarka, sırasıyla en yüksek performans gösteren ülkeler olarak belirlenmiştir.

Önerilen entegre metodolojide alternatiflerin sıralanmasında hesaplanan kriter ağırlıklarının etkisi büyüktür. Özellikle ana kriter ağırlıkları hesaplandığında gerek uzman görüşleri olsun gerekse de veri setindeki bilgiden faydalanarak kriter ağırlığı hesaplayan objektif ağırlık hesaplama yaklaşımından elde edilen ağırlıklar olsun GTCI'nın LPI'ya göre çok daha fazla önemli olduğunu göstermektedir. Türkiye'nin sıralamadaki yerinin nedeni hesaplanan ağırlıklarda GTCI'nın baskın olmasından kaynaklıdır. Benzer şekilde Tablo 39 göstermektedir ki önerilen entegre metodolojiden elde edilen sıralamalar GTCI endeksi sıralamalarına LPI'ya göre daha yakın sıralamalardır. Sıralamalar arasında hesaplanan korelasyon değerlerine göre önerilen metodoloji ile elde edilen sıralamalar ve GTCI sıralamaları arasında 0,89'lük yüksek korelasyon; LPI ile hesaplanan sıralamalar ile de 0,76'lık orta-yüksek korelasyon bulunmaktadır. Bu değerler önerilen metodolojinin tutarlı sonuçlar verdiğini destekler niteliktedir. Elde edilen sıralamaların endeks sıralamalarına göre düşük seviye olarak nitelendirilebilecek farklılığı ise karar matrisinde yer alan ülke sayısından kaynaklanmaktadır. Bu çalışma kapsamında kullanılan veri setinde 38 ülkenin göreli performanslarıyla sıralamalar

hesaplanmıştır. Gelecek çalışmalarda tüm ülkelerin yer aldığı karar matrisi kullanılarak bu çalışma tekrarlanıp elde edilen bulgular kıyaslanabilir.

Türkiye son yıllarda tüm taşıma modları için altyapı yatırımlarına ciddi finansal kaynak ayırımı yapmaktadır. İstanbul Havalimanı bünyesinde akıllı lojistik kapsamında altyapılar barındıran mega projelerin yanı sıra karayolu taşıt trafiği için köprü ve otoyol yatırımında ciddi kaynak kullanımı gerçekleştirmiştir. Bu iki taşıma modunun yanı sıra demiryolu yatırımları da son yıllarda hızlanmış ve özellikle içinde bulunduğumuz dönemlerde demiryollarının modernizasyonu ve yeni projeler için çalışmaların hızlandığı görülmektedir. Ayrıca uygun lokasyonlarda lojistik merkezi ve lojistik köyü gibi birçok farklı projenin de hayata geçmesi için yoğun çalışmalar devam etmektedir. Tüm bu politikalar bu çalışma kapsamında elde edilen bulguyu destekler niteliktedir.

Gelecek çalışmalarda kullanılan veri setinin yeni döneme ait değerleriyle bu çalışma tekrar edilip bulguları kıyaslanabilir. Dahası, bu çalışma kapsamında önerilen entegre metodolojide kullanılan ÇKKV yaklaşımları yerine farklı ÇKKV yaklaşımları kullanılarak da bu çalışmanın sonuçları karşılaştırılabilir. Dahası, ÇKKV yaklaşımlarıyla gerçekleştirilen performans değerlendirmeleri kullanılan veri setinde yer alan alternatifleri birbirlerine göre sıralamaktadır ve bu sebeple aynı alternatif farklı alternatiflerin yeri aldığı veri setinde farklı sıralamalarda yer alabilmektedir. Gelecek çalışmalar bu çalışmayı farklı ülkelerin yer aldığı veri setleriyle tekrarlayıp sonuçlarını karşılaştırabilirler.

Çalışmanın sınırlılıklarını aşağıda yer alan maddeler halinde özetlemek mümkündür:

- Çalışmada 38 OECD ülkesinin verisi kullanılmıştır, gelecek çalışmalarda ülke sayısı artırılarak bu çalışma tekrarlanabilir.
- Oluşturulan karar matrisinde yer alan veriler 2023 yılına aittir, zaman boyutu artırılarak yıllara göre değişim gelecek çalışmalarda gözlemlenebilir.

- Bu çalışmada AHP, MEREC ve TOPSİS yöntemleri kullanılmıştır. Farklı ÇKKV yaklaşımlarının kullanıldığı çalışmalardan elde edilen bulgular bu çalışmanın sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak analiz edilebilir.
- Son olarak bu çalışmada kullanılan GTCI ve LPI endekslerine ek olarak farklı endeksler karar matrisine eklenip çalışma geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Altıntaş, F. F. (2022). G20 Ülkelerinin yetenek rekabetçiliği performanslarının analizi: Critic tabanlı cocoso yöntemi ile bir uygulama. *Academic Review of Humanities and Social Sciences*, 5(1), 1-23.
- [2] Leikuma-Rimicane, L., Komarova, V., Lonska, J., Selivanova-Fyodorova, N., & Ostrovska, I. (2021). The role of talent in the economic development of countries in the modern world. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, 9(2), 488.
- [3] Steigertahl, L., & Mauer, R. (2023). Investigating the success factors of the nordic entrepreneurial ecosystem—talent transformation as a key process. *The International Journal of Entrepreneurship and Innovation*, 24(1), 7-18.
- [4] Huang, Y., Li, K., & Li, P. (2023). Innovation ecosystems and national talent competitiveness: A country-based comparison using fsQCA. *Technological Forecasting and Social Change*, 194, 122733.
- [5] Serban, A., & Andanut, M. (2014). Talent competitiveness and competitiveness through talent. *Procedia Economics and Finance*, 16, 506-511.
- [6] Oliinyk, O., Bilan, Y., Mishchuk, H., Akimov, O., & Vasa, L. (2021). The impact of migration of highly skilled workers on the country's competitiveness and economic growth. *Montenegrin Journal of Economics*.
- [7] Xu, X., Arshad, M. A., & Mahmood, A. (2021). Talent competitiveness evaluation of the chongqing intelligent industry based on using the entropy TOPSİS method. *Information*, 12(8), 288.
- [8] Kale, M. V., & Tilki, İ. (2024). Dünya ülkelerinin lojistik performanslarının çok kriterli karar verme yöntemi ile değerlendirilmesi: 2023 Yılı dünya bankası raporu ile karşılaştırmalı analizi. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, (80), 13-30.
- [9] Akbulut, E. A., Ulutaş, A., Yürüyen, A. A., & Balalan, S. (2024). Hibrit bir ÇKKV modeli ile G20 ülkelerinin lojistik performansının ölçülmesi. *Business & Management Studies: An International Journal*, 12(1), 1-21.
- [10] Alnıpak, S. (2024). AHS-COCOSO yöntemi ile apec ülkelerinin lojistik performanslarının değerlendirilmesi. *Tarsus Üniversitesi Uygulamalı Bilimler Fakültesi Dergisi*, 4(1), 13-26.
- [11] Mercan, Y., & Aydın, H. (2024). Logistics performance index of Africa: An indicator for Türkiye and Africa trade relations?. *Süleyman Demirel Üniversitesi Vizyoner Dergisi*, 15(42), 553-569.
- [12] Arman, K., & Organ, A. (2023). AB'ye üye ve aday ülkelerin lojistik performanslarının mercec ve cocoso yöntemleri ile değerlendirilmesi. *Uluslararası Ticaret ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi*, 7(2), 36-46.
- [13] Haseki, M. İ., & Avşar, İ. İ. (2023). Turizm ve lojistik odaklı verilere göre Türkiye ve Avrupa Birliği ülkelerinin çok kriterli karar verme yöntemiyle sıralaması ve k-ortalamlar algoritmasıyla kümelemesi. *Turizm Ekonomi ve İşletme Araştırmaları Dergisi*, 5(1), 75-88.
- [14] Ecemiş, O., & Avşar, İ. İ. (2023). Türkiye'nin önde gelen ticaret ortaklarının lojistik verimliliklerinin çok kriterli karar verme yöntemiyle değerlendirilmesi. *Kastamonu Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 25(1), 142-163.
- [15] Pala, O. (2023). MEREC-CORR ve SAW temelli lojistik performans değerlendirme. *Dicle Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 13(25), 117-135.
- [16] Koyubenbe, N., & Özden, A. (2011). Süt sığırcılığı işletmelerinde parametrik etkinlik ölçümü: İzmir ili örneği. *Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 8 (2), 23-27.
- [17] Tutulmaz, O., & Şahin, H. (2014). Türk havayolu ulaştırmasının açılım dönemine yönelik teknik etkinlik analizi: Bir stokastik sınır yöntemi uygulaması. *Çukurova Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 18 (2), 49-73.
- [18] Bilik, M., Aydın, Ü., & Kahyaoğlu, H. (2016). Türkiye gıda sanayinde kısa ve uzun dönemli etkinlik: Stokastik sınır analizi. *Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 6 (2), 67-84.
- [19] Öztürk, Z., & Yıldız, M. (2016). Hastane etkinliklerinin tahmininde stokastik sınır analizi; Tarihi ve amprik uygulamaları. *Uluslararası Sağlık Yönetimi ve Stratejileri Araştırma Dergisi*, 1 (3), 1-12.
- [20] Ekinci, R. (2020). Teknik etkinliğin ölçümünde mekânsal bağımlılığın etkisi: İmalat sanayi için mekânsal stokastik sınır analizi bulguları. *Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 22 (3), 995-1021.
- [21] Nguyen, N. A. T., Wang, C. N., Dang, L. T. H., Dang, L. T. T., & Dang, T. T. (2022). Selection of cold chain logistics service providers based on a grey AHP and grey COPRAS framework: a case study in [21] Aydın, U., & Kaya, G. (2021). Havayollarının pazarlama ve finansal etkinliklerinin stokastik sınır analizi yöntemi ile incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (42), 304-315.

- [22] Koca, M., & Demir Uslu, Y. (2022). Sağlıkta verimlilik karne uygulamaları, hastanelerin etkinliğinin retrospektif olarak stokastik sınır yaklaşımı ile değerlendirilmesi: AI rol grubu hastaneler örneği. *Türkiye Klinikleri Sağlık Bilimleri Dergisi*.
- [23] Peker, İ., & Birdoğan, B. (2009). Veri zarflama analizi ile Türkiye havalimanlarında bir etkinlik ölçümü uygulaması. *Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 18 (2), 72-88.
- [24] Karakaya, A., Kurtaran, A., & Dağlı, H. (2014). Bireysel emeklilik şirketlerinin veri zarflama analizi ile etkinlik ölçümü: Türkiye örneği. *Journal of Management and Economics Research*, 12 (22), 1-23.
- [25] Akyüz, K. C., Çamur, G., & Yıldırım, İ. (2015). Mobilya ve levha sektöründe veri zarflama analizi yardımıyla etkinlik ölçümü. *Turkish Journal of Forestry*, 16 (1), 50-59.
- [26] Asker, V. (2021). Havayolu işletmelerinde iki aşamalı veri zarflama analizi ile etkinlik ölçümü. *MANAS Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 10 (4), 2373-2385.
- [27] Perçin, S., & Çakır, S. (2012). Demiryollarında süper etkinlik ölçümü: Türkiye örneği. *Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 27 (1), 29-45.
- [28] Doğan, N. (2015). VZA süper etkinlik modelleri ile etkinlik ölçümü: Kapadokya'da faaliyet gösteren balon işletmeleri üzerine bir uygulama. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 29 (1)
- [29] Keskin, H. İ. (2018). Türkiye'de aile sağlığı merkezlerinin teknik etkinliğinin araştırılması: Veri zarflama ve süper etkinlik yaklaşımı. *Gazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 5 (13), 173-185.
- [30] Bakirci, F., Shiraz, S. E., & Sattary, A. (2014). BIST'da demir, çelik metal ana sanayii sektöründe faaliyet gösteren işletmelerin finansal performans analizi: VZA süper etkinlik ve TOPSİS uygulaması. *Ege Akademik Bakis*, 14 (1), 9.
- [31] Doğan, N. Ö., & Gencan, S. (2014). VZA/AHP bütünleşik yöntemi ile performans ölçümü: Ankara'daki kamu hastaneleri üzerine bir uygulama. *Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 16 (2), 88-112.
- [32] Çağlar, A., & Öztaş, G. Z. (2016). Veri zarflama analizi ve analitik hiyerarşi süreci ile sigorta şirketlerinin finansal oran analizi. *Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 6 (2), 221-248.
- [33] Asker, V., Kiracı, K., & Yaşar, M. (2018). Entropi temelli TOPSİS ve veri zarflama analizi yöntemleriyle etkinlik ölçümü: Türkiye'deki büyük havalimanları üzerine bir uygulama. *VII. Ulusal III. Uluslararası Doğu Akdeniz Turizm Sempozyumu*, Hatay, Türkiye.
- [34] Macit, N. Ş. (2023). Tedarikçi seçimi probleminin AHP temelli MAIRCA yöntemi ile çözümü. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (37), 42-63.
- [35] Lestari, A. D., Pertiwi, D. A. A., Hidayah, S. R., Dianti, E. N., & Khoirunnisa, O. G. (2023). Logistic service quality in improving the quality of logistics services for companies using the analytical hierarchy process (AHP) method. *Indonesian Community on Optimization and Computer Application*, 1(1), 9-16.
- [36] Kocakaya, K., Engin, T., Tektaş, M., & Aydın, U. (2021). Türkiye'de bölgesel havayolları için uçak tipi seçimi: Küresel bulanık AHP-TOPSİS yöntemlerinin entegrasyonu. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 4(1), 27-58. Vietnam. *Axioms*, 11(4), 154.
- [37] Arıkan, Ö. U., & Öztürk, E. (2022). Belediyelerin otobüs sürücülerinin istihdam kriterlerinin AHP ve SWARA yöntemleri ile belirlenmesi: Mersin örneği. *Süleyman Demirel Üniversitesi Vizyoner Dergisi*, 13(36), 1186-1207.
- [38] Menon, R. R., & Ravi, V. (2022). Using AHP-TOPSİS methodologies in the selection of sustainable suppliers in an electronics supply chain. *Cleaner Materials*, 5, 100130.
- [39] Baroto, T., Utama, D. M., & Ibrahim, M. F. (2022, July). Green supplier selection and order allocation using AHP-SAW and goal programming. *In AIP Conference Proceedings* (Vol. 2453, No. 1). AIP Publishing.
- [40] Erdoğan, B. (2022). BİST'E kayıtlı bankaların finansal performansının AHP-SD tabanlı PIV yöntemiyle değerlendirilmesi. *Pamukkale Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (52), 93-109.
- [41] Özekenci, E. K. (2023). Identifying the key success factors of E-logistics in Turkey: AHP-VIKOR integrated methodology/Türkiye'de E-lojistiğin kilit başarı faktörlerinin belirlenmesi: AHP-VIKOR Bütünleşik Yöntem. *Uluslararası Ekonomi İşletme ve Politika Dergisi*, 7(1), 92-103.
- [42] Sönmez, G. Ö., & Toktaş, P. (2024). Supplier selection using the integrated MEREC-CoCoSo methods in a medical device company. *Journal of Scientific Reports-A*, (056), 116-133.
- [43] Kara, K., Yalçın, G. C., Acar, A. Z., Simic, V., Konya, S., & Pamucar, D. (2024). The MEREC-AROMAN method for determining sustainable competitiveness levels: A case study for Turkey. *Socio-Economic Planning Sciences*, 91, 101762.
- [44] Mishra, A. R., Saha, A., Rani, P., Hezam, I. M., Shrivastava, R., & Smarandache, F. (2022). An integrated decision support framework using single-valued-MEREC-MULTIMOORA for low carbon tourism strategy assessment. *Ieee Access*, 10, 24411-24432.

- [45] Toslak, M., Aktürk, B., & Ulutaş, A. (2022). MEREC ve WEDBA yöntemleri ile bir lojistik firmasının yıllara göre performansının değerlendirilmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (33), 363-372.
- [46] Puška, A., Božanić, D., Mastilo, Z., & Pamučar, D. (2023). Extension of MEREC-CRADIS methods with double normalization-case study selection of electric cars. *Soft Computing*, 27(11), 7097-7113.
- [47] Meral, İ. G. (2023). BRICS-T ülkelerinin inovasyon performanslarının MEREC-MARCOS yöntemi ile değerlendirilmesi. *Kastamonu Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 25(2), 550-571.
- [48] Duran, Z. (2023). Evaluation of supply chain resilience in N-11 countries by MEREC Based EDAS, MARCOS, WASPAS integrated method. *Yıldız Social Science Review*, 9(1).
- [49] Shanmugasundar, G., Sapkota, G., Çep, R., & Kalita, K. (2022). Application of MEREC in multi-criteria selection of optimal spray-painting robot. processes, 10(6), 1172.
- [50] Haq, R. S. U., Saeed, M., Mateen, N., Siddiqui, F., Naqvi, M., Yi, J. B., & Ahmed, S. (2022). Sustainable material selection with crisp and ambiguous data using single-valued neutrosophic-MEREC-MARCOS framework. *Applied Soft Computing*, 128, 109546.
- [51] Akandere, G., & Zerenler, M. (2022). Doğu Avrupa ülkelerinin çevresel ve ekonomik performansının bütünlük CRITIC-TOPSIS yöntemiyle değerlendirilmesi. *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Meslek Yüksekokulu Dergisi*, 25(Özel Sayı), 524-535.
- [52] Abdullah, A. J., & Chang, A. Y. (2022, October). Green and lean manufacturing supplier selection using AHP-TOPSIS method. In *2022 IEEE 4th Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering (ECICE)* (pp. 306-310). IEEE.
- [53] Sengupta, D., Das, A., Bera, U. K., & Chen, L. (2023). A sustainable green reverse logistics plan for plastic solid waste management using TOPSIS method. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(43), 97734-97753.
- [54] Yerli, M., & Öztürk, D. (2023). AHP-TOPSIS yöntemine dayalı tedarikçi seçimi: ahşap sektöründe bir uygulama. *Ordu Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi*, 13(Sosyal Bilimler Lisansüstü Öğrenci Sempozyumu Özel Sayısı), 147-168.
- [55] Li, Z., Luo, Z., Wang, Y., Fan, G., & Zhang, J. (2022). Suitability evaluation system for the shallow geothermal energy implementation in region by Entropy Weight Method and TOPSIS method. *Renewable Energy*, 184, 564-576.
- [56] Al, İ., & Demirel, S. K. (2022). Türkiye'nin makroekonomik performansının TOPSIS yöntemiyle değerlendirilmesi: 2002-2019 dönemi. *Journal of Mehmet Akif Ersoy University Economics and Administrative Sciences Faculty*, 9(1), 202-222.
- [57] Gül, A., & Erdem, M. (2022). Gıda perakende firmalarının finansal performanslarının Entropi-TOPSIS yöntemiyle analizi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (35), 25-33.
- [58] Adamcsek, E. (2008). The analytic hierarchy process and its generalizations. *Eotvos Lorand University*.
- [59] Bhushan N, Rai K (2007). Strategic decision making: applying the Analytic Hierarchy Process. *Springer Science & Business Media*.
- [60] Soner, S., Önüt, S. (2006). Multi-Criteria supplier selection: an ELECTRA AHP application. *Sigma* 4: 110-120.
- [61] Saaty, T. L., Vargas, L. G., Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2001). How to make a decision. *Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process*, 1-25.
- [62] Vargas L, Saaty T (1982) The logic of priorities. USA: *Springer*.
- [63] Keshavarz-Ghorabae, M., Amiri, M., Zavadskas, E. K., Turskis, Z., & Antucheviciene, J. (2021). Determination of objective weights using a new method based on the removal effects of criteria (MEREC). *Symmetry*, 13(4), 525.
- [64] Hwang, C. L. (1981). Multiple attributes decision making. *Methods and Applications*.
- [65] Tsaur, R. C. (2011). Decision risk analysis for an interval TOPSIS method. *Applied Mathematics and Computation*, 218(8), 4295-4304.
- [66] Lai, Y. J., Liu, T. Y., & Hwang, C. L. (1994). TOPSIS for MODM. *European journal of operational research*, 76(3), 486-500.
- [67] Lanvin, B., & Evans, P. (Eds.). (2013). *The global talent competitiveness index 2013*. INSEAD. Erişim tarihi: 2023, <https://www.insead.edu/global-talent-competitiveness-index>
- [68] Mustra, M. A. (2011). Logistics Performance Index, connecting to compete 2010. In *UNESCAP Regional Forum and Chief Executives Meeting*. Cairo.

Yetişkin Öğrenmesinde Andragojik Yaklaşımlar: Otomotiv Sektöründe İş Sağlığı Güvenliği Eğitiminde Oyunlaştırma Uygulamaları

Andragogical Approaches in Adult Learning: Gamification Applications in Occupational Health and Safety Education in the Automotive Sector

Sude Nur CİVCİVOĞLU¹, Sevil ÇIRAKOĞLU KELLEÇİ¹

¹ Bursa Uludağ Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İş Sağlığı ve Güvenliği Programı, 16059, Bursa, Türkiye

Öz

Günümüzde iş sağlığı ve güvenliği (İSG) eğitimleri genellikle sınırlı bütçelerle ve eğitmen merkezli pedagojik yaklaşımlarla gerçekleştirilmektedir. Ancak etkili yetişkin öğrenimi için katılımcı merkezli andragojik prensiplerin eğitim programlarına entegre edilmesi gerekmektedir. Otomotiv sektöründe, çalışanların dinamik ve öngörülemez ortamlardaki tehlikeleri tanıyamamaları ve tepki gösterememeleri nedeniyle yüksek kaza istatistikleri artmaktadır. Bu çalışmada tehlike gruplarına göre periyodik olarak verilen temel İSG eğitimlerinin yetişkinlerin bilişsel öğrenme süreçleri üzerindeki etkileri incelenmiş ve otomotiv sektöründe andragojik prensipler çerçevesinde etkili tehlike ve risk tanıma eğitimleri için eğitici ve öğretici bir oyun tasarlanması amaçlanmıştır. Çalışma Türkiye'nin Bursa ilindeki otomotiv sektöründe gerçekleştirilmiş olup bu kapsamda bir firmada tehlike tanımlama analizleri ve risk değerlendirmeleri yapılmıştır. "Çok Tehlikeli", "Tehlikeli" ve "Az Tehlikeli" kategorilerine göre 150 risk değerlendirme kartı oluşturulmuştur. Prototip oyunlar 25 çalışan üzerinde test edildi ve oyunun etkisi kontrol gruplarında değerlendirildi. Sonuçlar, İSG Tabum Oyunu eğitimi nedeniyle hem kontrol grubunda hem de deney grubunda önemli artışlar olduğunu gösterdi. Bu bulgular oyunun katılımcıların İSG bilgi düzeylerini arttırmada etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Çalışma, otomotiv sektöründe çalışanların tehlike ve risk tanıma becerilerini geliştirerek iş kazaları ve hastalıkların önlenmesine katkı sağlayabilecek yeni eğitim yöntemleri sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Tehlike Analizi, Risk Değerlendirmesi, İş Sağlığı ve Güvenliği, Yetişkin Eğitimi, Andragoji, Otomotiv

Abstract

Occupational health and safety (OHS) training is generally conducted with limited budgets and instructor-centered educational approaches. However, participant-centered andragogical principles need to be integrated into training programs for effective adult learning. In the automotive industry, high accident statistics are increasing due to employees' inability to recognize and react to hazards in dynamic and unpredictable environments. In this study, the effects of basic OHS training given periodically according to hazard groups on the cognitive learning processes of adults were examined, and it was aimed to design an educational and instructive game for effective hazard and risk recognition training in the automotive sector within the framework of pedagogical principles. The study was conducted in the automotive industry in Bursa, Turkey, and hazard identification analyses and risk assessments were conducted in a company. According to the categories of "Very Dangerous," "Dangerous," and "Less Dangerous," 150 risk assessment cards were created. Prototype games were tested on 25 employees, and the effect of the games was evaluated in control groups. The results showed significant increases in both the control and experimental groups due to the OHS Tabum Game training. These findings reveal that the game effectively increased the participants' OHS knowledge levels. The study provides new training methods that can contribute to the prevention of occupational accidents and diseases by improving the hazard and risk recognition skills of workers in the automotive sector.

Keywords: Hazard Analysis, Risk Assessment, Occupational Health and Safety, Adult Training, Andragogy, Automotive Industry

I. GİRİŞ

Son yıllarda çalışma hayatında sürekli öğrenme ve şirket içi eğitimleri daha çok yer almaktadır. Ancak kıt kaynaklar ve zaman problemi de önem arz etmektedir. Ortaya çıkan kalifiye personel ihtiyacına pratik bir çözüm yolu olarak iş başında öğrenmeyi destekleyen oyunlaştırma, özellikle yetişkin bireylerin eğitimde olumlu çıktılar

elde etmek için farklı öğretim metotları arasında kullanılmaktadır. Yetişkinlerde öğrenmenin önemli unsurlarından biri olan “içselleştirme” kavramı ve pratik olanağı, oyunlaştırma ile sağlanabilmektedir.

“Oyunlaştırma” uygulamalarına 1980’li yıllardan itibaren atıflar yapılmaya başlansa da özellikle 2000’li yıllardan itibaren bu terimin farklı tanımları ortaya çıkmıştır; Oyunlaştırmanın temel amacı, oyun benzeri teknikleri gerçek dünyada etkili bir şekilde uygulayarak kullanıcıların motivasyonunu artırmak, davranışlarını etkilemek, becerilerini, yeterliliklerini ve yaratıcılıklarını geliştirmektir [1]. Oyunlaştırma ve oyun mekanizmaları terimleri uzun bir süre kullanılmasına rağmen, bu kavramların öğrenme ve öğretime derinlemesine entegrasyonu son yıllarda başlamış olup, ilk bulgular kullanıcı katılımını ve başarısını önemli ölçüde artırabileceğini göstermekte; dolayısıyla, oyunlaştırmanın öğretim ve öğrenim süreçlerindeki etkinliğini ortaya koymak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır [2]. Oyunlaştırma ve ilgili terimler, öğrenme sürecini daha ilgi çekici ve keyifli hale getirerek öğrenci katılımını, motivasyonunu ve öğrenmesini artırmak için kullanılır. Ciddi oyunlar, oyunlaştırılmış öğrenme platformları ve oyun temelli öğrenme gibi yaklaşımlar, sağlık eğitimi de dâhil olmak üzere çeşitli alanlarda eğitim hedeflerine ulaşmada etkili yöntemler sunmaktadır. An vd. (2024) çalışmalarında, oyun öğelerinin eğitim süreçlerine entegre edilmesinin öğrenme çıktıları üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu ve öğrencilerin katılımını artırmada önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir [3].

Ceylan (2012) tarafından Türkiye’de İSG eğitim sorunları üzerine yapılan çalışmada, iş kazalarının büyük bir kısmının insan faktöründen kaynaklandığı, İSG profesyonellerine olan ihtiyacın karşılanması ve eğitim kalitesinin artırılmasıyla bu kazaların önlenilebileceği ifade edilmiştir [4]. Ayrıca Ünşar (2004) tarafından yapılan çalışmada, iş güvenliği müfettişlerinin denetimleri sonucunda tespit edilen en büyük eksikliğin %88,92 oranında işveren ve çalışanların eğitim eksikliği olduğu belirtilmiştir [5]. Bu bulgular İSG eğitimlerinin niteliğinin ve kapsamının artırılmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır. İş kazalarının önlenmesinde eğitimin önemi büyüktür. İşletmelerde etkili ve verimli bir çalışan eğitim programı geliştirmek için öncelikle tüm çalışanlar için bir ihtiyaç analizi yapılmalı ve bu süreçte çözülmesi gereken sorunlar netleştirilmelidir. Eğitim yoluyla ulaşılabilecek hedeflerin açıkça tanımlanması, çalışanların iş sağlığı ve güvenliği konusundaki farkındalıklarını artırır ve işletme verimliliğini ve güvenliğini sağlamaya önemli katkılar sağlar. Bu

bağlamda, iyi yapılandırılmış eğitim programları, çalışanların iş kazalarını önleme konusundaki yeterliliklerini geliştirmede etkili bir araçtır. İşletmelerin en önemli ve değerli varlığı olan insan kaynakları, bilgi, yetenek ve eğitimle değer kazanır ve işletmeye katkı sağlayabilir. İnsan kaynaklarının etkin kullanımı, bu kaynakların eğitim yoluyla sürekli geliştirilmesiyle mümkündür [6]. Eğitim, bireylerin bilgi, düşünce, yetenek ve davranışlarını geliştirerek görevlerini daha etkili ve başarılı bir şekilde yapmalarını sağlar. İşletmelerin uyguladığı eğitim programları, çalışanların hem ekonomik hem de insani amaçlar doğrultusunda motivasyonunu artırır, özgüvenlerini pekiştirir ve yaratıcılıklarını geliştirir [7]. Ayrıca eğitim sürecinin çalışanlar üzerindeki olumlu etkileri, personel devir hızı ve devamsızlık oranlarını azaltarak, ürün ve hizmet kalitesinin artmasına katkı sağlamaktadır [6]. Çalışanlar için güvenlik kültürü geliştirmek, tehlikeleri önleme anlayışını benimsemek ve kendi hayatlarını önemseme bilincini kazanmak açısından İSG eğitimi büyük önem taşımaktadır. İSG eğitimi, işverenlerin çalışanlarına karşı yasal bir yükümlülüğü olup, iş güvenliğini sağlama ve iş kazalarını önlemede temel bir adımdır [8]. İSG politikalarının uygulanması, yalnızca yazılı kuralların çalışanlara iletilmesiyle sınırlı kalmamakta, bu kuralların etkin bir şekilde anlaşılması ve uygulanması için düzenli eğitimlerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir [6]. Çalışanların yeterli bilgi ve deneyime sahip olmaması, riskli durumlarla başa çıkma yeteneklerini olumsuz yönde etkilemekte ve kaza olasılığını artırmaktadır. Bu durum, işyeri risk faktörlerinin neden olabileceği kazalardan daha yüksek bir öneme sahiptir. Eğitim ve deneyimden yoksun çalışanlar, tehlikeleri tanıma, doğru önlemleri alma ve güvenli çalışma tekniklerini uygulama konusunda yetersiz kalabilmektedir; bu da iş güvenliği açısından büyük bir zaaf oluşturmaktadır. Bu nedenle kazaları önlemede, yeterli eğitim ve deneyime sahip çalışanlara sahip olmak, işyeri ortamındaki riskleri en aza indirmek kadar önemlidir [9].

Teknolojik gelişmeler, eğitim süreçlerini etkileyerek İSG eğitiminde eğitim teknolojilerinin kullanımını zorunlu hale getirmiştir. Bilgi çağında multimedya araçları, animasyonlar ve internet gibi kavramlar İSG eğitimlerinin daha etkili ve verimli olmasına katkı sağlamaktadır. Eğitim teknolojilerinin doğru kullanımı öğrenmeye ilgiyi artırma, dikkati çekme, motivasyonu artırma gibi faydalar sağlarken aynı zamanda eğitim süreçlerinde hedef, içerik ve değerlendirme açısından bütüncül bir yaklaşım benimsenmelidir. Bu çerçevede eğitim teknolojilerinin İSG eğitimine entegrasyonu hedef kitlenin verimliliğini ortaya koyacak planlamalarla desteklenmelidir [10].

Otomotiv imalat sanayi, küresel ekonomiyi önemli ölçüde etkileyen kritik bir sektördür. Bu endüstri, ürün tasarımından tedarik, imalat, montaj, paketlenme, lojistik ve dağıtıma kadar çeşitli süreçleri kapsamaktadır [11]. Otomotiv sektöründe sağlık ve güvenlik risklerini azaltmak için firmalar; düzenli risk değerlendirmeleri yaparak tehlikeleri belirlemeli, potansiyel riskleri değerlendirmeli ve işyeri tehlikelerini ortadan kaldırmak veya en aza indirmek için kontrol önlemleri uygulamalıdır [12]. Ayrıca, mühendislik kontrolleri uygulayarak tehlikeleri kaynağında azaltmalı ve çalışanları güvenli çalışma uygulamaları ve acil durum prosedürleri konusunda eğitmek için güvenlik politikaları ve eğitim programları oluşturmalıdırlar. Çalışanlara uygun kişisel koruyucu ekipman (KKD) sağlamanın yanı sıra, iş istasyonlarını ergonomik olarak tasarlamak ve sağlık gözetim programları uygulamak, mesleki hastalıkların erken belirtilerini tespit etmek ve zamanında müdahaleyi sağlamak için kritik öneme sahiptir. Son olarak, çalışanların güvenliğe aktif katılımını sağlamak ve güvenlik komitelerine ve sürekli iyileştirme girişimlerine katılımı teşvik ederek bir güvenlik sahipliği kültürü oluşturmak gerekir [13]. Otomotiv sektöründeki yüksek kaza oranları, günlük çalışma koşullarının değişkenliği ve tehlikelerin fark edilememesi nedeniyle artmaktadır [14]. Bu sektör, çalışanların sağlığı ve güvenliği için risk oluşturan bir dizi tehlikeli süreç ve faaliyeti içerir [15]. İşçiler hareketli makineler, ağır ekipmanlar ve keskin aletler gibi potansiyel tehlikelere maruz kalır; bu da ezilme yaralanmaları, amputasyonlar ve yırtılmalar gibi yaralanma riskini artırır. Ayrıca, boyalar, çözücüler, yağlayıcılar ve temizleyiciler gibi kimyasallara maruz kalmak cilt tahrişine, solunum sorunlarına ve kanser ve nörolojik bozukluklar gibi uzun vadeli sağlık etkilerine yol açabilir [11].

Oyunlaştırma, eğitim süreçlerinde motivasyonu, bağlılığı ve sürdürülebilirliği artırmak amacıyla bireylerin oyun deneyimlerinden yararlanarak öğrenme süreçlerini daha etkili, çekici ve verimli hale getiren bir yaklaşımdır; ancak bu yaklaşımın başarılı olabilmesi için oyunlaştırma unsurlarının doğru uygulanması ve iyi tasarlanmış öğrenme ekosistemlerinin oluşturulması gerekmektedir. Bu sorunların çözümünde alternatif bir yaklaşım olarak oyunlaştırmanın geleneksel eğitim yöntemlerine karşı etkili bir seçenek olduğu öne sürülmektedir [16].

Otomotiv sektöründe oyunlaştırma, yetişkin öğrenmesinde içselleştirme ve pratik uygulama fırsatları sunarken, katılımcı merkezli andragojik ilkeler doğrultusunda eğitimin kalitesini artırmayı amaçlamaktadır. Çalışma ile geleneksel ve dijital

oyunlaştırma öğelerinin entegrasyonu ile çalışanların tehlike ve risk tanıma becerilerinin geliştirilmesi hedeflenmektedir. Bu bağlamda Bursa'nın Türk otomotiv sektöründe erişilebilirlik açısından önde gelen iller arasında yer alması otomotiv sektörünün tercih edilmesinde önemli rol oynamıştır. Çalışmanın yetişkin öğrencileri motive etme potansiyeli göz önüne alındığında otomotiv sektöründe geleneksel İSG eğitim yöntemlerine göre daha etkili bir yaklaşım sunacağı düşünülmektedir. Oyun tabanlı öğrenmenin katılımcıların İSG algılarını ve farkındalıklarını artırmada, davranış değişiklikleri sağlamada ve iş kazalarını önlemede geleneksel eğitim yöntemlerine göre daha etkili bir yöntem olacağı öngörülmektedir. Otomotiv sektöründe İSG eğitimlerinin etkinliğini artırmak amacıyla oyunlaştırma yöntemlerinin kullanımını inceleyen bu çalışmada, 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu çerçevesinde verilen İSG eğitimlerinin kalitesinin iş kazaları ve meslek hastalıklarını önlemedeki önemi vurgulanmaktadır.

1.2. Yetişkin Öğrenmesinde Andragojik Yaklaşım

Çalışma hayatında karşılaşılan en önemli sorunların başında iş kazaları ve meslek hastalıkları gelmektedir. İş kazaları ve meslek hastalıkları ülkemizde de önemli bir sorun olmaya devam etmekte ve her yıl farklı sektörlerde çalışan binlerce insan bu sebeplerden dolayı hayatını kaybetmektedir. İş kazaları ve meslek hastalıklarını önlemek amacıyla geçmişten günümüze pek çok yasal ve kurumsal düzenleme yapılmış olmasına rağmen istatistiklerden bu düzenlemelerin yeteri kadar başarılı olmadığı açıkça görülmektedir. Bu durum iş sağlığı ve güvenliğini sadece teknik bir konu olarak ele almanın yetersiz olduğunu ortaya koymaktadır. Çalışma hayatında teknik boyutun yanı sıra "insan" faktörünün de dikkate alınması gerekir. Yapılan araştırmalar iş kazalarının %80-%95'inin çalışanların güvenli olmayan davranışlarından kaynaklandığını göstermektedir. Çalış ve Çalış (2022) çalışmalarının bulguları, iş kazalarını azaltmada denetimlerin yanı sıra diğer faktörleri de dikkate alınması gerektiği belirtilmektedir [17]. Bu nedenle davranışsal düzenleyici bir unsur olarak kabul edilen kültürün iş kazalarını önlemedeki rolü yadsınamaz bir öneme sahiptir.

Ülkenin kalkınması ve sektörde nitelikli eleman artışı için yetişkinlerin özellikle mesleki ve kişisel gelişim alanlarında eğitime ihtiyaç duyduğu bir gerçektir. Yetişkinlerin çalışma hayatlarının yanı sıra eğitim alabilmelerine olanak sağlayan internet ve web teknolojileri, eğitim yazılımları, araştırma ve uygulama yazılımları ve bilginin oyunlaştırılmış bir biçimde sunulması günümüzde yeterince karşılanmamaktadır. Bu bileşenlerin bir araya gelmesiyle ortaya çıkan

ihtiyaç, oyunlaştırma kavramının ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bilginin görsel ve işitsel medya aracılığıyla motive edici bir şekilde sunulmasını, seviye atlama ve ödüllendirme gibi özellikleriyle sağlayan oyunlaştırma, dünya çapında aktif bir sektör haline geldi. Ancak ülkemizde eğitimde bu kavram henüz tam anlamıyla benimsenmemiştir.

Yasal mevzuat, işverenlerin yeterli eğitim sağlamasını zorunlu kılsa da, mevcut eğitim yöntemleri, sağlık ve güvenlik bilgi ve beceri setlerinin aktarılmasının etkinliğini önemli ölçüde artırabilen temel öğrenme teorilerini içermemektedir [18]. Eğitim programlarının çoğu, güvenlik bilgisinin geleneksel sınıf içi öğretim yöntemleri yoluyla kolayca aktarılabilceği şeklindeki iyi niyetli bir varsayıma dayalı olarak geliştirilmektedir. Bu geleneksel eğitim programları, katılımcıların katılımını sağlamakta büyük ölçüde başarısız olur ve hatta güvenlik konularına karşı olumsuz tutumlar aşılayabilir. Sorun, eğitimcilerin yetkinliği, etkisiz beceri edinme ve verme yöntemleri ve güvenlik bilgisinin edinilmesini, akılda tutulmasını ve aktarılmasını engelleyen örgütlenmiş materyallerle daha da kötüleşir [19]. Bu geleneksel pedagojik yöntemler, genç yetişkinleri eğitmek için verimli olmakla birlikte, kendi kendini yöneten yetişkin öğrenciler için uygun değildir. Etkili öğrenmeyi sağlamak için, eğitim programlarının çalışanların öğrenme stillerine göre uyarlanması gerekir. Katılımcıların bağımlı veya pasif bir rol oynadığı geleneksel pedagojik eğitim programları, yetişkin öğrencilerin eğitimi için genellikle etkisizdir [18]. Yetişkin öğrenciler (işçiler) farklı öğrenirler ve dolayısıyla etkili bilgi aktarımı için andragojik ilkelerin dahil edilmesi gerekir. Yetişkinler, çocuklardan ve gençlerden daha gerçekçidir. Aldıkları eğitimin ihtiyaçlarına somut çözümler sunmasını beklerler. Yetişkinler öğrenme ortamına gönüllü olarak geldikleri için kendilerine sunulan eğitim programlarının amaçlarına ve ihtiyaçlarına uygun olmasını istemektedirler.

Connolly ve ark. ve Graesser ve ark. bir oyun oynamanın nasıl algısal, bilişsel, davranışsal ve duygulanımsal etkileri olabileceğini, örneğin bilgi edinmenin yanı sıra motivasyonel sonuçları hakkındaki çalışmalarında, başlıca insan davranışı teorileri tarafından açıkça belirtildiği gibi (örneğin, Planlı Davranış, Sosyal Bilişsel ve Koruma Motivasyonu teorileri) benzer bilgi ve becerilere sahip farklı insanlar, motivasyon, alınan tavsiyelerin algılanan etkinliği veya durum üzerinde algılanan kişisel kontrol gibi değişkenlere bağlı olarak farklı performans gösterebilir. Güvenlik eğitimi için oyunun tasarımı ve değerlendirmesi bu tür yönleri dikkate alınmanın

öneminden bahsetmektedirler [20]. Bu nedenle, eğitimlerini tamamlayarak çalışma hayatına atılan yetişkin bireylere yönelik eğitimlerde oyunlaştırmanın kullanımını oldukça sınırlı kalmaktadır. Mevcut olan oyunlarda, genellikle puanlar, liderlik tabloları ve rozetler gibi dışsal motivasyonu sağlayan sistemlere odaklanmakta; Ancak içsel motivasyonu olumlu yönde olacak mücadele duygusu, yaşamsallık, hikaye anlatımı ve merak gibi unsurlar göz ardı edilmektedir. Bu öğrenme ortamı, dışsal motivasyona yönelik puanlar, liderlik tabloları ve zorlukları gibi bileşenleri kullanarak öğrenenlerin içsel motivasyonlarını artırmayı amaçlayan bir tasarım sunulması yetişkin öğrencilerin eğitimlerinde önemli bir unsurdur. Bir diğer önemli unsurda, oyunu oynama sırasında güvenli ve rahat bir deneyim olmalıdır; bu nedenle oyun kontrollerinin yaralanma riski oluşturmadığından emin olmak için özen gösterilmelidir (örneğin, bir oyundaki fiziksel hareket vb. gibi) [21].

Geleneksel yöntemler eğitmenin, öğrenilecek materyali, kullanılacak öğretim yöntemini ve ayrılacak zamanı tasarlama konusunda tüm sorumluluğu üstlendiği, eğitmen tarafından yönlendirilen yetkili bir eğitim sistemidir. Öte yandan, öğrenci genellikle daha bağımlı bir rol oynar ve eğitmen tarafından belirlenen öğrenme süreçlerine ve gereksinimlerine uyum sağlar [22]. Geleneksel yöntemler bağımlı çocuklarda eğitim vermede çok etkiliyken yetişkinlerde daha az etkilidirler. Pedagojik yöntemler, bağımlı çocuk ve gençlere eğitim vermede çok etkili olsa da, kendi kendini yöneten öğrenme yöntemlerini tercih eden bağlam odaklı yetişkinleri eğitmede daha az etkilidir. Bu koşullarda, öğrenme yöntemlerinin öğrencinin ilgi ve ihtiyaçlarına dayalı olarak benimsendiği andragojik ilkelerin dahil edilmesi esastır [18]. Eğitim programları sadece bilgi veya beceri setlerini aktarmaya odaklanmamalı, çalışanların takip edecek faydaları anlamalarını sağlamalıdır. Yetişkin öğrenenler, andragojik ilkelerin kullanımıyla oluşturulabilen öğrenme sürecinde değer gördüklerinde, öğrenmeye daha fazla bağlılık vardır [23].

Yetişkinlerin daha çocuk ve genç öğrenenlere göre farklı öğrendiklerine dair güçlü bir gösterge vardır. Sonuç olarak, andragojiye dayalı öğrenme tekniklerini kullanırken eğitmen, öğrenme sürecinin aktarıcısı veya değerlendiricisi olmaktan çok öğrenmeyi kolaylaştırıcı rolü oynamaktadır. Kolaylaştırıcı, fikir ve bilgi alışverişini teşvik eden risksiz bir öğrenme ortamı yaratırken öğrencinin içsel öğrenme güdüsüne güvenir. Öğrenme ortamının fiziksel rahatlık, karşılıklı güven ve saygı, karşılıklı yardımlaşma, ifade özgürlüğü ve farklılıkların kabulü ile karakterize edilmesi gerektiğini öne sürmektedir. Böyle bir ortamda, kolaylaştırıcı ve

öğrenciler ile işbirliği içinde, bireysel öğrencilerin amaç ve özlemleriyle ilgili olan öğrenme hedeflerini ve materyallerini geliştirirler [24]. Öğrenme süreçleri büyük ölçüde farklı olduğu için yetişkinlere çocuk ve gençlerden farklı öğretilmesi gerektiğini ileri sürer.

Taylor ve Kroth (2009), yetişkin öğrencileri hakkında yetişkin öğreniminin temeli olan altı temel varsayımı özetlemektedir. Bu varsayımlar benlik kavramı, deneyim, öğrenmeye hazır olma, öğrenme yönelimi, öğrenme motivasyonu ve bilme ihtiyacıdır.

1. Benlik kavramı: Bir kişi olgunlaştıkça, benlik kavramı bağımlı bir kişilikten kendi kendini yöneten bir kişiliğe geçer. Yetişkinler, başkalarının kendi isteklerini onlara empoze ettiğini hissettikleri durumlara direnme eğiliminde bulunmaktadır.

2. Deneyim: Kişi olgunlaştıkça, bir öğrenme kaynağı haline gelen, büyüyen bir deneyim rezervuarı biriktirir. Yetişkinler, yetişkin eğitimine çocuklardan çok daha fazla geçmiş deneyimle gelme eğilimindedir. Bu önceki deneyimler kullanılabilirse, eldeki en zengin kaynak olurlar.

3. Öğrenmeye hazır olma: Kişi olgunlaştıkça beğenmeye hazır olma durumu, sosyal rollerini geliştirme görevine yönelik hale gelir.

4. Öğrenme yönelimi: Kişi olgunlaştıkça, zaman perspektifi bilginin ertelenmiş uygulamasından doğrudan uygulamaya değişir ve buna bağlı olarak öğrenmeye yönelik yönelim konu merkezli problem merkezliye doğru kayar. Yetişkinler, edindikleri bilginin bir görevi yerine getirmelerine veya gerçek hayattaki bir problemi çözmelerine yardımcı olacağını algıladıkları ölçüde öğrenmeye motive olurlar.

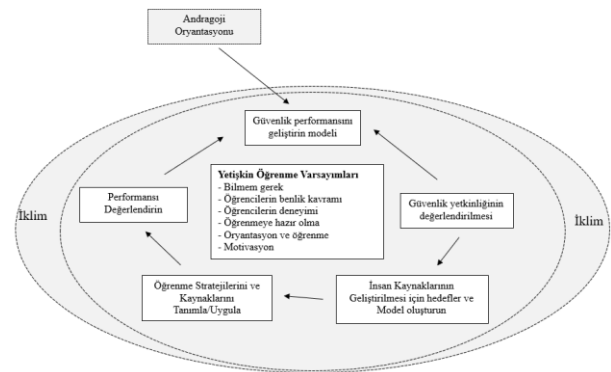
5. Öğrenme motivasyonu: Bir kişi olgunlaştıkça, içsel motivasyon anahtardır. Yetişkinler dış olayların baskısını hissetseler de, çoğunlukla içsel motivasyon, benlik saygısı ve hedeflere ulaşma arzusu tarafından yönlendirilirler.

6. Bilme ihtiyacı: Yetişkinler bir şeyi öğrenmenin nedenini bilme ihtiyacı duyarlar. Yetişkin eğitiminde öğretmenin ilk görevi, öğrencinin bilme ihtiyacının farkına varmasına yardım etmektir.

Yetişkinler değerli buldukları bir şeyi öğrenmeyi taahhüt ettiklerinde, kayda değer miktarda kaynak (örneğin, zaman ve enerji) harcarlar. Çocuk ve gençlerden daha fazla deneyime sahip oldukları için ve önceden yerleşik inançlar oluşturmuştur. Bundan

dolayı yetişkinler öğretilen içerikten çok sürece odaklandığından deneyim en önemlisidir [24].

Yetişkin ve geleneksel öğrenenler arasındaki farklılıklara dayanarak, Knowles ve diğerleri (2011), eğitim ve öğretim programlarının yetişkin öğrenciler için öğretmen merkezli olmaktansa öğrenci merkezli olacak şekilde tasarlanması gerektiğini savunmaktadır [22]. Andragojik kolaylaştırıcılar tarafından yetişkin öğrenme süreçlerini eğitim ve öğretim programlarına uyarlamak için kullanılabilir bir süreç modeli sağlar. Bu öğelerin, tehlike tanıma eğitim programlarında öğrenmeyi güçlendirmek için kullanılması, otomotiv sektöründe İSG performansını etkili bir şekilde artırabileceği umut edilmektedir.



Şekil 1. Andragoji tabanlı güvenlik eğitimi çerçevesi [23]

Şekil 1'de görülebileceği gibi, entegrasyon çerçevesi, yetişkinlerin nasıl öğrendiğine dair yerleşik temel varsayımlara dayalı olarak inşa edilmiştir. Çalışanların bu yeni proaktif öğrenme tekniğine aşina olmalarına yardımcı olmak için, döngüsel süreç bir oryantasyon programı ile başlamaktadır. Bu yetişkin öğrencilere yetişkin öğreniminin teori ve uygulamalarını ve bireysel olarak kendi kendini yöneten yetişkin öğrencilerin oynadığı rolü tanıtır. Öğrenciler temel kavramları yeterince kavradıktan sonra, resmi eğitim süreci, öğrencilerin ve kolaylaştırıcının, istenen güvenlik performansı seviyesine ulaşmak amacıyla güvenlik yönetimi süreci için bir model oluşturmak üzere birlikte çalıştıkları ortak bir oturumla başlar. Bunu, öğrencilerin kendi kendilerini değerlendirdikleri ve mevcut güvenlik yönetimi sürecini ve güvenlik performans seviyelerini istenen modelle karşılaştırdıkları bir oturum izler. Bu süreç, mevcut güvenlik performansı seviyesi ile istenen seviye arasındaki tutarsızlıkları ortaya çıkarır. Sonuç olarak, yetişkin öğrenciler, iyileştirmenin gerekli ve ulaşılabilir olduğunu algıladıkları mevcut programdaki eksikliği anlarlar. Bu süreç, istenen performans düzeyine ulaşmak için uygulanabilecek belirli stratejilerin ve eylem öğelerinin geliştirilmesine

yardımcı olur. Ayrıca, belirlenen hedeflere ulaşmak için gerekli olan çeşitli öğrenme kaynakları işbirliği içinde belirlenebilir. Son olarak, işbirliğine dayalı öğrenme sürecinin etkinliği değerlendirilir, güvenlik performansı ölçülür ve gözden geçirilmiş bir güvenlik süreci modeli tasarlanır. Karşılıklı öğrenmeye ve sorgulamaya elverişli bir ortam (iklim), andragoji temelli eğitim çerçevesinin başarılı bir şekilde uygulanması için gereklidir [23].

Ölçme ve Değerlendirme Sürekli iyileştirme ve öğrenmeyi sağlamak için ölçme ve değerlendirme gereklidir. Kirkpatrick'e (1998) göre, değerlendirme dört seviyede yapılmalıdır. Bunlardan birincisi yetişkin öğrencilerin andragoji sürecine tepkisi; ikincisi öğrenme deneyimi yoluyla edinilen bilgi ve beceriler; üçüncüsü programın bir sonucu olarak uyarılan davranış değişikliği; dördüncüsü performanstaki iyileşme yoluyla elde edilen faydalar (örn. daha düşük yaralanma oranı, vb.). Bu tür ölçümler, yinelemeli yetişkin eğitimi sürecinde iyileştirilmesi gerekebilecek alanların yeniden teşhis edilmesini de kolaylaştırır [25]. Bu bağlamda, yetişkin öğrencilerin iyileştirme ihtiyaçlarını anlamaları ve güvenlik süreçlerini birlikte belirledikleri stratejilerle optimize etmeleri, Kirkpatrick'in değerlendirme düzeylerine uygun olarak ölçme ve değerlendirme süreçleriyle sürekli iyileştirilen andragoji tabanlı eğitim çerçevesinin başarılı bir şekilde uygulanmasına katkıda bulunmaktadır. Oyunlaştırma, oyunun en ilgi çekici ve etkili kısımlarından biri olan puanlama sistemini kullanarak katılımcıların öğrenme sürecindeki aktif deneyimlerini ve katılımlarını artırmayı amaçlamaktadır [26]. Bu süreçte çalışmada ön test ve son test sonuçları, oyunun eğitsel niteliğini ve katılımcıların akademik başarısını ölçmek için kullanılacak önemli veriler sağlamaktadır.

II. MATERYAL VE METOD

2.1. Araştırmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı, otomotiv sektöründe iş kazaları ve meslek hastalıklarını önlemek için mevcut eğitim yöntemlerinin etkinliğini artıracak yeni bir eğitim yaklaşımı geliştirmektir. Özellikle, çalışanların tehlike ve risk tanıma becerilerini geliştirmek amacıyla oyunlaştırma ve andragojik ilkeleri bir araya getirerek eğitim programlarının daha etkili hale getirilmesi hedeflenmektedir. Tasarlanan oyunun otomotiv sektörü çalışanlarını, tehlike ve riskleri tanıma seviyelerini ve iş sağlığı ve güvenliğini iyileştirmek için güvenlik hedefleri ve eğitim programlarının geliştirilmesine proaktif olarak katılmaya teşvik etmesi beklenilmektedir.

Çalışma için, Bursa Uludağ Üniversitesi Sosyal ve Beşeri Bilimler Araştırma ve Yayın Etik Kurulu, 18

Aralık 2023 tarihli, 2023-12 oturum sayılı etik kurulu kararı alınmıştır.

2.2. Araştırmanın Önemi

Otomotiv sektörü, üretim süreçlerinde çeşitli tehlikelere ve risklere maruz kalmaktadır. Bu riskler, hammaddelerin depolanması, işlenmesi, montajı ve sevkiyatı süreçlerinde ortaya çıkmaktadır. Özellikle sac ve çelik gibi hammaddelerin işlenmesi sırasında torna, freze, CNC tezgâhlarıyla kesilmesi, preslenmesi ve kaynak işlemlerinden geçmesi önemli tehlikeler oluşturmaktadır. Boyama ve montaj aşamalarında da ek riskler bulunmaktadır. Bu süreçlerde sıklıkla karşılaşılan kazalar arasında ezilme, sıkışma, düşme gibi durumların yanı sıra yüz, kafa, göz, el, ayak ve solunum yolu yaralanmaları da yer almaktadır. Ayrıca bu sektörde uzun süreli meslek hastalıkları da yaygın olarak görülmektedir [14]. Ancak dikkatsizlik, gerekli önlemlerin alınmaması, kişisel koruyucu ekipmanların kullanılmaması ve İSG eğitimlerinin eksik olması, daha ciddi iş kazalarına ve maalesef ölümcül kazalara yol açabilecek riskleri artırmaktadır. Bu tehlike ve risklerin azaltılması amacıyla otomotiv sektörüne özgü olarak tasarlanan İSG Tabum oyunu, risk değerlendirmesi temelinde geliştirilmektedir. Seçilen firmaya özgü tehlike tanıma ve risk değerlendirmesinin yapılması tasarımı yapılacak oyunda kullanılan sağlık güvenlik kartların oluşturulmasında yapılan risk değerlendirilmesinden faydalanılmıştır. Seçilen otomotiv firmasında yapılan risk değerlendirmesi sonucunda, oyun tasarımı ve oyun kartları oluşturulmuştur. Oyunun tasarımında kullanılan sağlık güvenlik kartları bu risk değerlendirme sonuçlarından elde edilen verilerle oluşturulmuştur. Bu oyun, çalışanların günlük iş süreçlerinde karşılaşılabilecekleri potansiyel tehlike ve riskleri anlamalarına yardımcı olmayı amaçlamaktadır. Oyunun interaktif yapısı sayesinde çalışanların bu tehlikeleri tanıma ve bunlarla nasıl başa çıkacaklarını öğrenme süreçleri desteklenmektedir. Böylece İSG konusundaki farkındalıklarının artırılarak güvenli bir çalışma ortamının sağlanmasına katkı sağlanması amaçlanmaktadır. Bu yaklaşım, otomotiv sektöründe İSG kültürünün güçlendirilmesinde önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir.

Katılımcılara tasarlanan oyun öncesi ve sonrasında 10 sorudan oluşan ön test ve son test uygulanmıştır. Ön test sonuçları değerlendirilmemekle birlikte bu uygulamanın amacı adayların eğitim bilimleri alanındaki eğitimden ne kadar faydalandıklarını ölçmektir. Ön test katılımcıların hazır bulunuşluk düzeylerini belirlemek amacıyla kullanılmakta ve ilgili yasal denetimlerde incelenmektedir. Çalışma kapsamında otomotiv sektörüne özel olarak tasarlanan oyun katılımcılara oyunu geliştiren ekip ve firmanın İSG birimi çalışanları eşliğinde oynatılmıştır. Oyun sonrasında uygulanan 10 soruluk son test ise eğitimi alan katılımcıların öğrenme düzeylerini ve oyunun öğreticiliğini değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır.

Bu çalışmanın önemi, Otomotiv sektöründe İSG eğitimlerinde oyunlaştırma ve andragojik ilkelerin entegrasyonunun sağlanması, hem çalışanların güvenlik bilgi ve becerilerini artıracak hem de genel İSG performansını iyileştirilmesi beklenilmektedir.

2.3. Araştırma Sorusu

- Deney ve kontrol gruplarının İSG Tabum Oyunu'na katılım öncesi ve sonrası test puanları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark var mıdır?

- İSG Tabum Oyununun katılımcıların akademik başarısına ve İSG konusunda bilgi edinmelerine olumlu etkisi var mı?

2.4. Araştırmanın Örnekleme

Bu çalışmanın örneklemini, Türkiye otomotiv sanayinin yoğun olarak yer aldığı Bursa ilindeki otomotiv fabrikalarında çalışan 50 kişi oluşturmaktadır. Örneklem, deney ve kontrol grupları olmak üzere eşit olarak bölünmüş olup her grupta 25 katılımcı bulunmaktadır.

2.5. Veri Toplama Araçları

Araştırma kapsamında otomotiv sektöründe faaliyet gösteren bir firma seçilerek bu firmaya özgü tehlike tanımlama analizleri ve risk değerlendirmeleri yapılmıştır. Bu analizler firmanın İSG biriminin desteğiyle gerçekleştirilmiştir. Oyun kartları risk gruplarına göre tasarlanmıştır. Kartlar, risk gruplarını belirterek "Çok Tehlikeli", "Tehlikeli" ve "Az Tehlikeli" kategorilerine ayrılmıştır. Toplamda her kategori için 150 kart hazırlandı. Ayrıca aynı sayıda risk değerlendirmelerini içeren "Risk" kartları da üretilmiştir. Tasarlanan oyunun prototipleri üretilerek ve ön test ve son test soruları hazırlanmıştır. Bu testler oyunun etkisini değerlendirmek için kullanılacaktır. Tasarlanan oyun etkinliği kontrol gruplarına uygulanarak gerekli düzeltmeler yapılmıştır. Bu işlem oyunun etkililiğini ve uygulanabilirliğini sağlamak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 2 ve Şekil 3'de oyun görseli ve içeriği gösterilmektedir. Tasarlanan oyun etkinliği seçilen örnek firmanın 25 çalışanına uygulanmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Uygulama süreci aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır:

- Ön Test
- İSG Tabum Oyunu Oynama
- Son Test
- Ödül



Şekil 2. Geliştirilen İSG Tabum Kutulu Oyun Görseli



Şekil 3. Geliştirilen İSG Tabum Oyun İçeriği Örneği

2.6. Araştırma Sınırlılıkları

Bu çalışma, Bursa ilinde faaliyet gösteren, tehlikeli sektör sınıfında yer alan ve toplam 60 çalışanı bulunan bir otomotiv firması ile sınırlıdır.

2.7. Veri analizi

Deney ve kontrol gruplarına İSG Tabum oyunu öncesinde ve sonrasında her biri 10'ar sorudan oluşan çoktan seçmeli ön test ve son test uygulanmıştır. Bu süreçte kontrol grubunda 25, deney grubunda 25 olmak üzere toplam 50 katılımcının ön test ve son test sonuçları değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler SPSS 28 programı kullanılarak istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Verilerin normal dağılım gösterdiği belirlendiğinden ilgili grubun ön test ve son test puanları arasında anlamlı bir fark olup olmadığını değerlendirmek amacıyla ilişkili örneklem t-testi uygulanmıştır.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

İstatistiksel analizlerin seçiminde verilerin normal dağılıp dağılmamasına göre farklı kararlar alınmaktadır. Verilerin simetrik ve sürekli dağılımında aritmetik ortalama, mod ve medyan birbirine eşittir ve bu tür dağılıma normal dağılım adı verilir [27]. Grup büyüklüğünün 50'den az olması durumunda Shapiro-Wilk testi, 50'den fazla olması durumunda ise Kolmogorow Smirnow testlerinin kullanılması gerektiği, eğer anlamlılık düzeyi 0,05'den büyük çıktıysa dağılımın normal dağılım, küçük çıktıysa dağılımın normal dağılım olmadığı yorumunun yapılması gerektiği belirtilmiştir. Çarpıklık ve basıklık katsayılarının ± 3 dahilinde olması durumunda bu katsayıların kabul edilebilir olduğunu ifade etmiştir [28]. Veri setinin normalliğine ilişkin önemli bir kaynak Kolmogorov-Smirnov ve Shapiro-Wilks testinin p değerinin anlamsız çıkmasıdır Kolmogorov-Smirnov ve Shapiro-Wilks testinin p değerinin anlamsız çıkması veri setinin normal dağılım gösterdiğini ifade etmektedir [29]. Elde edilen veriler normal dağılım gösterdikleri için ilişkili gruplar t testi ile hipotezler test edilmiştir.

Tablo 1. Kontrol Grubunun İSG Tabum Oyunu İSG Eğitimi Ön test ve Son test Ortalama Puanların t-Testi Sonuçları

Kontrol Grup	N	\bar{x}	S	sd	t	p
Öntest	25	80.40	9.34	24	-1.977	.030
Sontest	25	86.00	9.57			

Kontrol grubunun ön test ortalama puanı 80.40 iken son test ortalama puanı 86.00 olarak belirlendi. Bu durum kontrol grubunun son teste ön teste göre daha yüksek puan aldığını göstermektedir. Hem ön test hem de son test için standart sapmaların birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu durum puan dağılımlarının benzer olduğunu göstermektedir. Kontrol grubunun ön test ve son test puanları arasında anlamlı bir fark bulunmuştur. T testi sonucu ($t=-1.977$, $p=.030$) İSG Tabum Oyununda İSG eğitimi sonrası kontrol grubunun performansında istatistiksel olarak anlamlı bir artış olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, kontrol grubunun eğitim sonrasında İSG bilgilerinin arttığını veya geliştiğini göstermektedir. Kontrol grubuna verilen İSG Tabum Oyunu eğitiminin etkili olduğunu ve katılımcıların bilgi düzeyini arttırdığını göstermektedir. Etki büyüklüğü için hesaplanan Cohen d değeri 0,395 bulunmuştur. Cohen'in $d = 0,395$ 'i küçük ile orta düzeyde bir etki büyüklüğünü gösterir. Bu durum İSG Tabum Oyunu eğitiminin kontrol grubunun İSG bilgi düzeyinde küçük ama anlamlı bir gelişme sağladığını göstermektedir.

Tablo 2. Deneysel Grubunun İSG Tabum Oyunu İSG Eğitimi Ön test ve Son test Ortalama Puanların t-Testi Sonuçları

Deneysel Grup	N	\bar{x}	S	sd	t	p
Öntest	25	72.80	24.06	24	-2.820	.009
Sontest	25	84.00	15.27			

Deneysel grubunun ön test grubunun İSG Tabu oyunu İSG eğitim puanı ortalaması 72,80 iken, son test grubunun ortalama puanı 84,00 olarak belirlendi. Öntest ve Sontest grupları arasında İSG Tabu oyununun İSG eğitim puan ortalamaları arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık olduğu tespit edilmiştir. T testi sonucunda elde edilen t istatistiği -2,820 olup, p değeri 0,009 olarak hesaplanmaktadır. Bu p değerinin 0,05 olan alfa düzeyinden küçük olması, farkın istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, İSG Tabu oyunu eğitiminin ön test ve son test puanlarında değişiklik yarattığını ve bu değişikliğin eğitim sonrasında daha yüksek puanlara yol açtığını göstermektedir. Etki büyüklüğü için hesaplanan Cohen d değeri 0.564 bulunmuştur. Cohen'in $d = 0.564$ 'ü orta büyüklükte bir etkiyi göstermektedir. Bu durum deneysel grubunun İSG Tabum Oyunu eğitimi sonrasında İSG bilgi düzeyinde orta düzeyde bir gelişme kaydettiğini göstermektedir.

Bu çalışma, normal dağılım varsayımları altında yürütülen istatistiksel analizler sonucunda, kontrol grubunun İSG Tabum Oyunu eğitimine katıldıktan sonra ön test ortalama puanının 80.40'dan 86.00'a yükseldiğini ve bu değişimin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu ($t=-1.977$, $p=0.030$) göstermektedir; ayrıca, etki büyüklüğü Cohen d değeri 0.395 ile küçük ile orta düzeyde bir gelişme sağlandığını ortaya koyarken, deneysel grubunda ise ön test ortalama puanının 72.80'den 84.00'a çıkması ($t=-2.820$, $p=0.009$) ile orta düzeyde bir etki (Cohen $d=0.564$) kaydedilmiştir, bu da İSG Tabum Oyunu eğitiminin katılımcıların bilgi düzeyini arttırmadaki etkinliğini desteklemektedir.

Finlandiya'da inşaat sektöründe yapılan araştırmada, İSG eğitimlerinde teknoloji kullanımının etkilerini göstermesi açısından önemli bulgular sunmaktadır. Çalışmada, klasik yöntemlerle verilen eğitimler, sanal gerçeklik (VR) teknolojisi kullanılarak verilen eğitimlerle karşılaştırılmış ve sonuçlar VR teknolojisinin çalışanlar üzerinde daha etkili olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle bir ay sonra verilen tekrarlanan eğitimlerde, sanal gerçeklik kullanılarak eğitim alan grubun güvenlik kültürü puanlarının, klasik eğitim yöntemlerini alanlara göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu durum, VR tabanlı eğitimlerin iş sağlığı ve güvenliği alanında daha kalıcı öğrenme sağladığını ve çalışanların tehlikelere karşı daha bilinçli bir tutum geliştirdiğini göstermektedir [30]. Son zamanlarda literatürde, insan davranışını değerlendirmede oyunlaştırma tekniklerinin oynanabilirliğine ve çekiciliğine dikkat çekerek, bu

tekniklerin iyi eğitim deneyimlerinin tasarımıyla uyumlu olmasının yanı sıra, oyuncuların yeteneklerini kullanarak karmaşık görevleri gerçekleştirmelerine olanak sağlaması ve etkileşimli yapısı sayesinde motivasyonu artırması nedeniyle eğitimde etkili bir araç haline geldiğini vurgulamakta ve oyunlaştırmanın ürettiği etkileşim, eğitim araçlarını teşvik etmektedir. [31]. Oyunun kullanıcı profiline uyarlanmasının etkisi konusunda sınırlı bilgi mevcut olup, bireyselleştirilmiş eğitimin öğrenme üzerindeki olumlu etkilerine paralel olarak, oyunlaştırmanın bireye uyarlanmasının katılımı artırabileceği ve öğrenme çıktılarında önemli kazanımlar sağlayabileceği; ancak uyarlanabilir oyunlaştırmaya ilişkin mevcut çalışmalar oldukça sınırlı kalmaktadır [32]. Ryan, Rigby ve Przybylski'nin öz belirleme teorisine göre [33], oyunlaştırma, oyuncuların aldıkları uyarılara göre davranışlarını etkileyebilecek motivasyonel tasarım unsurlarından biri olarak kullanılırken, yeterlilik, özerklik ve ilişkiler gibi doğuştan gelen psikolojik ihtiyaçların karşılanmasının öz motivasyon ve ruh sağlığı üzerinde olumlu etkileri olacağı belirtilirken, "oyunlaştırmadan çıkarma" kavramının kullanıcı bağlılığının izlenmesini vurguladığı ve oyun mekanikleri ve dinamiklerinin seçiminin kullanıcı katılımını sürdürme açısından büyük öneme sahip olduğu, dolayısıyla uzun vadeli bağlılığın sağlanması için motivasyonun temel unsurlarının dikkate alınması gerektiği ifade edilmektedir [34]. Savignac (2017), oyunlaştırmanın motivasyonel bir araç olarak yaşam kalitesini artırabileceğini ve bu nedenle çalışma ortamlarında uygulanabilir olduğunu vurgulayarak bu kavramı yeniden teyit etmiştir [35]. Capatina vd. (2024) çalışmalarında, oyunlaştırmanın kurumsal eğitimde bilgi tutma, bilgi paylaşımı ve iş performansı üzerindeki etkilerini inceleyerek, oyunlaştırma unsurlarının çalışan katılımını artırdığı, bu etkileşimin bilgi tutma ve iş performansı ile ilişkili olduğu, sosyal etkileşimlerin işbirlikçi öğrenme süreçlerini desteklediği ve bu bulguların öz belirleme, sosyal değişim ve bilişsel yük teorilerinin iş ortamlarına uygulanmasına katkı sağladığını göstermektedir [36]. Tay vd. (2024) çalışmaları, inşaat profesyonellerinin Tasarım Güvenliği eğitiminde dijital oyun tabanlı öğrenmenin etkinliğini değerlendirerek, geleneksel eğitim yöntemlerine göre daha fayda sağladığını, mesleki geçmişin kursiyer performansını etkilemedeki rolünü vurguladığını ve oyun içi etkinlikler için ayrıntılı açıklamalar sunarak uzmanlık tersine etkilerini önleyip bilişsel yükü yönetme potansiyelini ortaya koymaktadır; bu bulgular, dijital oyun tabanlı öğrenmenin mesleki eğitimde uygulanabilirliğini ve inşaat sektöründe Tasarım Güvenliği eğitimini daha geniş bir biçimde benimseme gerekliliğini desteklemektedir [37]. Çalışanların güvenlik kültürü, Avrupa Birliği'nde karşılaşılan olumsuz demografik eğilimler ve ekonomik rekabetin belirleyicileri açısından önemli bir konudur. Hejduk ve Tomczyk (2015) çalışmada, güvenlik kültürü kavramını ve önemini inceleyerek bilgi transferine dayalı bir model

geliştirmeyi ve doğrulamayı amaçlayan araştırma programının hedeflerini sunmaktadır. İSG'Yİ etkileyen temel faktörler arasında Bireylerin sadece bilgi ve becerilere değil aynı zamanda yeterli alışkanlıklara da sahip olmaları gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu alanda geliştirilen alışkanlıkların sistematik bir yaklaşımla oluşturulması gerekliliği eğitim sürecinin kalitesini artıracak ve öğretmenlerin mesleki gelişimlerini olumlu yönde etkileyecektir. Nöroloji alanındaki son gelişmeler insan davranışının ve yaşam kararlarının sadece bilgi ve yeterlilikle değil aynı zamanda alışkanlıklarla da şekillendiğini göstermektedir. Eğitimin etkililiğini artırmak için e-kitap, etkileşimli beyaz tahta ve oyunlaştırma gibi dijital çözümlerin önemi vurgulanmaktadır [38].

IV. SONUÇ VE ÖNERİLER

Ön test ve son test analizleri, İSG Tabum oyununun katılımcıların İSG konularına ilişkin bilgi ve farkındalıklarını artırmada anlamlı bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Katılımcıların İSG konularına ilişkin farkındalıklarının arttığı ve belirlenen test sorularında daha yüksek başarı elde ettikleri belirlenmiştir. Oyunlaştırmanın, katılımcıların öğrenme motivasyonunu ve etkinliğini geleneksel eğitim yöntemlerine göre artırdığı görülmüş ve katılımcıların oyun aracılığıyla daha fazla etkileşimde bulunarak konuları daha iyi anladıkları belirlenmiştir. Geri bildirimlere göre, oyun eğlenceli ve eğitici bulunmuş ve katılımcılar İSG konularını daha ilgi çekici bir şekilde öğrenmişlerdir.

İSG Tabum oyununun içeriği ve mekaniği sürekli olarak gözden geçirilmeli ve güncellenmelidir. Oyun kartları ve senaryoları yeni güvenlik tehditlerine ve prosedürlerine göre revize edilmelidir. Bu, oyunu güncel tutacak ve katılımcıların güncel iş güvenliği ihtiyaçlarına daha iyi yanıt vermesini sağlayacaktır.

Oyunun kurumsal eğitim programlarına entegrasyonu desteklenmelidir. Oyunun şirketler içinde düzenli kullanımı teşvik edilmeli ve yeni çalışanlar için eğitimin bir parçası olarak sunulmalıdır. Bu entegrasyon, çalışanların sürekli eğitim almasını ve İSG kültürünü benimsemesini kolaylaştırmaktadır. İSG eğitimi yalnızca oyunlarla sınırlı olmamalıdır. Farklı öğrenme stilleri ve ihtiyaçlarını karşılamak için çeşitli materyaller (video, etkileşimli simülasyonlar, yazılı belgeler vb.) sağlanmalıdır. Bu, farklı öğrenme tercihlerine sahip katılımcıların etkili bir şekilde eğitilmesini sağlar.

Oyunun yanı sıra, İSG kültürünü güçlendirmek için sürekli eğitim ve farkındalık kampanyaları düzenlenmelidir. Bu süreçte üst yönetimin desteği ve katılımı kritik öneme sahiptir. Yönetim desteği, çalışanların İSG konularındaki motivasyonunu artırabilir ve eğitim programlarının başarısını pekiştirebilir. İSG eğitimleri kısıtlı bütçeler nedeniyle çeşitli teknolojik uygulamalarla (AR, VR vb.)

yapılmaya çalışılmakta ancak eğitimci merkezli pedagojik yaklaşımlar etkili yetişkin öğrenmesini engellemektedir. Bu nedenle eğitimlerin verimliliğini artırmak için katılımcı merkezli andragojik ilkeler programlara entegre edilmeli ve yetişkin katılımcıların aktif katılımı teşvik edilmelidir.

Gelecekteki araştırmaların İSG eğitimlerinde oyunlaştırmanın etkilerinin daha kapsamlı ve uzun vadeli çalışmalarla değerlendirilmesi teşvik edilmelidir. Bu çalışmalar oyunlaştırma yöntemlerinin farklı sektör ve ortamlardaki etkinliğini inceleyerek uygulamaların genel geçerliğini ve etkililiğini artırabilir.

Bu sonuçlar ve öneriler, İSG Tabum oyununun İSG alanında uygulanabilirliğini ve etkinliğini artırmak için atılabilecek adımları açıkça göstermektedir. Böylece çalışmanın sektöre ve uygulayıcılara katkıları somutlaştırılmıştır. İSG Tabum oyunu, etkili bir eğitim aracı olarak sektöre özgü tehlike tanımlarda ve risk değerlendirme temelinde iş kazalarını ve meslek hastalıklarını önlemede önemli bir potansiyele sahiptir.

TEŞEKKÜR

Bu araştırma, TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı (BİDEB) tarafından yürütülen, 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı 2023 yılı 1. dönem kapsamında 1919B012304693 numaralı " İş Sağlığı ve Güvenliği Eğitimlerinde Oyun: İSG TABUM" projesi ile desteklenmiş olup ve bu proje çıktılarından üretilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Méndez, J. I., Mata, O., Ponce, P., Meier, A., Peffer, T., & Molina, A. (207–235). Multi-sensor System, Gamification, and Artificial Intelligence for Benefit Elderly People. *Challenges and Trends in Multimodal Fall Detection for Healthcare*, 2020.
- [2] Reiners, T., Wood, L. C., Chang, V., Gütl, C., Herrington, J., Teräs, H., & Gregory, S. (2012). Operationalising gamification in an educational authentic environment. *IADIS International Conference on Internet Technologies & Society*, 93-100.
- [3] An, S., Cheung, C. F., & Willoughby, K. W. (2024). A gamification approach for enhancing older adults' technology adoption and knowledge transfer: A case study in mobile payments technology. *Technological Forecasting and Social Change*, 205, 1-21. doi:https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123456
- [4] Ceylan, H. (2012). Türkiye'deki İş Sağlığı ve Güvenliği Eğitimi Sorunlar ve Çözüm Önerileri. *Electronic Journal of Vocational Colleges*, 94-104. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/62602> adresinden alındı

- [5] Ünsar, A. S. (2004). İş Kazaları ve Örgütsel Verimlilik. *Verimlilik Dergisi*. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/verimlilik/issue/30735/332160> adresinden alındı
- [6] Aydoğan, R. (2022). İş Sağlığı ve Güvenliği Çalışmalarının Uygulanmasında İnsan Kaynakları Departmanının Rolü: Otomotiv Sektöründe Bir Araştırma, Yüksek Lisans Tezi. Bursa: Bursa Uludağ Üniversitesi.
- [7] Şimşek, M. Ş., & Öge, H. S. (2007). *Stratejik ve Uluslararası Boyutları ile İnsan Kaynakları Yönetimi*. Ankara: Gazi Kitabevi.
- [8] Kılıkış, İ. (2016). *İş Sağlığı ve Güvenliği*. Bursa: Dora.
- [9] Erdal, H. (2019). İş sağlığı ve güvenliği için Dematel-Aras tabanlı risk değerlendirme metodolojisi ve bir uygulama. *Manas Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 8(2), 1831-1853.
- [10] Durak, U., & Işık, A. (2022). İş Sağlığı ve Güvenliği Eğitimi Süreçlerinin Eğitim Teknolojisinin Temel Öğeleriyle Betimlenmesi. *Journal of Occupational Health and Safety Academy*, 5(3), 198-207. doi:10.38213/ohsacademy.1117318
- [11] Abatan, A., Jacks, B. S., Ugwuanyi, E. D., Nwokediegwu, Z. Q., Obaigbena, A., Daraojimba, A. I., & Lottu, O. A. (2024). The role of environmental health and safety practices in the automotive manufacturing industry. *Engineering Science & Technology Journal*, 5(2), 531-542. doi:https://doi.org/10.51594/estj.v5i2.830
- [12] World Health Organization. (2020). *Risk assessment*.
- [13] Duryan, M., Smyth, H., Roberts, A., Rowlinson, S., & Sherratt, F. (2020). Knowledge transfer for occupational health and safety: Cultivating health and safety learning culture in construction firms. *Accident Analysis & Prevention*(139), 1-13. doi:10.1016/j.aap.2020.105496
- [14] ciftelis.com. (2023, Mayıs 24). <https://www.ciftelis.com/sectorlere-gore-riskler/otomotiv-sektoru/>. Otomotiv Sektöründe Riskler: <https://www.ciftelis.com/sectorlere-gore-riskler/otomotiv-sektoru/> adresinden alındı
- [15] Stiles, S., Golightly, D., & Ryan, B. (2021). Impact of COVID-19 on health and safety in the construction sector. *31(4)*, 425-437. doi:https://doi.org/10.1002/hfm.20882
- [16] Sezgin, S., Bozkurt, A., Yılmaz, E. A., & Linden, N. v. (2018). Oyunlaştırma, Eğitim ve Kuramsal Yaklaşımlar: Öğrenme Süreçlerinde Motivasyon, Adanmışlık ve Sürdürülebilirlik. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Eğitim Fakültesi Dergisi*(45), 169-189. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/425180> adresinden alındı
- [17] Çalış, Ç., & Çalış, S. (2022). İş Sağlığı ve Güvenliği Teftişleri İş Kazalarını Azaltıyor mu? *Sosyal Güvenlik Dergisi, Cilt: 12, Sayı: 2*, 267-284. doi:10.32331/sgd.1223478

- [18] Wilkins, J. R. (2011). Construction workers' perceptions of health and safety training programmes. 1017-1026. doi:<https://doi.org/10.1080/01446193.2011.633538>
- [19] Haslam, R., Hide, S., Gibb, A., Gyi, D., Pavitt, T., Atkinson, S., & Duff, A. (2005). Contributing factors in construction accidents. *Applied Ergonomics*, 401-415. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2004.12.002>
- [20] Chittaro, L. (2016). Designing Serious Games for Safety Education: "Learn to Brace" versus Traditional Pictorials for Aircraft Passengers. *IEEE transactions on visualization and computer graphics* 22.5, 1527 - 1539. doi:10.1109/TVCG.2015.2443787
- [21] Gerling, K. M., Schild, J., & Masuch, M. (2010). Exergame design for elderly users: the case study of SilverBalance. *ACE '10: Proceedings of the 7th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, (s. 66-69). doi:<https://doi.org/10.1145/1971630.1971650>
- [22] Knowles, M. S., E. F., & Swanson, R. A. (2011). The adult learner: the definitive classic in adult education and human resource development. *Elsevier Butterworth-Heinemann*.
- [23] Albert, A., & Hallowel, M. R. (2013). Revamping occupational safety and health training: Integrating andragogical principles for the adult learner. *Australasian Journal of Construction Economics and Building*, 128-140. <https://search.informit.org/doi/abs/10.3316/informit.604940600883597> adresinden alındı
- [24] Taylor, B., & Kroth, M. (2009). 'Andragogy's Transition into the Future: Meta-Analysis of Andragogy and Its Search for a Measurable Instrument. *Journal of Adult Education*, 38 (1), 1-11. <https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ891073.pdf> adresinden alındı
- [25] Kirkpatrick, D. L. (1998). *Evaluating training programs: the four levels*. Berrett-Koehler Publishers.
- [26] Robertson, M. (2010). *Can't play, won't play. Hide & Seek: Inventing New Kinds of Play*. <http://www.hideandseek.net/2010/10/06/cant-play-wont-play/> adresinden alındı
- [27] Karagöz, Y. (2019). *SPSS - AMOS - META Uygulamalı İstatistiksel Analizler*. Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık.
- [28] Büyüköztürk, Ş. (2023). *Sosyal Bilimler için Veri Analizi El Kitabı*. Ankara: Pegem Akademi Yayıncılık.
- [29] Seçer, İ. (2023). *SPSS ve LISREL ile Pratik Veri Analizi*. Ankara: Anı Yayıncılık.
- [30] Nykänen, M., Puro, V., Tiikkaja, M., Kannisto, H., Lantto, E., Simpura, F., Teperi, A.-M. (2019). Evaluation of the efficacy of a virtual reality-based safety training and human factors training method: study protocol for a randomised-controlled trial. 26(4), 1-10. doi:10.1136/injuryprev-2019-043304
- [31] Cavalcanti, J., Valls, V., Contero, M., & Fonseca, D. (2021). Sanal Gerçeklikte Oyunlaştırma ve Tehlike İletişimi: Nitel Bir Çalışma. *Sensors*, 21(14), 2-19. doi:<https://doi.org/10.3390/s21144663>
- [32] Lavoué, É., Monterrat, B., Desmarais, M., & George, S. (2019). Adaptive Gamification for Learning Environments. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 12(1), 16-28. doi:10.1109/TLT.2018.2823710
- [33] Ryan, R. M., Rigby, C. S., & Przybylski, A. (2006). The Motivational Pull of Video Games: A Self-Determination Theory Approach. *Motivation and Emotion*, 30, 344-360. doi:<https://doi.org/10.1007/s11031-006-9051-8>
- [34] Villegas, E., D. F., Peña, E., Bonet, P., & Fernández-Guinea, S. (2021). Qualitative Assessment of Effective Gamification Design Processes Using Motivators to Identify Game Mechanics. *Sensors*, 21(7). doi:<https://doi.org/10.3390/s21072556>
- [35] Savignac, E. (2017). *The gamification of work: The use of games in the workplace*. New York, USA: Wiley Publishing.
- [36] Capatina, A., Juarez-Varon, D., Micu, A., & Micu, A. E. (2024). Leveling up in corporate training: Unveiling the power of gamification to enhance knowledge retention, knowledge sharing, and job performance. *Journal of Innovation & Knowledge*, 9(3), 2-15. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jik.2024.100530>
- [37] Tay, J., Safiena, S., Lan, T., Lim, M. S., & Goh, Y. M. (2024). Design for safety training for construction professionals: A digital game-based learning approach. *Safety Science*, 177. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106588>
- [38] Hejduk, I., & Tomczyk, P. (2015). Young Workers' Occupational Safety Knowledge Creation and Habits. *Procedia Manufacturing*, 3, 395-401. doi:<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.184>

PMMA Nanokapsüllerin Çeşitli Formülasyon Değişkenlerinin Boyut, Morfoloji ve Zeta Potansiyel Üzerine Etkisinin İncelenmesi

Investigating the Effects of Various Formulation Variables on the Size, Morphology and Zeta Potential of PMMA Nanocapsules

Banu İYİSAN¹ 

¹Boğaziçi Üniversitesi, Biyomedikal Mühendisliği Enstitüsü, Biyofonksiyonel Nanomalzeme Tasarım Laboratuvarı, 34684, İstanbul, Türkiye

Öz

Bu çalışmanın amacı sağlık uygulamalarında geniş bir kullanım alanına sahip Polimetil Metakrilat (PMMA) nanokapsüllerin çeşitli formülasyon değişkenlerinin boyut, morfoloji ve zeta potansiyel üzerine etkisinin incelenmesi ve buradan elde edilen sonuçlarla formülasyon bileşenleri ile üretim sürecinin iyileştirilmesidir. Çalışmada, PMMA nanokapsüller miniemülsiyon çözücü buharlaştırma yöntemi kullanılarak başarı ile üretilmiş olup, elde edilen nanokapsüllerin karakterizasyonu ise dinamik ışık saçılımı yöntemi, elektroforetik ışık saçılımı yöntemi ve transmisyon elektron mikroskobu kullanılarak boyut, zeta potansiyel ve morfolojinin belirlenmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma sürecinde PMMA miktarı artışı nanokapsül boyutunun artışına neden olmuş ve morfolojinin kapsülden küre formuna dönüşümü görülmüştür. Benzer şekilde sürfaktan miktarının artışı da morfoloji değişimine neden olmuş olup, sürfaktan miktarı azalışı ise boyutu önemli derecede artırmıştır. Çalışmanın bir diğer önemli bulgusu ise pirinç kepeği yağı içeren PMMA nanokapsül formülasyonunun miniemülsiyon çözücü buharlaştırma yöntemi ile başarı ile üretildiği, ancak miniemülsiyon polimerizasyonunun bu noktada uygun bir üretim yöntemi olmadığıdır. Çalışmanın son adımında, optimum formülasyonu belirlenen PMMA nanokapsüllerinin yüzey özelliklerinin biyolojik perspektif ile iyileştirilmesine odaklanılmıştır. Bu amaçla yenilikçi ve pratik bir yaklaşımla yüzeyin polietilen glikol (PEG) bazlı sürfaktanlar ile kaplanması gerçekleştirilmiştir. Bunun ilerleyen çalışmalarda nanokapsüllerin kan akışında kalış süresini artırma potansiyeli olduğu düşünülmektedir. Çalışma sürecinde elde edilen üretim süreci ve formülasyonun iyileştirilmesine yönelik tüm bulgular, PMMA nanokapsüllerin sağlık uygulamalarında etkinliğinin artırılmasına katkı sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Polimer Nanokapsüller, Nanopartikül Morfolojisi, Polimetil Metakrilat, Zeta Potansiyel, Nanokarakterizasyon

Abstract

The aim of the study is to investigate the effect of various formulation variables on the size, morphology, and zeta potential of PMMA nanocapsules, and to improve the formulation components and production process based on the results obtained. PMMA nanocapsules have been successfully produced using the miniemulsion solvent evaporation method and the characterization of the obtained nanocapsules was conducted by determining the size, zeta potential, and morphology using dynamic light scattering, electrophoretic light scattering methods, and transmission electron microscopy. During the study, an increase in the amount of PMMA led to an enlargement in nanocapsule size and the morphology changed from capsule to spherical form. Similarly, increasing surfactant amounts also changed the morphology, whereas a decrease in surfactant amount significantly increased the size. Another important finding was that PMMA nanocapsules containing rice bran oil could be successfully produced using the miniemulsion solvent evaporation method, yet miniemulsion polymerization was not found to be a suitable production method at this stage. In the final step of the study, the focus was to enhance the surface characteristics of the optimally formulated PMMA nanocapsules from a biological perspective. For this purpose, an innovative and practical approach was employed to coat the surface of the nanocapsules with PEG-bearing surfactants. This has the potential to increase the circulation time of the nanocapsules in the bloodstream in future studies. All findings related to the production process and formulation improvements obtained within the study will contribute to enhance the efficacy of PMMA nanocapsules in future biomedical applications.

Keywords: Polymer Nanocapsules, Nanoparticle Morphology, Polymethyl Methacrylate, Zeta Potential, Nanocharacterization

I. GİRİŞ

Sağlık alanında nanoteknolojinin kullanımı, son yıllarda artan bir ivme ile tıp ve ilaç sektöründe teşhis ve tedaviye yönelik yenilikçi ürünlerin geliştirilmesine olanak vermektedir. Özellikle polimerik nanopartiküller; polimerlerin kimyasal çeşitlilikleri, yüzey, morfoloji ve boyut özelliklerinin nano ölçekteki kontrol olanağı ile ilaç salım uygulamaları, medikal görüntüleme, doku mühendisliği ile aşı formülasyonları gibi birçok ileri düzey kullanım alanı içerisinde yer bulmaktadır.

Polimer nanopartiküller; nanoküre veya nanokapsül morfolojisinde olmak üzere iki farklı şekilde üretilebilir [1]. Polimer nanokapsüller, bir polimer kabuk ile çevrelenmiş sulu veya yağlı bir çekirdek yapıdan oluşmakta olup, nanoküre morfolojisine göre birtakım avantajlara sahiptir. Bu rezervuar tipi nanopartiküller, çok çeşitli ilaçları polimer kabukları içine hapsederek taşıma sırasındaki biyolojik bozunmayı önler ve istenmeyen sızıntıları engeller. Böylece, ilacın hedef noktaya etkin bir şekilde ulaşmasına katkıda bulunurlar. Diğer yandan, polimer nanokapsüllerin hem kabuklarına hem de çekirdek içerisine farklı fizikokimyasal özelliğe sahip moleküller yerleştirilebilir. Bu sayede aynı anda birden fazla tedavi veya tedavi ile teşhisi eş zamanlı sağlayacak farklı kombinasyonlarda nanotaşıyıcı yapılar formüle edilebilir. Ayrıca, polimerlerin fonksiyonel gruplarla modifiye edilme potansiyeli, nanopartikül yüzeyinin uygulamaya yönelik olarak işlevsellik kazanmasını sağlar. Bu durum, nanopartiküllerin biyolojik ortamlarla olan etkileşimlerini makromoleküler mühendislik yoluyla etkin bir şekilde kontrol etmek için temel bir rol oynar. Tüm bu avantajlar nanokapsül morfolojisinin sağlık alanındaki uygulamalarda son yıllardaki artışını ve önemini vurgulamaktadır. Klinik uygulamada başarı için ideal bir nanopartikül yapısının yüksek kapasitede ilaç ve türevlerini taşıma özelliği yanında, hedefli ve kontrollü ilaç salımı ve/veya teşhis özelliği ile kan akışında yeterli dolaşım süresi gibi bir takım anahtar özelliklere sahip olması gerekmektedir [2-6]. Bu ideal duruma ulaşabilmek ancak nanopartiküllerin boyut, yüzey özellikleri, kolloidal stabilitesi, formülasyon bileşimi, üretim yöntemi ve koşulları ile morfolojik yapısının hassas ve optimum bir şekilde tasarlanması ile gerçekleştirilebilir.

Polimer nanokapsüllerin üretim yöntemleri arasında miniemülsiyon polimerizasyonu (MEP), miniemülsiyon çözücü buharlaştırma yöntemi (MÇBY) [7, 8], katman-katman birleştirme yöntemi (LBL), inorganik nanoparçacıkların şablon olarak kullanıldığı ve polimer ile kaplandıktan sonra polimerizasyon ile polimer oluşumu sağlandıktan sonra inorganik yapının ortamdaki uzaklaştırıldığı çeşitli yöntemler [9-11] dikkat çekmektedir. Diğer yandan, amfifilik blok kopolimerlerin kendiliğinden organize olarak oluşturduğu içi sulu çekirdek / polimer membran yapısındaki polimerzomların formülasyonları da bir

başka üretim yöntemi olarak göze çarpmaktadır [12-14]. Üretim yöntemleri nanopartikülün boyut, yüzey özellikleri üzerine etkili olduğu gibi morfolojik yapının nanokapsül veya nanoküre oluşumunda da rol oynamaktadır. Bu yöntemler içerisinde miniemülsiyon çözücü buharlaştırma yöntemi ve miniemülsiyon polimerizasyon yöntemi ile çok çeşitli polimer nanoküreler, polimer nanokapsüller farklı biyomedikal uygulamalar için üretilmiştir [2]. Nanoteranostik uygulamalar için üretilen bazı ışık duyarlı nanokapsül formülasyonlarında fotoaktif moleküllerin polimerizasyon sürecinde bozunması gibi nedenler, bu tip yapıların miniemülsiyon çözücü buharlaştırma yöntemi ile hazır polimerler kullanılarak üretilmesine neden olmuştur [15]. Bu ve benzeri enkapsülasyon süreçlerinin olumsuz etkilenme potansiyeli, üretim yönteminin seçiminde önemli bir rol oynamaktadır. Diğer yandan bu üretim yaklaşımı ile hem su içinde yağ (Y/S) miniemülsiyonu, hem de yağ içinde su (S/Y) miniemülsiyonu hazırlanabilmektedir. Bu da nanokapsül formülasyonunun uygulamaya yönelik olarak hem içi yağlı çekirdek hem de içi sulu çekirdek olarak tasarlanabildiğini göstermektedir.

Miniemülsiyon bazlı üretim yöntemleri uygulanarak çeşitli polimer nanoküreler ve nanokapsüller farklı boyutlarda ve yüzey özelliklerinde üretilebilir. Bunlar içerisinden polimetil metakrilat (PMMA) nanokapsüller, hem hazır PMMA kullanılarak miniemülsiyon çözücü buharlaştırma yöntemi ile, hem de metil metakrilat (MMA) monomeri kullanılarak polimerizasyon ile üretilebilmektedir. PMMA biyoyumlu bir polimer olup; ortopedik dolgular, ortodonti uygulamaları, katarakt ameliyatları sonrası kullanılan intraoküler lensler gibi çeşitli biyomedikal uygulamalarda sıklıkla güvenli bir şekilde kullanılmaktadır [16]. Buna ilaveten, PMMA nanopartiküller aşı uygulamaları [17, 18], ilaç salım sistemlerinde melanoma tedavisi [19], çeşitli antibiyotiklerin taşınımı [20], hücre içine alım çalışmaları [21], nanoteranostik olarak hücre içi sıcaklık sensör uygulamaları [15] ve çeşitli antiseptik moleküllerin taşınması [22] gibi bir çok çalışmada da yer almaktadır. PMMA nanopartiküllerin üretim çeşitliliği ve kolaylığına ilaveten, sağlık alanındaki geniş kullanım alanı, polimerin kimyasal bozunmaya karşı dirençli olması, birçok ilaç ve türevi için yüksek taşıma kapasitesi, biyoyumlu yapısı gibi özellikleri bu yöndeki çalışmaların son yıllarda artmasına neden olmuştur.

Tüm bunların ışığında, bu çalışmanın amacı, Şekil 1'de özetlendiği şekilde sağlık uygulamalarında geniş bir kullanım alanına sahip PMMA nanokapsüllerin çeşitli formülasyon değişkenlerinin boyut, morfoloji ve zeta potansiyel üzerine etkisinin incelenmesi ve buradan elde edilen sonuçlarla formülasyon bileşenleri ile üretim sürecinin iyileştirilmesidir. Morfolojik yapının etkisi ilerleyen çalışmalarda yapının ilaç ve türevlerini taşıma kapasitesine etkili olacak olup, boyut ve zeta

potansiyel özellikleri nanopartiküllerin biyolojik ortam ile etkileşimi ve hücre içine alım özelliklerine etki edecektir. Nanopartiküllerin kan akışında yeterli süre dolaşabilmesi için yüzeyin iyonik olmayan, polietilen glikol (PEG) bazlı sürfaktanlar ile yenilikçi ve kolay bir yaklaşımla modifiye edilmesi de çalışmanın son adımı olarak gerçekleştirilecektir.



Şekil 1. Çalışmanın Şematik Özeti: PMMA Nanokapsüllerin Formülasyon, Üretim Yöntemi, Morfolojik Yapısı ve PEGilasyon Süreci Dahil Yüzey Özelliklerinin İyileştirilmesi

II. MATERYAL VE METOD

2.1. Malzeme

Polimetil metakrilat (PMMA, 350 kDa, 120 kDa, 94.6 kDa, 35 kDa), sodyum dodesil sülfat (SDS, %99, iyonik sürfaktan), metil metakrilat (MMA, 99%), 2,2'-Azobis(2-metilbütironitril) (AIBN, \geq 98%), hegzadekan (99%) Sigma-Aldrich'ten satın alınmıştır. Kloroform Acros Organics'ten elde edilmiştir. Pirinç kepeği yağı, TEA Natura (TEA Prodotto Naturali di Manzotti P., İtalya) firmasından satın alınmıştır. Lutensol AT 50 toz formunda (iyonik olmayan sürfaktan, alkilpolietilen glikol eter, Mw: 2460 g/mol) BASF firmasından temin edilmiştir. İki farklı molekül ağırlığı ayırma sınırına sahip rejenere selülozdan yapılmış diyaliz membranları (moleküler ağırlık ayırma sınırı 6-8 kDa ve 1 kDa) Carl Roth'tan satın alınmıştır.

2.2. Nanokapsüllerin Sentezi

Nanokapsül sentezi iki yöntem uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Bunlardan ilki olan miniemülsiyon çözücü buharlaştırma yöntemi (MÇBY) Tablo 1'de görülmekte olan PNK1 – PNK8 nanokapsüllerinin üretiminde kullanılmıştır [7, 8, 15]. Sentez şu şekilde gerçekleştirilmiştir: Tablo 1'de belirtilmiş olan farklı miktarlarda (150, 200 ve 300 mg) PMMA, kloroform (1.8 mL) içerisinde çözülmüş ve bu çözelti, pirinç kepeği yağı (300 mg) ile karıştırılarak emülsiyonun dağılma fazı (iç faz) oluşturulmuştur. Buna paralel olarak, yüzey aktif madde (SDS, 25 mg, 10 mg, 3.5 mg) ultra saf suda (10 mL) çözülerek sürekli faz (dış faz) oluşturulmuştur. Bu iki faz bir saat boyunca 1000 rpm'de karıştırılarak makroemülsiyon elde edilmiştir. Bunu takiben, makroemülsiyon buz soğutması altında sonikatör (Branson Sonikatör W450) ile %90 genlikte 2 dakika boyunca homojenizasyona tabi tutulmuştur (10 saniye darbe/10 saniye mola). Son adımda, elde edilen nanoemülsiyon 30 °C'de 16 saat boyunca 300 rpm'de karıştırılarak kloroform uçurulmuş ve bunu

takiben nanokapsüller fazla SDS'yi uzaklaştırmak amacıyla ultra saf suya karşı diyalize (moleküler ağırlık kesme limiti, MWCO 6-8 kDa) tabi tutularak karakterizasyon için hazır hale getirilmiştir.

İkinci yöntem olarak, miniemülsiyon polimerizasyonu (MEP) Tablo 2'de görülmekte olan PNK9-PNK10 nanokapsüllerinin sentezi için uygulanmıştır [7, 8, 23]. Bu amaçla metil metakrilat (MMA, 1 g) monomeri nötr alüminyum oksit üzerinden geçirilerek saflaştırılmış ve ardından başlatıcı olarak kullanılan AIBN (44 mg) ve nanokapsül çekirdek malzemesi olarak enkapsüle edilmesi planlanan yağ fazı ile karıştırılmıştır. Kullanılan yağ fazı PNK9 için sadece pirinç kepeği yağı olup (2 g), PNK10 için ise eşit miktarlarda pirinç kepeği yağı (1g) ve hegzadekandan (1g) oluşturulmuştur. Oluşturulan bu dağılma fazı, sulu SDS çözeltisi (1 mg/mL) ile 1 saat boyunca 1000 rpm'de karıştırılarak makroemülsiyon oluşturulmuştur. Bunu takiben, makroemülsiyon buz soğutması altında sonikatör (Branson Sonikatör W450) ile %90 genlikte 2 dakika boyunca homojenizasyona tabi tutulmuştur (10 saniye darbe/10 saniye mola). Ardından azot ortamı altında 68 °C'de 18 saat boyunca polimerizasyon gerçekleştirilerek, filtrasyon ve son olarak yukarıda anlatıldığı şekilde nanokapsülleri saflaştırmak amacıyla ultra saf suya karşı diyalize (moleküler ağırlık kesme limiti, MWCO 6-8 kDa) tabi tutularak karakterizasyon için hazır hale getirilmiştir.

2.3. Nanokapsüllerin Karakterizasyonu

Nanokapsüllerin karakterizasyonu boyut, zeta potansiyel ölçümü ve morfolojik karakterizasyon şeklinde yürütülmüştür. Nanokapsül boyutu hidrodinamik çapın dinamik ışık saçılım (PSS Nicomp 380, Parçacık Boyutlandırma Sistemleri, ABD) metodu ile ölçümü şeklinde belirlenmiştir. Ölçümler, 20°C'de ve sabit 90° açıda yapılmıştır. Nanokapsüllerin zeta (ζ) potansiyeli, elektroforetik ışık saçılım metodu kullanılarak, Zetasizer Nano Z cihazı (Malvern Instruments, UK) ile 1 mM potasyum klorür çözeltisi (1 mL) içinde 25 °C'de belirlenmiştir. Morfolojik yapı, transmisyon elektron mikroskobu (TEM) kullanılarak incelenmiştir. TEM, 120 kV hızlandırma voltajında çalışan bir JEOL 1400 transmisyon elektron mikroskobu (Jeol Ltd., Tokyo, Japonya) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Örnekler, seyreltilmiş nanokapsül dispersiyonlarının 300 mesh karbon kaplı bakır gridlerin üzerine damlatılması ve kurumadan kaynaklı artefaktları azaltmak için fazla suyun bir filtre kağıdı kullanılarak alınmasıyla hazırlanmıştır.

2.4. Sürfaktan Değişim Yöntemi ile PEGilasyon İşlemi

Bu işlem formülasyon parametrelerinden PMMA miktarı ve molekül ağırlığı, sürfaktan miktarı ile üretim yönteminin boyut, zeta potansiyel ve morfoloji üzerine olan etkisinin sonuç ve tartışma bölümünde detaylı değerlendirilmesi ile optimum olarak belirlenen PNK1 nanokapsülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla PNK1 nanokapsülü (2 mL) içerisine farklı

miktarlarda (4 mg, 8 mg, 12 mg) iyonik olmayan sürfaktanlardan alkilpolietilen glikol eter yapısındaki Lutensol AT50 (BASF, MW: 2460 g/mol) eklenerek, oluşan karışım 3 saat boyunca 300 rpm hızında karıştırılmıştır. Nanokapsül yüzeyi ile etkileşim içerisinde olması beklenen Lutensol AT50 sürfaktanlarının iyonik yapıdaki SDS sürfaktanı ile yer değiştirmesini sağlamak amaçlı ilerletilen bu metodolojinin devamında SDS'in ortamdan uzaklaştırılması için 1 kDa moleküler ağırlık ayırma sınırına sahip rejener selülozdan oluşan membran ile 24 saat boyunca ultra saf suya karşı diyaliz gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte belli zaman aralıklarında (17 sa., 21 sa., 24 sa.) diyaliz membranından numune alınarak, ilgili numunelerin zeta potansiyel ölçümleri yapılmıştır. Her ölçüm sonrası numune diyaliz membranına geri koyularak, zeta potansiyel değerleri sabit olana kadar diyaliz işlemi devam ettirilmiştir. Son numunenin boyut ölçümü yukarıda anlatıldığı şekilde dinamik ışık saçılım (PSS Nicomp 380, ABD) metodu ile belirlenerek, işlem öncesi ve sonrası boyut değerleri karşılaştırılmıştır.

III. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Çalışmanın ilk adımında PMMA nanopartikülleri miniemülsiyon çözücü buharlaştırma yöntemi (MÇBY) kullanılarak farklı formülasyonlarda üretilmiştir. Bu işlem için kısaca su içinde yağ (y/s) tipi bir emülsiyon oluşturulmuş ve yağ damlacıklarının su içerisindeki stabilizasyonu için iyonik bir sürfaktan olan SDS kullanılmıştır. Bu işlemde, yağ fazı olarak biyoyumlu yapıyı destekleyecek şekilde bitkisel yağlardan pirinç kepeği yağı kullanılmış olup, daha önce nanoteranostik olarak hücre içi sıcaklık ölçümünde kullanılan MÇB üretim yöntemi dikkate alınarak ilerlenmiştir [15]. Yağ fazı, Tablo 1'de görüldüğü üzere farklı formülasyonlarda değişen PMMA polimer miktarlarının organik bir çözücüde (kloroform) çözünmüş şekli ile karıştırılmış ve emülsiyonun iç fazını oluşturmuştur. Su fazı ve dağılma fazı karıştırılarak elde edilen makroemülsiyon ultrasonikasyona tabi tutularak nanodamlacık oluşumu, bir diğer değişle miniemülsiyon eldesi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen miniemülsiyondan organik çözücünün (kloroform) yavaş bir şekilde buharlaştırılması ile PMMA polimerlerinin pirinç kepeği nanodamlacıkları üzerine kaplayarak kapsül morfolojisine ulaşması hedeflenmiştir. Burada çözücünün buharlaşma hızının da morfolojide etkili bir faktör olduğu bilinmekle birlikte, bu adım önceki çalışmalardan elde edilen bilgiler [2, 15] ile 16 saatlik bir buharlaştırma süresi olarak sabit tutulmuştur.

Tablo 1, MÇBY ile sekiz farklı formülasyon ile üretilen PMMA nanopartiküllerinin ortalama boyut ve zeta potansiyel değerlerini göstermektedir. Çalışmanın ön denemelerinde, TWEEN 80 gibi iyonik olmayan ve

farmasötik uygulamalarda sıklıkla kullanılan yüzey aktif maddeler de stabilizatör olarak kullanılmış olmakla birlikte, nanopartiküller bu şekilde başarı ile üretilmemiş ve boyutları 700 nm ile 1 mikron arasında değişen çeşitli agregat yapılar oluşmuştur. Bu nedenle çalışma iyonik bir yüzey aktif madde ile devam ettirilmiş olup, formülasyon içeriğindeki malzemelerin miktarları değiştirilerek ilerlenmiştir. İlk aşamada, PMMA miktarının (Tablo 1, PNK1, PNK2, PNK3) artırılması ve bunun ortalama boyut üzerine etkisi değerlendirilmiş olup, miktarın 150 mg değerinden 300 mg değerine çıkarılması boyutun yaklaşık 40 nm kadar büyümesine neden olmuştur. Bu artış önemli bir değişim gibi görünmese de, Şekil 2 a, b ve c'de görülen Transmisyon Elektron Mikroskobu (TEM) analizlerinde, PMMA miktarı artışının partiküllerin morfolojisini nanokapsülden nanoküre durumuna dönüştürdüğü görülmüştür. Bunun nedeni artan PMMA miktarının üretim sırasında çözücü buharlaştırma adımıyla sadece yağ damlacığı ve su ara fazında çökme şeklinde değil, tüm damlacığı kapsayacak şekilde çökmesi olduğu düşünülmektedir. Şekil 2c'de yer yer kapsül morfolojileri görülmekle beraber, morfoloji büyük ölçüde nanoküre formuna geçmiştir. Bu nedenle PMMA miktarının en düşük olduğu 150 mg (PNK1) seçilerek, ikinci adımda sürfaktan miktarının değişiminin etkisi incelenmiştir. Buradaki amaç SDS miktarının olabildiğince az kullanılması ile partikül büyüklüğü ve partikül şekli değişiminin test edilmesidir. Tablo 1'de görüldüğü üzere SDS miktarı 2.5 kat artırıldığında boyutta 30 nm kadar bir artış gözlenmekle beraber, zeta potansiyel değeri beklenildiği üzere -51 mV değerinden -72 mV değerine çıkmıştır. Her iki değer de DLVO teorisi dikkate alındığında itme kuvvetlerinin, çekme kuvvetlerinden daha yüksek olduğunun ve nanodamlacıkların birbirleri ile birleşmeyerek su içerisinde stabil olarak dağılacığının göstergesidir [24]. Bir diğer deyişle, nanopartiküller her iki durumda da stabil olup, Şekil 2e'de artan SDS miktarının (PNK4) morfolojiyi nanokapsülden uzaklaştırdığı görülmektedir. Nanokapsül morfolojisini elde etmede, emülsiyon içerisindeki fazların arayüzey gerilimlerinden kaynaklı olarak polimer nanopartiküller ile yağ damlacıklarının iki ayrı faz olarak ayrılabilmesi ve sonunda kapsül değil, heterojen bir nanoküre morfolojisine ulaşabileceği önceki çalışmalarda görülmüştür [23]. Diğer yandan nanopartiküllerin yüzeyleri çok yüksek negatif veya pozitif yükler taşıdığına, kan içerisindeki biyomoleküller ile etkileşimi sonucu agregasyon gibi olumsuz sonuçların oluşabileceği çalışmalar da mevcuttur [25]. Tüm bunlar düşünüldüğünde SDS miktarının artışı uygun olarak değerlendirilmemiş, miktarın 1 mg/mL değerinden (PNK1, Tablo 1, Şekil 2a,d) 0.35 mg/mL değerine (PNK5, Tablo 1, Şekil 2f) düşürülerek boyut, zeta potansiyel ve morfoloji üzerine etkisi değerlendirilmiştir. SDS miktarının yarıdan daha

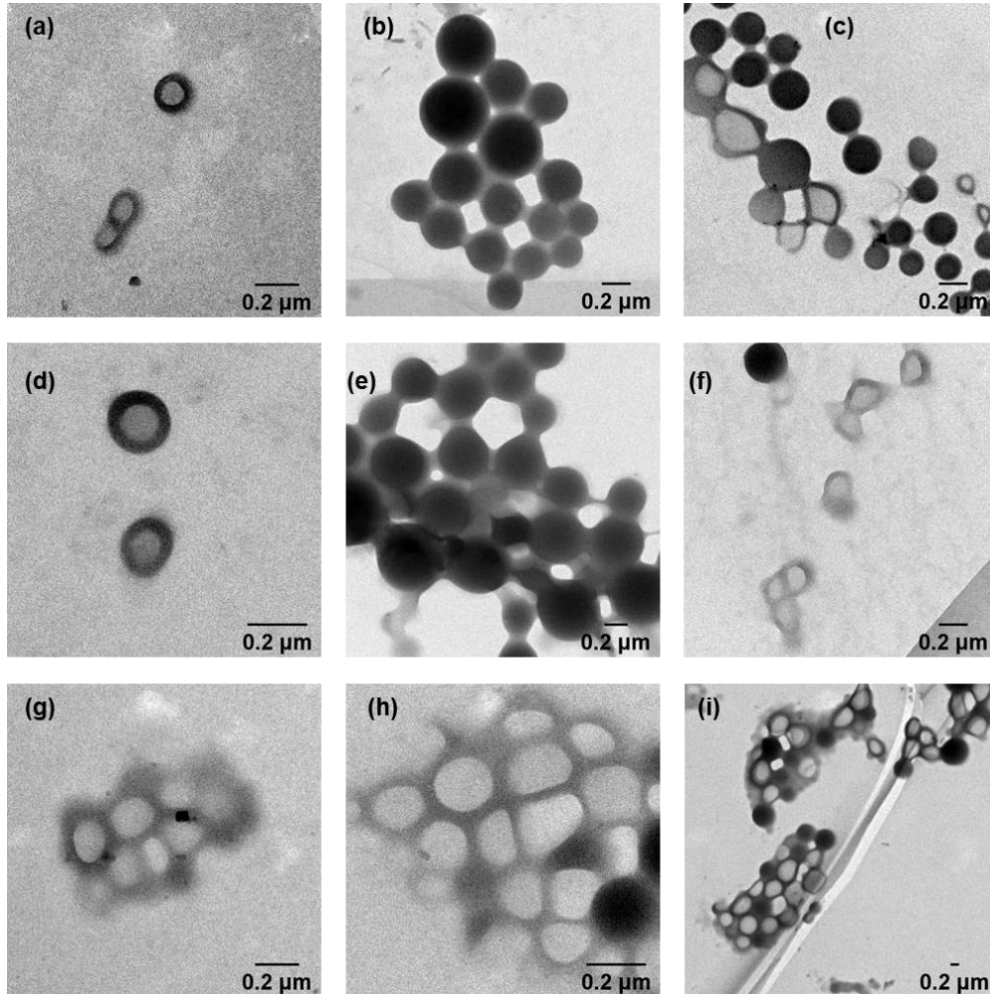
fazla azaltılması sonucu nanokapsül morfolojisi büyük ölçüde korunmakla beraber (Şekil 2f), boyut 220 nm civarından 340 nm'ye yükselmiştir. Diğer yandan zeta potansiyel değerinde önemli sayılabilecek bir azalış görülmemiş, nanopartiküller (Tablo 1, PNK4, -50.9

mV) stabilitesini sürdürmüştür. Gelinen noktada, optimum SDS miktarı 1 mg/mL olarak belirlenmiş olup, çalışmalara bu şekilde devam edilmesine karar verilmiştir.

Tablo 1. Nanokapsül Kabuk (PMMA: Polimetil Metakrilat) Miktarı ve Molekül Ağırlığı ile Sürfaktan Miktarı (SDS: sodyum dodesil sülfat) Değişimin İncelenmesi

Nanokapsül Kodu	Kabuk: PMMA Miktarı (mg)	Kabuk: PMMA Molekül Ağırlığı (kDa)	Sürfaktan: SDS Miktarı (mg/mL)	Ortalama Boyut (nm)	Zeta Potansiyel (mV)
PNK1	150	120	1	222±0.4	-51.4±1.1
PNK2	200	120	1	257±1.6	-57.7±0.9
PNK3	300	120	1	266±0.5	-59.3±1.5
PNK4	150	120	2.5	252±0.6	-72.2±0.6
PNK5	150	120	0.35	340±9.2	-50.9±0.7
PNK6	150	35	1	181±1.7	-58.9±1.4
PNK7	150	94.6	1	201±3.4	-55.9±0.8
PNK8	150	350	1	264±0.6	-69.6±1.2

*Çekirdek malzemesi olarak pirinç kepeği yağı 300 mg olarak sabit miktarda kullanılmıştır. Üretim, Miniemülsiyon Çözücü Buharlaştırma Yöntemi (MÇBY) ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Morfolojik Karakterizasyon. Transmisyon Elektron Mikroskobu Sonuçları (a) PNK1, (b) PNK2, (c) PNK3, (d) PNK1, (e) PNK4, (f) PNK5, (g) PNK6, (h) PNK7, (i) PNK8.

Çalışmanın devamında, 150 mg PMMA miktarı ve 1 mg/mL SDS miktarı ile devam edilerek, farklı molekül ağırlığında PMMA polimerinin nanopartiküllerin boyut, zeta potansiyel ve morfolojisi üzerine etkisi incelenmiştir. Tablo 1’de listelenen nanopartikül formülasyonlarına bakıldığında 4 farklı molekül ağırlığında (35 kDa, 94.6 kDa, 120 kDa, 350 kDa) PMMA’in formülasyonda denenmesi ile boyut ve zeta potansiyel değerlerinin farklılaştığı görülmektedir. Buradaki eğilim, beklendiği üzere PMMA polimerinin molekül ağırlığı arttıkça nanopartiküllerin ortalama boyutunun da arttığı yönündedir. 35 kDa PMMA kullanıldığında boyut 181 nm iken (PNK6, Tablo 1) 350 kDa PMMA kullanıldığında boyut 264 nm olarak belirlenmiştir. Zeta potansiyel değerlerine baktığımızda, yine DLVO teorisi dikkate alındığında, nanodamlacıklar arasında sürfaktanların oluşturduğu itme kuvvetinin çekme kuvvetlerinden daha yüksek olduğu ve yüksek zeta potansiyel değerlerinin (>-30 mV) tüm nanopartiküllerde görüldüğü, dolayısıyla koloidal stabilitenin sağlandığı sonucuna varılmıştır [24]. Ancak PNK4 nanopartikülünde bahsedildiği üzere, çok yüksek zeta potansiyel değerlerinin kan içerisindeki biyomoleküller ile etkileşim sırasında istenmeyen stabilite problemlerine de neden olabileceği not edilmelidir [25]. Şekil 2 incelendiğinde PNK1, PNK6 ve PNK7 nanopartiküllerinin kapsül morfolojisini koruduğu ancak molekül ağırlığı 350 kDa olan PMMA ile üretilen PNK8 nanopartiküllerin hem nanokapsül hem de nanoküre morfolojisi olmak üzere heterojen bir yapıda sonuçlandığı görülmüştür. Bunun nedeni olarak, yüksek molekül ağırlığının daha önce yüksek miktarda kullanılan PMMA nanopartikül üretiminde belirttiğimize benzer şekilde (PNK3, Tablo 1) üretim sırasında çözücü buharlaştırma adımı PMMA polimerinin yer yer tüm damlacığı kaplayacak şekilde çökmesi olduğu düşünülmektedir. Diğer yandan, burada hedef boyutun 200 nm civarlarında tutularak, ilerleyen çalışmalarda artırılmış geçirgenlik ve tutulum (EPR: Enhanced Permeability and Retention) etkisinden yararlanmak üzere kanserde pasif hedeflendirme uygulamalarında kullanıma potansiyelini saklı tutmaktır [26]. Sonuç olarak, çalışmanın bu adımı PMMA miktarı, molekül ağırlığı ve sürfaktan miktarı olmak üzere üç farklı parametrenin değişimi incelenmiştir. Bu grup içerisinden PNK1 formülasyonu 200 nm civarına yakın ortalama boyutu, yüksek zeta potansiyeli ile sağladığı koloidal stabilitesi ve morfolojik analizlerinde görülen net, homojen kapsül görüntüleri ile uygun bulunmuş olup, çalışmanın devamında farklı parametreler bunu baz alarak değerlendirilmiştir.

Çalışmanın bir sonraki adımı üretim yönteminin etkisi incelenmiştir. Tablo 1 ve Şekil 2’de görülmekte olan 8 farklı formülasyon ile MÇBY ile üretilen PMMA nanopartiküllerinin MEP ile üretimi değerlendirilmiştir. Burada, MMA monomerinin

radikal polimerizasyonu miniemülsiyon içerisinde gerçekleştirilerek, oluşan PMMA polimerinin yağ/su arafazında çökmesi ve kapsül oluşumunun sağlanması hedeflenmiştir. Bu tip üretimler sırasında Y/S emülsiyon sistemlerinde monomer damlacıkları içerisine Ostwald olgunlaşması (Ostwald ripening) etkisini ortadan kaldırmak için, yüksek hidrofobik özellikte bir yardımcı molekül eklendiği bilinmektedir. Bu amaçla genellikle hegzadekan kullanılmakta olup, literatürde bu şekilde üretilen PMMA nanokapsüller vardır [7, 8]. Ancak ürünün farmasötik olarak kullanılabilmesi için kapsül içerisinde biyoyumlu bir yağ olması hedeflendiğinden, çalışmada yine benzer şekilde öncelikle pirinç kepeği yağı kullanılmasına karar verilmiştir. Tablo 2’de görüldüğü üzere sürfaktan miktarı MÇBY yöntemi ile aynı tutulmuş olup, saflaştırılan MMA monomeri, radikal polimerizasyon işlemleri için gerekli olan başlatıcı molekül (AIBN) ve pirinç kepeği yağı ile karıştırılarak iç fazı oluşturmuştur. Ardından sulu sürfaktan fazı ile karıştırılarak makroemülsiyon oluşturulmuş ve bunu takiben ultrasonikasyon ile su içerisindeki nanodamlacıkların oluşumu sağlanmıştır. Polimerizasyonun 18 saat boyunca 68 °C’de azot ortamında gerçekleştirilmesi ile nanopartiküller elde edilmiştir. Bu işlemde başlatıcı ile reaksiyona girmeyen monomeri ortamdan uzaklaştırmak için, nanopartiküller saflaştırma adımı tabi tutulmuştur. Sonuçta, Tablo 2’de görüldüğü üzere PNK9 nanopartikülleri başarı ile üretilenmiş ve 1.3 mikron boyutundan daha büyük agregatlar oluşmuştur. Bunun nedenini anlayabilmek için, yukarıda bahsedildiği üzere pirinç kepeği yağına ilave olarak hidrofobik özelliği çok yüksek olan hegzadekan, çekirdek içeriğine eklenmiş ve polimerizasyon aynı koşullarda yürütülmüştür. Bunun sonucunda partikül boyutu 202 nm civarlarına düşmüş ve -59.2 mV zeta potansiyel değeri ile koloidal açıdan stabil bir nanopartikül elde edilmiştir. Buradan çıkan sonuç, yukarıda bahsedildiği üzere pirinç kepeği yağının tek başına polimerizasyon sırasında Laplace basıncını dengeleyemediği ve sonuçta Ostwald olgunlaşması ile küçük damlacıkların büyük damlacıklara difüze olarak agregat oluşumuna neden olduğu yönündedir. Hegzadekan ilavesinin, damlacıklar içerisindeki basınca sunduğu katkı ile Laplace basıncını dengeleyebildiği ve bu bahsedilen Ostwald olgunlaşması durumunun gerçekleşmediği görülmüştür. Bu sonuç değerli olmakla birlikte, hegzadekan içeren bir yapının gelecek biyomedikal uygulamalar için fayda sağlamayacağını dikkate aldığımızda, miniemülsiyon polimerizasyonunun bu aşamada pratik olmadığı görülmüştür. Bu açıdan çalışmada daha önce başarı ile elde ettiğimiz bitkisel yağ çekirdekli (pirinç kepeği yağı) PMMA nanokapsülleri dikkate aldığımızda, miniemülsiyon çözücü buharlaştırma yönteminin uygun üretim yöntemi olduğu görülmüştür.

Tablo 2. Nanokapsül Üretim Yöntemi Değişiminin İncelenmesi. Üretim Metodu: Miniemülsiyon Polimerizasyon (MEP). MMA: Metil Metakrilat. Başlatıcı: AIBN

Nanokapsül Kodu	Monomer: MMA	Çekirdek İçeriği ve Miktarı (g/mL)	Sümfaktan: SDS Miktarı	Ortalama Boyut (nm)	Zeta Potansiyel
PNK9	0.067	Pirinç Kepeği Yağı – 0.13	1	Agregat oluşumu, >1.3	-
PNK10	0.067	Pirinç Kepeği Yağı – 0.67 Hekzadekan – 0.066	1	202±0.4	-59.2±0.8

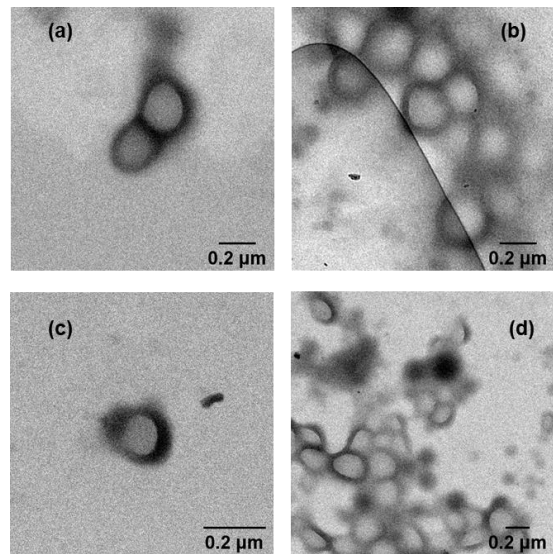
-Agregat yapılar oluştuğu için zeta potansiyel değeri belirlenmemiştir.

Şekil 1’de görülmekte olan formülasyon, üretim ve morfolojik yapının iyileştirilmesi adımlarının ardından son olarak yüzey özelliklerinin bir biyomedikal uygulama gözüyle iyileştirilmesi ve biyolojik etkileri dikkate alarak geliştirilmesi üzerine odaklanılmıştır. Bunun için, yukarıda tartışılan nedenlerden ötürü PNK1 nanokapsülleri seçilmiş olup, 222±0.4 nm boyutunda, -51.4±1.1 mV zeta potansiyel değerindeki (Tablo 3) yapının yüzey özelliklerinin geliştirilmesi üzerine çalışılmıştır. Bilindiği üzere nanopartiküllerin kan akışındaki dolaşım süresini artırmak için yüzeyin PEG gibi çeşitli malzemelerle kaplanması ve bu sayede kandaki opsonin proteinlerle etkileşiminin azaltılması bir yol olarak önerilmektedir. Bu adım sayesinde, nanopartiküller makrofajlardan saklanabilecek ve hızlıca vücuttan atılımı engellenmiş olacaktır [27]. Diğer yandan, nanopartiküllerin yüzey yükünün azaltılması ve sterik stabilizasyonun sağlanmasının da kandaki opsonin proteinler ile etkileşimi azaltmada rolü olabileceği bilinmektedir [25, 27]. Bu iki faktör göz önünde bulundurulduğunda, klasik kovalent bağlama yöntemleri ile uygulanan PEGilasyon işleminin alternatif son derece pratik ve yenilikçi bir yaklaşımla PNK1 nanokapsüllerinin yüzeyindeki SDS sümfaktanı iyonik olmayan ve PEG yapıları bir sümfaktan olan Lutensol AT50 ile yer değiştirerek hem yüzey yükü kontrol altına alınacak, hem de yüzeyin PEGilasyonu ile opsonin proteinlerle etkileşiminin azaltılması sağlanacaktır. Bunun için 2 mg/mL, 4 mg/mL ve 6 mg/mL olmak üzere farklı miktarlarda molekül ağırlığı 2460 g/mol olan Lutensol AT50 (Tablo 3, Şekil 3) PNK1 nanopartikülüne eklenerek 3 saat boyunca inkübe edilmiştir. Bunu takiben, 1 kDa moleküler ağırlık ayırma sınırına sahip rejener selülozdan oluşan membran ile 24 saat boyunca ultra saf suya karşı diyaliz gerçekleştirilmiştir. Burada amaç, nanopartikül yüzeyi ile etkileşim içerisinde olan Lutensol AT50 sümfaktanının SDS ile yer değiştirerek, serbest kalan SDS moleküllerinin (molekül ağırlığı: 288.4 g/mol) diyaliz ile ortamdan uzaklaştırılmasıdır. SDS moleküllerinin ve Lutensol AT50 sümfaktanın molekül ağırlığı düşünüldüğünde, kullanılan 1 kDa diyaliz membranı bu amaca hizmet edecektir. Benzer bir yöntem daha önce silika nanokapsüllerin üretilmesi sırasında kullanılan CTMA-Cl (cetyltrimethylammonium chloride) sümfaktanının Lutensol AT50 ile yer değiştirmesi sürecinde kullanılmış ve başarı ile PEGilasyon sağlanmıştır [28]. Tablo 3 incelendiğinde, kullanılan Lutensol AT50 miktarının boyut üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı

görülmüştür. Diğer yandan, zeta potansiyelin -51.4 mV değerinden, 2 mg/mL, 4 mg/mL ve 6 mg/mL Lutensol AT50 kullanıldığında sırasıyla -29.1 mV, -20.0 mV ve -20.5 mV değerlerine düştüğü görülmüştür. Buradan çıkacak sonuç, 4 mg/mL değerinin bir limit olduğu ve Lutensol miktarının artırımının PEGilasyon açısından bir fark yaratmadığı şeklinde yorumlanabilir. Diğer yandan, zeta potansiyel değerinin -20 mV dolaylarına düşmesi, kandaki opsonin proteinleri ile etkileşim açısından olumlu bir perspektif sunmakla beraber, koloidal stabilitenin hem elektrostatik hem de sterik etkileşimlerle sağlandığını da göstermektedir. Bu, PMMA nanokapsüllerin yüzeyinin Lutensol AT50 ile kaplandığı, dolayısıyla PEGilasyon sürecinin başarı ile sonuçlandığını göstermekle beraber, yüzeyde SDS moleküllerinin de kısmen yer aldığını ve elektrostatik stabilizasyonu sağladığını göstermektedir.

Tablo 3. Optimum Nanokapsül Formülasyonunun (PNK1) Sümfaktan Değişim Yöntemi ile PEGilasyon Sürecinin İncelenmesi

Nanokapsül Kodu	Lutensol AT50 (mg/mL)	Ortalama Boyut (nm)	Zeta Potansiyel (mV)
PNK1	0	222±0.4	-51.4±1.1
PNK1-P1	2	217±1.2	-29.1±0.7
PNK1-P2	4	215±1.3	-20.0±0.7
PNK1-P3	6	216±3.4	-20.5±0.8

**Şekil 3.** Morfolojik Karakterizasyon. Transmisyon Elektron Mikroskobu Sonuçları (a) PNK1-P1, (b) PNK1-P2, (c) PNK1-P3, (d) PNK1-P3

Şekil 3'te görülmekte olan TEM fotoğrafları incelendiğinde, sürfaktan değişim sürecinin PMMA nanokapsüllerin morfolojik yapısına etkisinin olmadığı, ve tüm koşullarda kapsül morfolojisinin korunduğu görülmektedir.

IV. SONUÇ

Sonuç olarak, bu çalışma sağlık uygulamalarında geniş bir kullanım alanına sahip PMMA nanokapsüllerin boyut, morfoloji ve zeta potansiyelini çeşitli formülasyon değişkenlerine bağlı olarak incelemiştir. Elde edilen bulgular, formülasyon bileşenlerinin ve üretim sürecinin, nanokapsüllerin incelenen özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Çalışma kapsamında, bitkisel bir yağ olan pirinç kepeği yağı içerikli nanokapsül formülasyonunun üretimi için miniemülsiyon çözücü buharlaştırma yönteminin uygun olduğu, miniemülsiyon polimerizasyon sürecinde ancak agregatlar elde edilebildiği sonucuna varılmıştır. Diğer yandan, PMMA miktarı ve molekül ağırlığı ile sürfaktan miktarı ve çeşidi gibi çeşitli parametrelerin de kapsül morfolojisinde önemli bir etkisi olduğu görülmüştür. Ayrıca, nanopartiküllerin kan akışında yeterli süre kalabilmesi için yüzeylerinin PEG ile modifiye edilmesi için uygulanan sürfaktan değişim yöntemi, çalışmanın yenilikçi ve pratik yaklaşımlarından biri olarak öne çıkmıştır. Bu bulgular, PMMA nanokapsüllerin daha etkili sağlık uygulamaları geliştirilmesine yönelik formülasyon ve üretim süreçlerinin iyileştirilmesi için önemli bir temel teşkil etmektedir. Sonuçta, bu çalışmanın ortaya koyduğu temel bulgular, nanokapsül tabanlı ilaç salım sistemlerinin optimizasyonu ve etkinliğinin artırılmasına yönelik gelecek çalışmalara katkı sağlayacaktır.

TEŞEKKÜR

Finansal destek için Max Planck Topluluğu tarafından desteklenen Max Planck Partner Grup Fonu aracılığıyla Max Planck Polimer Enstitüsü'ne ve destekleri için Prof. Dr. Katharina Landfester'e teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

- [1] Iyisan, B., Landfester, K. (2019). Polymeric nanocarriers. In Gehr, P., Zellner, R. (Eds.), *Biological Responses to Nanoscale Particles. Nanoscience and Technology*, Springer Nature Switzerland, (pp.53-84).
- [2] Iyisan, B., Landfester, K. (2019). Modular approach for the design of smart polymeric nanocapsules. *Macromolecular Rapid Communications*, 40 (1), 1800577.
- [3] Musyanovych, A., Landfester, K. (2014). Polymer micro- and nanocapsules as biological carriers with multifunctional properties. *Macromolecular Bioscience*, 14 (4), 458-477.
- [4] Landfester, K., Mailänder, V. (2013). Nanocapsules with specific targeting and release properties using miniemulsion polymerization. *Expert Opinion on Drug Delivery*, 10(5), 593-609.
- [5] Mitchell, M. J., Billingsley, M. M., Haley, R. M., Wechsler, M. E., Peppas, N. A., Langer, R. (2021). Engineering precision nanoparticles for drug delivery. *Nature Reviews Drug Discovery*, 20(2), 101-124.
- [6] Poon, W., Kingston, B.R., Ouyang, B., Ngo, W., Chan, W.C.W. (2020). A framework for designing delivery systems. *Nature Nanotechnology*, 15, 819-829.
- [7] Antonietti, M., Landfester, K. (2002). Polyreactions in miniemulsions. *Progress in Polymer Science*, 27, 689.
- [8] Landfester, K. (2009). Miniemulsion polymerization and the structure of polymer and hybrid nanoparticles. *Angewandte Chemie International Edition*, 48, 4488.
- [9] del Mercato, L. L., Ferraro, M. M., Baldassarre, F., Mancarella, S., Greco, V., Rinaldi, R., Leporatti, S. (2014). Biological applications of LbL multilayer capsules: from drug delivery to sensing. *Advances in Colloid and Interface Science*, 207, 139.
- [10] Parakhonskiy, B.V., Yashchenok, A.M., Konrad, M., Skirtach, A.G. (2014). Colloidal micro- and nano-particles as templates for multilayer capsules. *Advances in Colloid and Interface Science*, 207, 253.
- [11] Richardson, J., Chui, J., Björnalm, M., Braunger, J. A., Ejima, H., Caruso, F. (2016). Innovation in layer-by-layer assembly. *Chemical Reviews*, 116, 14828.
- [12] Gaitzsch, J., Huang, X., Voit, B. (2016). Engineering functional polymer capsules toward smart nanoreactors. *Chemical Reviews*, 116, 1053.
- [13] Iyisan, B., Kluge, J., Formanek, P., Voit, B., Appelhans, D. (2016). Multifunctional and dual-responsive polymersomes as robust nanocontainers: design, formation by sequential post-conjugations, and pH-controlled drug release. *Chemistry of Materials*, 28(5), 1513-1525.
- [14] Yassin, M. A., Appelhans, D., Wiedemuth, R., Formanek, P., Boye, S., Lederer, A., Voit, B. (2015). Overcoming concealment effects of targeting moieties in the PEG corona: controlled permeable polymersomes decorated with folate-antennae for selective targeting of tumor cells. *Small*, 11(13), 1580-1591.
- [15] Iyisan, B., Thiramanas, R., Nazarova, N., Avlasevich, Y., Mailänder, V., Balushev, S., Landfester, K. (2020). Temperature sensing in cells using polymeric upconversion nanocapsules. *Biomacromolecules*, 21, (11), 4469-4478.

- [16] Bettencourt, A., Almeida, A. J. (2012). Poly(methyl methacrylate) particulate carriers in drug delivery. *Journal of Microencapsulation*, 29, 353–367.
- [17] Kreuter, J. (2000). Poly(Methyl Methacrylate) nanoparticles as vaccine adjuvants. In: O'Hagan, D.T. (Eds.) *Vaccine Adjuvants. Methods in Molecular Medicine™* (pp.105-119). Springer, Totowa, NJ.
- [18] Zarrati, S., Mahdavi, M., Tabatabaie, F. (2016). Immune responses in DNA vaccine formulated with PMMA following immunization and after challenge with *Leishmania majör*. *Journal of Parasit Diseases*, 40, 427–435.
- [19] Alves-Betista, F., Cunha Fontele, S.B., Beserra Santos, L.K., Alves-Filgueiras, L., Quaresma Nascimento, S., de Castro e Sousa, J.M., Ramos Gonçalves, J.C., Nogueira Mendes, A. (2020). Synthesis, characterization of α -terpineol loaded PMMA nanoparticles as proposed of therapy for melanoma. *Materials Today Communications*, 22, 100762.
- [20] Sadguru Prasad, L.T., Madhusudhan, B., Kodihalli B, P. and Ghosh, P.C. (2017). Development and *in vitro* evaluation of oxytetracycline-loaded PMMA nanoparticles for oral delivery against anaplasmosis. *IET Nanobiotechnology*, 11, 119-126.
- [21] Juneja, R., Roy, I. (2014). Surface modified PMMA nanoparticles with tunable drug release and cellular uptake, *RSC Advances*, 4, 44472.
- [22] Paiphansiri, U., Tangboriboonrat, P., Landfester, K. (2006). Polymeric nanocapsules containing an antiseptic agent obtained by controlled nanoprecipitation onto water-in-oil miniemulsion droplets, *Macromolecular Bioscience*, 6, 33.
- [23] Agmo Hernández, V. (2023). An overview of surface forces and the DLVO theory, *ChemTexts*, 9, 10.
- [24] Tiarks, F., Landfester, K., Antonietti, M. (2001). Preparation of polymeric nanocapsules by miniemulsion polymerization. *Langmuir*, 17, 908-918.
- [25] Roser, M., Fischer, D., Kissel, T. (1998). Surface-modified biodegradable albumin nano- and microspheres. II: effect of surface charges on *in vitro* phagocytosis and biodistribution in rats, *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 46 (3), 255-263.
- [26] Ikeda-Imafuku, M., Li-Wen Wang, L., Rodrigues, D., Shaha, S., Zongmin, Z., Mitragotri, S. (2022). Strategies to improve the EPR effect: A mechanistic perspective and clinical translation, *Journal of Controlled Release* 345, 512–536.
- [27] Owens, D.E., Peppas, N.A., (2006). Opsonization, biodistribution, and pharmacokinetics of polymeric nanoparticles, *International Journal of Pharmaceutics*, 307, 93–102.
- [28] Jiang, S., Mottola, M., Han, S., Thiramanas, R., Graf, R., Lieberwirth, I., Mailänder, V., Crespy, D., Landfester, K. (2020). Versatile preparation of silica nanocapsules for biomedical applications, *Particle and particle systems characterization*, 37, 1900484.

Kullanılmış Kızartma Yağlarından Üretilen Sıvı Sabunların Hijyen Etkinliğinin İncelenmesi

Study of Hygienic Efficacy of Soaps Made of Waste Cooking Oils

Ayşegül SİPAHİ¹, Güler DARTAN²

¹Marmara Üniversitesi (M.Ü.), Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 34722, İstanbul, Türkiye

²Marmara Üniversitesi (M.Ü.), Fen Fakültesi, Kimya Bölümü, Analitik Kimya ABD, 34722, İstanbul, Türkiye

Öz

Bu çalışma; bitkisel atık yağlardan (kullanılmış kızartma yağlarından) evsel temizlik için sıvı sabunlar üretiminde yararlanılabileceğini ortaya koymak ve üretilen bu sıvı sabunların hijyen etkinliğini ölçmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Böylece hem ekonomi ve çevre için olumlu katkılar sağlayacak bir geri dönüşüm örneği sunulmakta, hem de sağlık için uygun doğal katkılarla zenginleştirilmiş sabunların yeterli hijyen sağlayabileceği gösterilmektedir. Evlerden alınan atık kızartma yağının kullanımıyla, sıvı formda sodyum ve potasyum sabunları üretildi. Bunların karışımına (4/5 sodyum sabunu 1/5 potasyum sabunu) çeşitli katkılar ilâvesiyle dört çeşit ürün hazırlandı. Et işletmelerinde etle temas eden yüzeyler bu ürünlerle silinerek temizlik işlemi yapıldı. Temizlikten önce ve sonra yüzeylerden ISO 18593:2018 Standartı (Gıda Zinciri Mikrobiyolojisi – Yüzey Örnekleme İçin Yatay Yöntemler) uyarınca numuneler alındı. Mikrobiyolojik testler, hazır besiyeri plakaları ve swab çubuklarından oluşan 3M Petrifilm sistemi ile gerçekleştirildi. Gıda patojenlerinden bazı bakteriler için hazırlanmış üç farklı besiyeri plakası kullanımıyla, ürünlerin hijyen sağlama etkinliği araştırıldı. Numune alınımının ardından, laboratuvarında Petrifilmle ekim yapıldı ve bakteri türüne göre inkübasyon uygulanarak, plakalarda oluşan koloniler sayıldı. Koloni sayımları, ISO 4832:2006 (Gıda ve Hayvan Yemi Mikrobiyolojisi Standartı) temelinde yapıldı. Temizlik işlemi öncesi ve sonrası koloni sayıları kıyaslanarak, sabunların bakteriyel inhibisyon oranları hesaplandı. Değerler, genelde yüksek bulundu ve bazı yüzeylerde %100 civarında kaydedildi. Örneğin, bakteriyel yükün yüksek olduğu alanlardan olan bir beyaz et parçalama tahtasında, Enterobacteriaceae (Enterobakterler) plakasındaki koloni sayımları, soda-boraks katkılı sabunla temizlik öncesinde $1,4 \times 10^3$ kob/yüzey iken, sonrasında < 10 kob/yüzey ve askılı terazi zemininde klor katkılı sabunla coliformlar (koliformlar) sayımı temizlik öncesinde $6,0 \times 10$ iken, sonrasında yine < 10 kob/yüzey oldu.

Anahtar Kelimeler: Atık Gıda Yağları, Geri Dönüşüm, Sabunlaştırma, Gıda Patojenleri, Swab Testleri, Hijyen

Abstract

This study was carried out to demonstrate that waste vegetable oils (used cooking oils) can be utilized in the production of liquid soaps for domestic cleaning and to measure the hygiene efficiency of these liquid soaps. Thus, an example of recycling that will contribute positively to the economy and the environment is presented, and it is shown that soaps enriched with natural additives suitable for health can provide adequate hygiene. Sodium and potassium soaps were produced in liquid form using waste cooking oil from households. Four types of products were prepared by adding various additives to their mixture (4/5 sodium soap, 1/5 potassium soap). Cleaning was performed by wiping the surfaces in contact with meat in meat processing plants with these products. Samples were taken from the surfaces before and after cleaning in accordance with the ISO 18593:2018 Standard (Microbiology of the Food Chain—Horizontal Methods for Surface Sampling). Microbiological tests were performed with the 3M Petrifilm system consisting of ready-to-use medium plates and swab sticks. The hygiene efficiency of the products was investigated by using three different medium plates prepared for some bacteria from food pathogens. After sample collection, the Petrifilms were inoculated in the laboratory, and the colonies formed on the plates were counted after incubation according to the bacterial species. Colony counts were based on the ISO 4832:2006 (the Standard of Microbiology of Food and Animal Feeding Stuffs). After collecting samples, Petrifilms were inoculated and incubated in the laboratory. Following the incubation, the colonies that grew on them were counted, and by comparing the Petrifilm plates before and after the cleaning procedure, the bacterial inhibition rates were estimated. Colony counting was based on the ISO 4832:2006 (Microbiology of food and animal feeding stuff). The bacterial inhibition rates of the soaps were calculated by comparing the colony counts before and after the cleaning process. Values were generally found to be high and recorded around 100% on some surfaces. For example, on a cutting board for white meat, which is an area with a high bacterial load, the colony counts of Enterobacteriaceae on the plate were 1.4×10^3 CFU/surface before cleaning with soap containing soda-borax, while afterwards it was < 10 CFU/surface. Similarly, on the surface of a suspended scale, the coliform count before cleaning with chlorine-containing soap was 6.0×10 , and afterwards it also dropped to < 10 CFU/surface.

Keywords: Waste Cooking Oils, Recycling, Saponification, Food Pathogens, Swab Tests, Hygiene

I. GİRİŞ

İnsanoğlunun hayvansal yağlardan sabun üretimine binlerce yıl önce başladığı ve yağlardan ilk sabun üretiminin M.Ö. 2800'lerde Babil uygarlığı döneminde yapıldığı düşünülmektedir [1]. M.Ö. 600 yıllarında Fenikeliler tarafından sabun yapımı bir zanaat olarak görülmekteydi ve daha sonra Ortadoğu coğrafyasında, özellikle zeytinyağı ile odun külleri kaynatılarak yapılan sabunlar hızla yaygınlaştı [2]. M.S. 129-216 arasında yaşamış Bergamalı Galenus tarafından sabunun tıbbi amaçlar için vücut temizliğinde kullanıldığı belirtilmiştir [3]. Sabunun icadından önce insanların bitki özleriyle veya bitki külleriyle ya da killi topraklar gibi doğal temizleyicilerle temizlik ihtiyaçlarını giderdiklerini ve eski Mısırlıların cilt sorunlarında soda ile temizlik yaparak iyileşme sağladıkları bilgisi veren belgelere rastlanmıştır. Çeşitli Ortadoğu toplumlarının köpüren bitkileri temizlik ihtiyaçları için kullandıklarını gösteren belgeler mevcuttur [4].

Kızartmada birkaç kez kullanılmış ve hem fiziksel hem kimyasal yapısı değişerek gıda amaçlı tüketilmesi sakıncalı hale gelmiş yağların, tüm dünyada en temel değerlendirilme yöntemlerinden biri biyodizel üretimidir ve bu konuda sürekli olarak yeni yöntemler ve ürünler geliştirilmektedir. Biyodizelden sonra, teknolojinin ihtiyaçları ve imkânları doğrultusunda, biyo-jet gibi yeni biyo-yakıtlar da denenmiş ve başarılı sonuçlar alınmıştır [5]. Bu atık yağlardan farklı alanlarda yararlanılabileceğine dair bilimsel araştırmalar yapılmakta ve sürekli yeni geri dönüşüm alanları ortaya çıkmaktadır. Kimyasal olarak yağ ve yağ asiti içeren (oleo-kimyasal) maddelerin farklı sektörlerde değerlendirilme imkânları geniştir ve ucuz bir kaynak olarak atık kızartma yağları, sabun üretiminde ve polimerlerde, plastikleştiricilerde, bağlayıcılarda, epoksitlerde, yağlayıcılarda ve pek çok biyo-malzeme gerektiren ürünlerde hammadde veya katkı maddesi olarak kullanım alanı bulabilir [6].

1.1. Geri Dönüşüm, Doğal Sabunlar, Deterjanlar ve Çevresel Etkiler

Kullanılmış yağlarla tek başına veya kullanılmış-yeni yağ karışımlarıyla üretilen sabunların, gerek vücut temizliği, gerekse ortam ve eşya temizliği için birçok ülkede kullanılmaktadır. Sabunlar kimyasal olarak, yağ asitlerinin alkali tuzlarıdır. Ancak, sentetik yüzey aktiflerle (deterjanlarla) yapılan ürünleri sabun olarak nitelemek yerine endüstride 2. Dünya Savaşı'ndan sonra üretilmeye başlanan bu tip ürünler için "soapless soap = sabunsuz sabun" kavramı ortaya atılmıştır [7]. Sentetik maddelerden yapılan ürünlere sabun denilmesi de yaygınlaştığı için, yağlardan yapılanların "doğal sabun" olarak nitelendirilmesi benimsenmiştir. Çek Cumhuriyeti'nde yeni ve kullanılmış yağlardan yapılan sabunların fizikokimyasal açıdan farklı olup olmadığını inceleyen bir çalışmada, yağ çeşidine göre değişmekle birlikte, genelde önemli bir fark görülmediği, ancak kullanılmış yağların filtrasyon ve bazı durumlarda

degumming (yapışkan bileşenlerin giderilmesi) gibi ön işlemlerden sonra reaksiyona sokulması gerektiği belirtilmiştir. Sabunların biyo-bozunumuyla, yağların atık su arıtma tesislerindeki işlemlerine dair süreçler de kıyaslanmış ve sabunların biyo-bozunumunun yağlarınkine göre dört kat hızlı olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, tuvalet ve banyo sabunu üreterek, atık yağların çevre kirlenmesi bir unsur olmak yerine, ekonomik bir değere dönüştürülmesinin anlam ve önemi vurgulanmıştır [8]. Sabunun biyo-bozunur özelliğe oluşu, sabunlaşma prosesinin minimum enerji gerektirmesi de çevresel açıdan diğer olumlu özelliklerdir [9].

Portekiz'de yürütülen geri dönüşümle ilgili farklı bir araştırmada ise ülkenin üç temel gıda sektörü atığı olan, kızartma yağları, badem kabukları ve portakal kabukları birlikte değerlendirilerek çeşitli el sabunlarının yapımında kullanılarak iyi kalitede, ucuz ve yeşil kavramına uygun el sabunları üretilmiştir [10]. Doğal sabunların diğer temizlik maddelerine göre daha çevreci olduğunu ortaya koyan bir diğer çalışmada, sabunun anaerobik çürütme sistemindeki biyo-bozunum süreçleri, laboratuvar ve ticari arıtma tesisi ölçeğinde incelenmiş, Tablo 1.1'de görüldüğü gibi 25 - 60 günlük ölçümlerde farklı şartlara göre pilot anaerobik çürütme sisteminde sabunun biyo-bozunum oranları %77-81 arasında bulunmuştur. Aynı çalışmada toprak ıslahı için kullanılan bir çamurda, sabun varlığında 150 gün sonra %100'e varan biyo-bozunum görüldüğü belirtilmektedir [11].

Tablo 1.1. Sabunun pilot anaerobik çürütme sistemindeki biyo-bozunumu [11].

Kalış süresi (gün)	Biyo-bozunum (%)
25	77.0
40	80.4
60	81.0

İtalya'da yürütülen, deterjanların biyo-bozunum, toksite ve mutajenite bakımından çeşitli test yöntemleriyle incelendiği bir çalışmada, deterjanların sadece uzun süreçler alan biyo-bozunum yönünden değil, içeriğinde kanser yapıcı ve mutajenik maddeler yanında, hormon saptırıcı, aşındırıcı, oksijen tüketici maddeler gibi sağlık ve çevre yönünden pek çok sakıncalar içeren bileşikler bulunması nedeniyle, özellikle sucul yaşama son derece olumsuz ve kalıcı etkiler yapabileceği belirtilmiştir [12].

Deneyisel araştırmalara dayalı yukarıda belirtilen çalışmalarda belirtildiği üzere atık yağların geri dönüşümü ve bilhassa sabunlaştırılması, daha temiz çevre ve doğa şartları oluşturmak açısından değerlidir. Ülkemizde yürütülen atık yağ toplama ve geri dönüştürme işlemlerine rağmen değerlendirilemeyen atık yağların kanalizasyona atılması durumunda lavabo

ve gider borularının tıkanmasından, toprağın ve su kaynaklarının kirlenmesine, sucul yaşamın tahrip olmasına kadar büyük çevre problemleri oluşmaktadır.

1.2. Hijyen Etkinliği ve Patojenler

Kore Cumhuriyeti'nde çeşitli el sabunlarının hijyen etkinliğinin araştırıldığı bir çalışmada, sıradan kalıp sabunlarla anti-bakteriyel sabunların kıyaslaması yapılmış ve anti-bakteriyel ajan içeren sabunların bazı bakterilere karşı daha üstün olmakla birlikte, genel olarak iki tür sabun arasında çok önemli bir fark olmadığı belirtilmiştir [13]. Köpük sabunlarla sıvı el sabunlarının karşılaştırıldığı bir çalışmada ise köpük sabunun hijyen etkisinin daha az olduğu tespit edilmiştir [14]. Eysel temizlikte doğal ürünlere olan ilgi dünya çapında giderek artmakta ve doğayı düşünen, çevre korumacı yaklaşımı benimseyenler tarafından sirke, karbonat, boraks gibi maddeler ve ayrıca doğal sabunların kullanımı teşvik edilmektedir. Boraks çeşitli temizlik amaçları için kullanılabilen, çamaşır deterjanlarında tekstil yıkama verimini arttıran bir katkı maddesi ve dezenfektan bir kimyasaldır [15]. Hindistan'da yapılan bir çalışmada evsel temizlikte toksik maddeler içeren deterjanlar yerine doğal sıvı sabunların tercih edilmesi durumunda daha iyi verim alınacağı ve ayrıca doğal sabunlar ile bazı bitki özlerinin karışımları yapılarak böcek kovucular üretilebileceği belirtilmiştir [16]. Gıda ortamlarının temizliği yanında, personel ellerinin temizliği de gıdanın kalitesinde rol oynayan faktörlerden biridir. Temelli ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, kasap dükkânları, hipermarketler, süt üretim ve mandıra tesislerinde personel ellerinin hijyen durumu incelendiğinde *E. coli* ve Enterobakterler başta olmak üzere, bazı patojen bakteri türlerinin çalışanların çoğunun ellerinde rastlanması, el yıkama ve sağlıklı gıda üretimi konusunda, incelenen işletmelerin pek hassas olmadığı ve personelin bilinç düzeyinin düşük olduğu gösterilmiştir [17]. Ergin ve Güzel tarafından Burdur ilinde 420 gönüllü ile yapılan bir anket çalışmasında ise ev hanımlarının gıdaları satın alma aşamasından itibaren, nasıl depoladıkları, gıda hazırlama yaklaşımları ve mutfaktaki hijyen davranışları değerlendirildiğinde; ev hanımlarının kişisel hijyen ve sağlıklı gıda konusunda bilgi ve bilinç olarak oldukça yetersiz oldukları, yanlış temizlik alışkanlıklarına sahip oldukları sonucu elde edilmiştir [18]. Gıda güvenliği kavramı, hayvansal ve bitkisel ürünlerin tüketiciye ulaşmadan önce yetiştirilme, depolanma, satışa sunulma gibi aşamaların yanı sıra, sofraya gelmeden önceki depolanma ve hazırlanma aşamalarını da içerir. Gıda güvenliğindeki parametrelerden biri de gıdanın yapısında ve ambalajında tüm bu aşamalarda gıda kaynaklı patojen bakterilerin ve bunların ürettiği toksinlerin bulunmamasıdır. Ayrıca mantarlar, küfler, pestisitler gibi diğer organik ve inorganik risk faktörleri de dikkate alınmalı ve gıdalar bunlardan korunmalıdır [19]. Gıda patojenlerinin hastalıkların yayılmasındaki etkisini ölçen çalışmalardan birisi Güney Afrika'da bir

okulun yemekhanesinde gerçekleştirilmiş ve yüksek miktarda *Salmonella*, *S. aureus*, *L. monocytogenes* gibi patojen bakteriler tespit edilmiş, okul çocuklarının hastalanmasında gıda hijyeni yoksunluğunun son derece etkili olduğu bulunmuştur [20]. Et işleme ve diğer gıda endüstrilerindeki mikrobiyolojik kriterleri oluşturmayı hedefleyen bir çalışmada, gıda ortamlarında en çok araştırılması gereken patojenler dikkate sunularak, *E. coli* bakterisinin fekal kontaminasyonu işaret ettiği için indikatör organizma olarak seçildiği belirtilmiş, *Enterobakterler* (*Enterobacteriaceae*), *koliformlar* (*coliforms*), koagülaz pozitif *stafilokoklar* (*staphylococci*) gibi diğer patojenlerin de işletme gereklerine göre indikatör olabileceği ve üretim süreçlerinde kontrol edilmesi gerektiği vurgulanmıştır [21].

Küresel koronavirüs pandemisi esnasında yapılan bu çalışma kapsamındaki testler, 2020 yılının Temmuz ve Ağustos aylarında gerçekleştirildi. Çalışma, atık yağlardan sıvı sabun üretimiyle hem sıfır atık özellikte, sürdürülebilir, enerji tasarruflu ve yüksek verimli bir geri dönüşüm örneği sunmak, hem de bu tür doğal sabunların bakteriyel yükün fazla olduğu bir alan olarak mutfaktaki temizlik işlerinde kullanılması durumunda hijyen etkinliğini incelemek amacıyla yapıldı. Araştırmamızda, atık kızartma yağlarından üretilen sıvı sabunların, mutfak temizlik ürünü olarak kullanılmasıyla, salgın hastalıklara sebep olabilen ve bu yüzden gıda sektöründeki denetimlerde sıklıkla karşılaşılan *E. coli*, *koliformlar*, *Enterobakterler* patojen gruplarına karşı etkinliği Petrifilm plakaları kullanılarak incelendi. Aynı zamanda ortamın genel hijyen durumuna ilişkin bilgi edinmek ve sabunun bunlara karşı etkisini de test etmek amacıyla, toplam canlı bakteri plakası da kapsama dahil edildi.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Testlerde Kullanılan Sabunların Üretimi

2.1.1. Soğuk prosesle sabun eldesi

İnce kumaş filtreden süzülerek tortulardan arındırılan kızartma yağlarından, sodyum ve potasyum sabunları üretildi.

2.1.1.1. Kullanılan kimyasallar ve malzemeler

- Sodyum hidroksit (payet sud kostik)
- Potasyum hidroksit (payet potas kostik)
- Boraks (sodyum tetraborat dekahidrat), toz
- Borik asit, toz halde
- 0-14 aralığında Merck marka pH kağıdı

Kullanılan atık yağları çalışmayı yürüten kişilerin kendi evlerinde biriktirdikleri atık kızartma yağları olup, muhtelif markalarda zeytinyağı ile ayçiçek yağları karışımıdır. Önce suda çözölen sodyum hidroksit (sud kostik) ve potasyum hidroksit (potas kostik), atık yağla karıştırılarak hidroliz reaksiyonuna tabi tutuldu.

Payet NaOH / Atık Yağ = 0,3

Payet KOH / Atık Yağ = 0,25

olacak şekilde kostikler 6 litre suda çözölen atık yağ ile karıştırıldı. 20 litrelik kovadaki yağ-kostik karışımına yaklaşık 5 ml kadar hidrojen peroksit ilâve edildi. Reaksiyon kabının sıcaklığı 45-50 °C arasında tutuldu. Sabun formülleri sonsuz sayıda olabilir bu nedenle gerek yağ karışımları için gerekse kostikler için kullanım oranları konusunda bir standart bulunmamaktadır. Ancak doğal yağlardan yapılan kişisel kullanıma yönelik (el ve vücut) sabunları için piyasada bulunan ürünlerin pH aralığı genelde 10-12 aralığındadır.

2.1.2. Sabun çeşitlerinin hazırlanması

Sabunların üretim aşamasında yağ-kostik karışımları iyice karıştırıldıktan sonra beklemeye bırakıldı. Reaksiyon tamamlandıktan sonra kovalardaki ürünlerde faz ayrışması oldu. Oluşan sabunlar üstte birikti ve bazik sıvı kısım altta kaldı. Bu ürünler alt fazdan yani sulu kısımdan ayrılarak öncelikle soğuk suyla yıkama işlemine tâbi tutuldu. Sabunlaşma reaksiyonunda kullanılan sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit miktarları gerekenden fazla olmuştur. Bunun nedeni, kullanılan atık yağ karışımındaki yağların oranı bilinemediğinden, hatta aynı cins yağların bile farklı markaları farklı sonuçlar verebileceği için fazla bazik ürünler elde edildi. Reaksiyon ve nötralizasyon sonrasında elde edilen koyu kıvamlı sabunlar, bir kovada 4/5 sodyum sabunu ve 1/5 potasyum sabunu oranıyla karıştırılarak kıvamı daha akıcı hale getirmek için bir miktar sıcak su ilâvesi ve borik asit kullanarak pH değeri 10,0-11,0 aralığına kadar düşürüldü. Daha sonra bu karışım kaynatmadan ısıtılarak iyice homojenleşmesi sağlandı, boraks ve soda sıcakken diğer katkı maddeler ise soğuduktan sonra katıldı. Kullanılan ürün çeşitleri; boraks-soda katkılı sabun, izopropil alkol katkılı sabun, klor (çamaşır suyu) katkılı sabun ve boraks-soda sabunu ile izopropil alkol sabunun karışımı olarak hazırlandı. Bu katkılar % 1-5 arasında (ürünlerin kıvamını koruyacak seviyede) ilâve edildi. Ürünler, kodları verilerek 1 litrelik şişelere konularak etiketlendi (Kullanımdan önce suyla yaklaşık %50 seyreltilmesi ürünün uygulamada yüzeye daha kolay sürülmesini sağlamıştır).

Ürün kodları:

S2: boraks ve soda katkılı sabun,

S3: Izopropil alkol katkılı sabun,

S4: klor katkılı sabun,

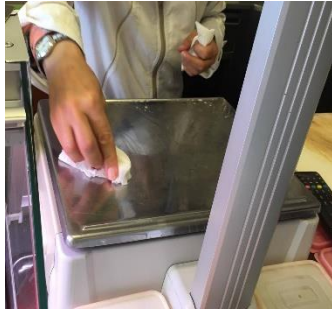
S5 = S2 + S3

2.2. Mikrobiyolojik Testlerin Yürütülmesi

2.2.1. Numunelerin alınması

Mikrobiyolojik çalışmalar 3M Petrifilm hazır besiyeri plakaları ve bu sistemin tamamlayıcı unsuru olan swab çubukları ile yapıldı. Numune almak için işletmelere (her hafta bir işletme olmak üzere) hafta başında gidildi. İşletmelerin çalışma alanında yer alan etle temas eden (bıçak, kanca, kazanların iç tarafı vs) yüzeylerden olabildiğince çok sayıda örnekleme yapıldı. Çalışma yapılan yüzeyler birbirinden çok farklı ve düz et parçalama tezgâhları haricindeki yüzey alanlarının pratikte hesaplanamayacak özellikte olması ve bu araştırma kapsamında inhibisyon oranlarını tespit etmenin daha önemli olması nedeniyle, sayımlar kob/yüzey (yüzey başına kob: koloni oluşturan birim) olarak kaydedildi. Numune alımları, Şekil 2.1.'de görüldüğü gibi dikkatle swab çubuğunu yüzeye hafifçe sürerek ve düz tezgâhlarda yaklaşık 10 cm x 10 cm boyutlu bir alandan, düz olmayan (ince veya eğimli) yüzeylerden de swab çubuğunun en uygun uygulanabileceği şekilde yapıldı. Temizlik öncesinde numune alım alanındaki bakteriyel yükün swab çubuğuna aktarılması nedeniyle, aynı bölgeden tekrar numune alınması doğru sonuç vermeyeceği için temizlik sonrasında bu yüzeye komşu diğer bir alandan numune alındı.

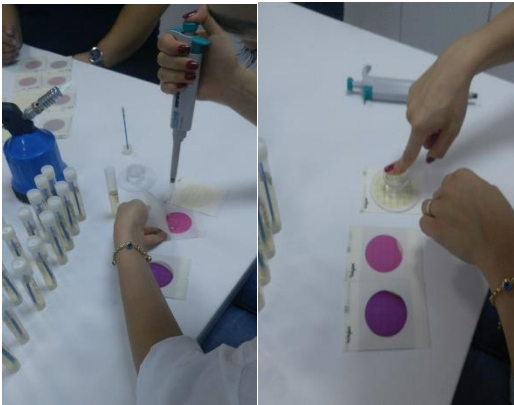
Laboratuvarda ürettiğimiz sabun ürünleriyle yapılan temizlik sonrasında numune alımlarında, yüzeyler bir parça kağıt havlu yardımıyla suyla yaklaşık %50 seyreltilmiş olan ürünle silindi ve birkaç saniye sonra swab çubukları sürüldü. Numune alım işlemleri, herhangi bir durulama veya ikinci uygulama yapılmadan, hızlı bir tempoyla gerçekleşti. Swab çubukları tüplerine geri konulduğunda, karışıklık olmaması için cam kalemi ile etiketlendi. Üzerinde numunenin alındığı yüzey ve kullanılan sabun kodu yazılı olan swab tüpleri, temizlik öncesi ve sonrası olmak üzere iki ayrı kutuya konularak, Petrifilm plakalarına ekim yapmak için laboratuvara götürüldü.



Şekil 2.1. Numune alım işlemlerine örnekler

2.2.2. Bakterilerin ekimi

Aynı gün test tüplerinden alınan sıvıların, araştırılan bakterilerin hazırlanmış olduğu olan 3M Petrifilm plakalarına ekimi yapıldı (Şekil 2.2.). Her bir swab tüpü numunesi için üç çeşit (*E. coli*/koliformlar, *Enterobakterler* ve *Toplam Canlı*) plakaları kullanıldı. Böylece bir yüzeyin bakteriyolojik yükü, kapsamdaki tüm patojen grupları için araştırıldı. Petrifilm, patojen türüne göre belirtilen sıcaklık ve süreleri dikkate alarak ve 3M Petrifilm kullanım bilgilerine göre inkübasyona tâbi tutuldu. İnkübasyon tamamlandıktan sonra plakalar çıkarıldı ve her bir plakada oluşan koloniler sayıldı. Elde edilen ürünlerin kullanılmasıyla yapılan temizlik işleminden önceki ve sonraki koloni sayımları kıyaslanarak, ürünlerin bakteriyel inhibisyonu (bakterileri azaltma yüzdesi) belirlendi.

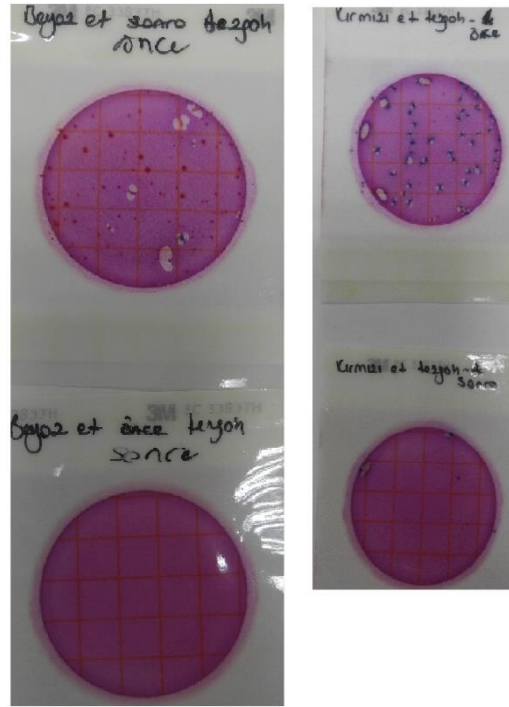


Şekil 2.2. Numunelerin plakalara ekim çalışması

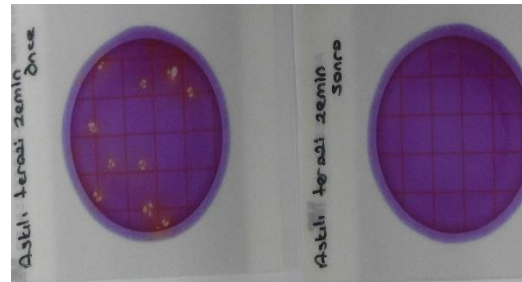
III. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Plakalarda Oluşan Koloniler

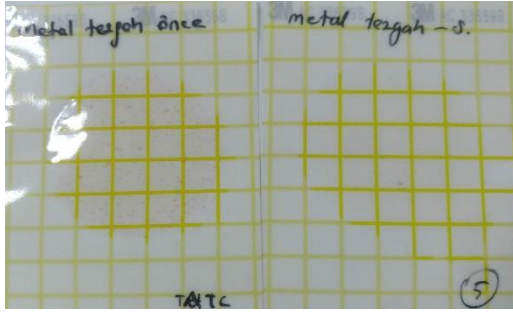
Testlerde ISO 4832: 2006 standartına göre koloni sayım yöntemi uygulandı. İlgili standarda göre, kolonilerin büyüklüğü önem taşımadığı için sadece rengi ve sayısı dikkate alındı. İşletmelerde en çok rastladığımız bakteri grubu *Enterobakterler* ve *E. coli*/koliformlar olmuştur. Bu bakteri gruplarına ait plakalar olan EC ve EB üzerindeki koloni sayımları temelindeki inhibisyon değerlerinden, ürünlerin hijyen etkinliğinin *E. coli*, koliformlar ve *Enterobakterler* üzerinde oldukça yüksek olduğu gözlemlendi. Bazı yüzeylerde, aranan bakterilere rastlanmadı. En düşük inhibisyon oranları toplam bakteri plakalarında (AC) elde edildi. Şekil 3.1 ile 3.6. arasında, ürünler ve yüzeyler belirtilerek, temizlik öncesine ve sonrasına ait bazı plaka örnekleri görülmektedir.



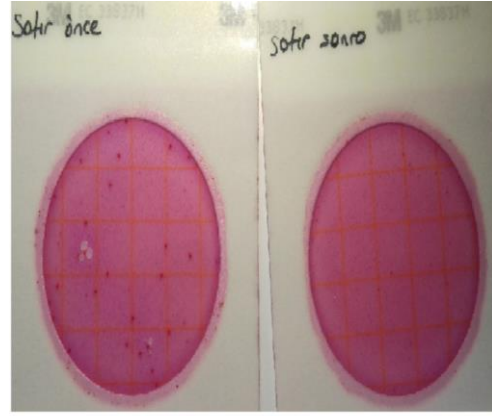
Şekil 3.1. Kırmızı ve beyaz polimerden et parçalama tezgâhlarında S3 testine ait EC plakaları, %100 inhibisyon



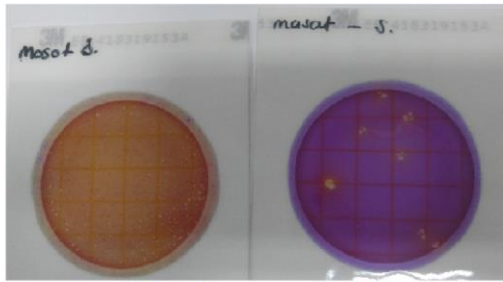
Şekil 3.2. S4 ile temizlenen bir yüzeyin EB plakaları, %100 inhibisyon



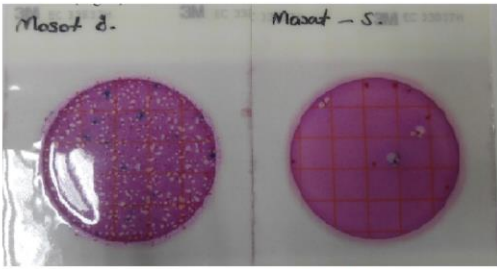
Şekil 3.3. Bir metal tezgâh yüzeyin AC plakalarında S2 ile temizlenmeden öncesi ve sonrası koloni sayımı.



S5 ile temizlenen yüzey, EC plakaları

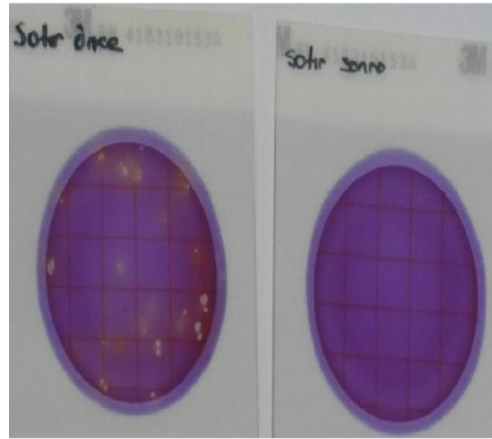


S5 ile temizlenen yüzey, EB Plakaları



S5 ile temizlenen yüzey, EC plakaları

Şekil 3.4. S5 ile temizlenen aşırı kirli bir yüzey olan masata ait EB ve EC plakaları, temizlik öncesi ve sonrası koloniler.



S5 ile temizlenen yüzey, EB plakaları

Şekil 3.6. S5 ile temizlenen bir satır yüzeyine ait EC ve EB plakaları, %100 inhibisyon.

3.2. Koloni Sayımları ve İnhibisyon Oranları

Polimer et doğrama tezgâhlarında çok fazla bıçak keşiği olması nedeniyle, bu yüzeylerde bakteri üreme hızı çok yüksektir. Ayrıca personel tarafından, tezgâhların sadece gerektiğinde spatula ile kazındığı ve gün sonunda bile dezenfektan ile temizlik yapılmadığı bilgisi verildi. Bu nedenle, daha fazla bakteriyel yükü sahip polimer tezgâhlarda iyi inhibisyon değerleri elde edilmesi önemlidir, çelik malzemeler daha verimli ve kolaylıkla temizlendiği için çoğunda %100 veya buna yakın inhibisyon sonuçları elde edildi. Bir metal tezgâh yüzeyin AC plakalarında S2 ile temizlenmeden önce sayılamayacak kadar çok (TNTC) bakteriyel yük varken, temizlik sonrasında koloni sayımı sadece 5 oldu. S5 ile temizlenen aşırı kirli bir yüzey olan masata ait EB ve EC plakaları, temizlik öncesinde TNTC değerindeki EB ve EC plakalarında temizlik sonrası sadece birkaç koloni görülmüştür.



Şekil 3.5. S3 ile temizlenen köfte mikserine ait AC plakaları, %39 inhibisyon.

Petriefilmlerin koloni sayım değerleri Tablo 2.1.'de ve hesaplanan inhibisyon oranları Tablo 2.2.'de görülmektedir. Araştırılan bakterinin temizlik öncesi durumda da yüzeyde tespit edilmediği durumlar, tabloya "veri yok" ve bir oran veremeyecek kadar az miktardaki inhibisyonlar "var" olarak kaydedildi.

Tablo 2.1. Petrifilm plakalarındaki temizlik öncesi ve sonrası koloni sayımları

Ürün Çeşiti					Koloni sayısı (kob/yüzey)								Uygulama Noktası (Temizlenen yüzey)
S2	S3	S4	S5	<i>E.Coli</i>		koliformlar		Enterobacteriaceae		T bakterisi			
				Önce	Sonra	Önce	Sonra	Önce	Sonra	Önce	Sonra		
	x			5,40 x 10 ²	3,0 x 10	5,0 x 10	< 10	8,0 x 10 ²	7,0 x 10	1,1 x 10 ⁴	6,8 x 10 ³	Kırmızı et T. (b)	
	x			1,0 x 10	< 10	1,0 x 10 ²	< 10	4,5 x 10 ²	< 10	5,2 x 10 ³	< 10	Beyaz et T. (b)	
		x		6,0 x 10	< 10	6,0 x 10	< 10	2,5 x 10 ²	< 10	6,8 x 10 ³	4,5 x 10 ²	Askılı terazi zemini (b)	
			x	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	1,8 x 10 ³	< 10	Askılı terazi kancası (b)	
			x	< 10	< 10	< 10	< 10	1,2 x 10 ²	< 10	8,9 x 10 ²	5,4 x 10 ²	Köfte mikseri (b)	
			x	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	9,9 x 10 ²	3,9 x 10 ²	Hamburger makinesi k. (h)	
			x	2,10 x 10 ²	4,0 x 10	7,0 x 10	100	2,0 x 10	1,7 x 10 ²	TNTC	TNTC	Ön beyaz T. (h)	
			x	4,0 x 10	< 10	6,0 x 10	< 10	1,3 x 10 ³	1,24 x 10 ³	TNTC	TNTC	Ön kırmızı T. (h)	
			x	< 10	< 10	< 10	< 10	7,0 x 10	< 10	3,4 x 10 ³	1,8 x 10 ²	Bıçak 1 (h)	
			x	< 10	< 10	< 10	< 10	2,0 x 10	< 10	3,1 x 10 ²	1,1 x 10 ²	Bıçak 2 (h)	
			x	< 10	4,0 x 10	< 10	< 10	< 10	< 10	1,4 x 10 ³	8,0 x 10 ²	Bıçak1	
			x	1,0 x 10	< 10	4,0 x 10	< 10	1,0 x 10	< 10	2,4 x 10 ³	< 10	Bıçak2	
			x	1,90 x 10 ²	1,0 x 10	2,4 x 10 ³	20	TNTC	< 10	TNTC	2,3 x 10 ²	Masat	
			x	1,0 x 10	< 10	1,0 x 10	< 10	< 10	< 10	3,4 x 10 ³	1,6 x 10 ³	Et ezici/Tokmak	
			x	3,0 x 10	< 10	50	< 10	1,8 x 10 ²	< 10	TNTC	5,0 x 10 ²	Metal tezgâh	
			x	1,20 x 10 ²	8,0 x 10 ²	2,4 x 10 ³	< 10	2,4 x 10 ³	1,4 x 10 ³	TNTC	TNTC	Beyaz masa1	
			x	6,0 x 10	3,7 x 10 ²	4,2 x 10 ²	1,6 x 10 ³	1,4 x 10 ³	< 10	TNTC	TNTC	Beyaz masa2	
			x	6,0 x 10 ²	< 10	1,7 x 10 ²	< 10	1,0 x 10 ³	< 10	TNTC	2,0 x 10 ³	Beyaz masa3-soğuk	
										TNTC	1,4 X 10 ³	Beyaz masa3-soğuk.det	
			x	< 10	< 10	3,0 x 10	< 10	9,0 x 10	< 10	4,2 x 10 ³	TNTC	Kıyma makinesi	
			x	< 10	< 10	< 10	< 10	3,8 x 10 ²	< 10	TNTC	2,8 x 10 ³	Metal tezgâh	
			x	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	9,5 x 10 ²	< 10	Bıçak	
			x	2,0 x 10	< 10	< 10	< 10	3,5 x 10 ²	< 10	TNTC	2,0 x 10 ³	Satır	
			x	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	2,0 x 10 ³	2,0 x 10	Terazi	
			x	2,0 x 10 ²	3,0 x 10	< 10	< 10	4,0 x 10 ²	2,4 x 10 ²	TNTC	TNTC	Parçalama tahtası	
			x	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	1,08 x 10 ³	6,80 x 10 ²	Et ezici/Tokmak	

* TNTC: Too numerous to count / sayılamayacak kadar çok

** < 10 Herhangi bir koloni görülmediğinde sonuç bu şekilde belirtilmektedir.

*** kob/yüzey: yüzeyde koloni oluşturan biri

**** T. bakterisi: Toplam Bakteri (Toplam Canlı)

Tablo 2.2. Petrifilm plakalarında hesaplanan inhibisyon oranları

Ürünlerin Yüzey Temizleme Testlerindeki % İnhibisyon Değerleri					
Ürün	<i>E.coli</i>	Koliformlar	Enterobacteriaceae	T.bakterisi	Uygulama Noktası
S2	100	100	100	90	Metal Tezgah (h)
S2	0	100	42	0	Beyaz Masa1 (h)
S2	0	0	100	0	Beyaz Masa2 (b)
S2	100	100	100	var	Beyaz Masa 3-soğ. (b)
S2	veri yok	100	100	0	Kıyma makinesi (h)
S2	veri yok	veri yok	veri yok	100	Terazi (h)
S3	94	100	91	38	Kırmızı et T. (b)
S3	100	100	100	100	Beyaz et T. (b)
S3	veri yok	veri yok	100	39	Köfte mikseri (b)
S3	81	0	0	0	Ön beyaz T. (h)
S3	veri yok	veri yok	100	65	Bıçak 2 (h)
S4	100	100	100	93	Askılı terazi kancası (b)
S4	veri yok	veri yok	veri yok	100	Köfte mikseri (b)
S4	veri yok	veri yok	veri yok	61	Hamburger makinesi k. (h)
S4	100	100	5	0	Ön kırmızı T. (h)
S4	veri yok	veri yok	100	95	Bıçak 1 (h)
S5	veri yok	veri yok	veri yok	94	Bıçak 1 (h)
S5	100	100	100	100	Bıçak 2 (h)
S5	90	100	100	100	Masat (h)
S5	100	100	veri yok	53	Et ezici/Tokmak (h)
S5	veri yok	veri yok	100	90	Metal Tezgah (h)
S5	veri yok	veri yok	100	100	Bıçak (h)
S5	100	veri yok	100	var	Satır (b)
S5	85	veri yok	40	0	Parçalama tahtası (h)
S5	veri yok	veri yok	0	37	Tokmak (h)

IV. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, atık bitkisel yağlardan üretilen doğal sıvı sabunların hijyen etkinliği incelendi. Et ve et ürünleri üretimi yapan işletmelerde, atık kızartma yağlarından üretilen doğal sabunun çeşitli katkılarla yapılan çeşitleriyle uygulanan yüzey silme işlemi öncesinde ve sonrasında numuneler alındı. Bu iki örneklemedeki sayımlarla, çalışılan yüzeydeki aranan bakteri varlığı kıyaslandı. Böylece, yöntem olarak, yatay örnekleme Swab testleri olarak bilinen mikrobiyolojik testlerle, bu sabunların yüzeyi mikroplardan arındırması değerlendirildi. Çeşitli katkı maddeleri ilave edilerek üretilen sabunların hepsiyle olumlu sonuçlar alındı. Alkol ve klor içeren sabunlarda inhibisyon biraz daha yüksek olmakla beraber soda-boraks katkılı sabunla da oldukça iyi değerler elde edildi. Ürünün yüzeye uygulanmasının hemen ardından numune alımı yapıldı. Eğer ürünle yüzey silme işleminden hemen sonra değil de ürünü 2-3 dakika yüzeyde bekleterek örnekleme yapılmış olsaydı veya silme işlem bir kez daha tekrarlanmış olsaydı çok daha yüksek inhibisyon sonuçları elde edilebileceği açıktır.

Çalışmamızda olduğu gibi hem atık kızartma yağlarından geri dönüşümle temizlik ürünü elde edilmesini, hem de üretilen ürünlerin hijyen etkinliği değerlendirmesini bir arada içeren başka bir araştırmaya literatürde rastlanmadı. Bu açıdan çalışmamız, ilk ve örnek bir araştırma olabilmesi açısından önemlidir. Mikrobiyolojik değerlendirme için kullanılan 3M Petrifilm plakalarının, bakteri kolonilerini spesifik renklerle göstermesi ve koloni sayımına elverişli milimetrik kağıtlı zemini, koloni sayımlarının rahat yapılmasını, bakteri türünün ayırt edilmesini ve böylece testlerden oldukça net sonuçlar alınmasını sağladı. Numune alımlarında temizlik öncesi ve sonrası numune alma bölgelerinin aynı olmaması nedeniyle bakteri yükü numune alınan etle temas yüzeyinin her yerinde aynı olmayacağı için öncesi ve sonrası değerler belli bir hata payı içermektedir. Temizlikten sonra, temizlik öncesiyle tam aynı yerden numune alınsaydı da bu bölgenin bakteriyel yükü ilk swab işlemiyle azaltılmış olacağı için daha büyük hata verebilirdi. Yöntemin özelliğinden kaynaklanan bu durum da kaçınılmaz olarak test sonuçlarının doğruluk derecesini bir miktar olumsuz etkileyebilir. Bazı yüzeylerde aranan patojenlerin hepsine rastlanmadı, bu yüzden swab numunelerinin bazılarında veri elde edilemedi. Mevcut olduğunda, *Enterobakterlerin* (EB) üretilen sabunlarla bakteriyel inhibisyon oranları yüksek bulundu. *Toplam bakteri* plakalarındaki (AC) inhibisyonların diğer plakalara göre daha düşük olduğu gözlemlendi. Yine de işletmelerde personelin rutin çalışmaları esnasında gerçekleştirilen, çabuk ve doğası gereği prosedürleri önceden belirlenmemiş temizlik işlemiyle bile bu doğal sabunların tatminkâr bir hijyen sağladığı görülmektedir.

Atık kızartma yağlarının, sıfır atık özellikte ve enerji tasarruflu soğuk prosesle (kaynatmadan) sıvı sabun üretiminde değerlendirilmesi, çevreci ve yüksek verimli bir geri dönüşüm örneği olması yanında, bu sabunların yüzeylerde hijyen sağlama etkinliğinin mikrobiyolojik testlerle ortaya konulması, endüstriyel uygulamalar için ufuk açıcı olabilir. Ürünle yapılan temizlikte uygulama prosedürü geliştirilerek, doğal sabunun hijyenik etkinliğinin daha iyi ortaya çıkması mümkün olabilir. Ayrıca bu kapsamdaki testlerin, mevcudiyeti bilinen (yüzeyin önceden kontamine edilerek hazırlandığı) bakterilere karşı ve tam kontrollü laboratuvar şartlarında tekrarlanması durumunda daha belirgin sonuçlar elde edilebilir. Üretilen sabunlar tek başına veya başka yüzey aktiflerle ve katkılarla karıştırılarak çeşitli yüzey temizleyiciler, çamaşır deterjanları ve diğer temizlik ürünleri formüllerinde kullanılabilir. Özellikle sıvı çamaşır deterjanı yapımında, ekonomik olduğu için bu yağlardan yararlanmak zaten sektörde benimsenmiştir ve bu tür ürünler tüketici açısından uygun fiyatlı olduğu için daha erişilebilir olmaktadır. Evsel kullanım için soda-boraks katkılı sabun daha fazla önerilebilir ve sağlıklı bir yaşamla doğrudan ilgili olan mutfak işlerinde yeterli hijyen sağlayabilir. Ayrıca, fazla yağlı yüzeylerin temizliği, aşırı kirli çamaşırın yıkanması gibi güçlü deterjanlar gerektiren işler haricinde, her türlü ev temizliğinde de doğal sabunlara yönelmek daha çevreci bir yaklaşımdır. Doğal sabuna İzopropil alkol, klor gibi diğer antiseptik maddelerin ilâvesi, daha ileri hijyen gerektiren yerlerde tercih edilebilir. Eşya ve ortam temizliği için üretilen ürünler dışında, el sabunlarının da oldukça pahalı ve dünyada tedarikinde sıkıntılar yaşanan yeni gıda yağları yerine, besin değerini yitiren kızartma yağlarından yapılması daha uygun olacaktır. Doğal sabunların, özellikle sıklıkla ev temizliği yapan ve eldiven kullanmayan kişiler için cilt kuruluğu, ellerde kızarıklık, çatlama gibi problemler yaşatan deterjanlara göre daha iyi bir seçenek olduğu söylenebilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın mikrobiyolojik testlerinde bakterilerin belirlenmesinden, işletmelerde numunelerinin alınmasına, laboratuvarla plakalara ekim yapılmasına, plakalardaki kolonilerin sayılmasına ve kaydedilmesine kadar tüm süreçte yardımcı olan Gıda Mühendisi Prof. Dr. İsmet Öztürk ve Gıda Mühendisi Melodi Tengerek'e çok teşekkür ederiz. Bu çalışma FEN-C-YLP-250919-0276 numaralı Marmara Üniversitesi BAPKO Lisansüstü Tez Projesi kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Vermeil, T., Peters, A., Kilpatrick, C., Pires, D., & Pittet, D., (2019). Hand Hygiene in Hospitals: Anatomy of a Revolution, *Journal of Hospital Infection*, Vol. 101, 383-392.

- [2] Wolf, R., Wolf, D., Tüzün, B., &Tüzün, Y., (2001). Soaps, Shampoos and Detergents, *Clinics in Dermatology*, Vol. 19, 393-397.
- [3] Chirani, R., Kowsari, E., Teymourian, T., & Ramakrishna, S., (2021). Environmental Impact of Increased Soap Consumption During COVID-19 Pandemic: Biodegradable Soap Production and Sustainable Packaging, *Science of the Total Environment*, Vol. 796, 149013.
- [4] Routh, H.B., Bhowmik, K.R., Parish, C., & Witkowski, J.A., (1996). Soaps: From the Phoenicians to the 20th Century-A Historical Review, *Clin Dermatol.*, 14(1), 3-6.
- [5] Goh, B.H.H., Chong, C.T., Ge, Y., &Jozsa, V., (2020). Progress in Utilization of Waste Cooking Oil for Sustainable Biodiesel and Biojet Fuel Production. *Energy Conversation and Management*, Vol. 223, 113296. doi: 10.1016/j.enconman.2020.113296.
- [6] Orjuela, A., & Clark, J., (2020). Green Chemicals from Used Cooking Oils: Trends, Challenges and Opportunities, *Chemistry*, Vol. 26, 100369.
- [7] Friedman, M., & Wolf, R., (1996). Chemistry of Soaps and Detergents: Various Types of Commercial Products and Their Ingredients. *Clinics in Dermatology*, Vol.14, 7-13.
- [8] Antonic, B., Dordevic, D., Jancikova, S., & Kushkevych, I., (2020). Physicochemical Characterization of Home-Made Soap from Waste-Used Frying Oils, *Processes*, Vol. 8, 1219.
- [9] Maotsela, T., Danha, G., &Muzenda, E., (2019). Utilization of Waste Cooking Oil and Tallow for Production of Toilet “Bath” Soap. *Procedia Manufacturing*, Vol. 35, 541-545.
- [10] Felix, S., Araujo J., Pires A.M., &Sousa A.C., (2017). Soap Production: A green Prospective. *Waste Management*, Vol. 66, 190–195.
- [11] Prats, D., Rodriguez, M., Varo, P., & Berna, J.L., (1999). Biodegradation of Soap in Anaerobic Digesters and on Sludge Amended Soils. *Wat. Res.*, Vol. 33(1), 105-108.
- [12] Pedrazzani, M.R., Ceretti, E., Zerbini, I., &Feretti, D., (2012). Biodegradability, Toxicity and Mutagenicity of Detergents: Integrated Experimental Evaluations, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Vol. 84, 274-281.
- [13] Kim, S.A., & Rhee, M.S., (2016). Microbicidal Effects of Plain Soap vs Triclocarban-Based Antibacterial Soap, *Journal of Hospital Infection*, Vol. 94, 276-280.
- [14] Dixon, N., Morgan M., & Equils, O., (2017). Foam Soap is not as Effective as Liquid Soap in Eliminating Hand Microbial Flora, *American Journal of Infection Control*, Vol.45 (7), 813-814.
- [15] Dunkee, J., (2012). Low-Risk Cleaning Agents, *Metal Finishing*, Vol.110(3), 28-29, 32. doi:10.1016/S0026-0576(13)70054-0.
- [16] Mohapatra, C., (2018). A Review on Natural Floor Cleaner and Insect Repellent. *World Journal of Pharmaceutical Research*, Vol.7 (09), 125-130.
- [17] Temelli, S., Şen, M.K.C., & Anar, Ş., (2005). Et Parçalama Ünitelerinde ve Beyaz Peynir Üretiminde Çalışan Personel Ellerin Hijyenik Durumunun Değerlendirilmesi, *Uludağ Üniversitesi J., Fac. Vet. Med.*, Vol 24, 75-80.
- [18] Ergin, S.Ö., & Güzel, A., (2018). Kadınların Gıda ve Mutfak Hijyeni ile İlgili Bilgi, Tutum ve Davranışlarının Değerlendirilmesi. *Gümüşhane Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi*, Vol. 7(3), 11-22.
- [19] Begic, M., & Josic, D., (2021). Food Borne Bacterial Pathogens and Food Safety- An Outlook, *Comprehensive Foodomics*, 3-13.
- [20] Sibanyoni, J.J., & Tabit F.T., (2019). An Assessment of the Hygiene Status and Incidence of Foodborne Pathogens on Food Contact Surfaces in the Food Preparation Facilities of Schools. *Food Control*, Vol. 98, 94-99.
- [21] Peran i Sala, R.M., Cederio de Balabarca, S. V., Etoundi, J.M., Odame-Darkwah, J., Oppong-Otoo, J., Hinso, D.C.T., & Wouafo, M., (2014). Establishment of Good Hygiene Practice-Based Microbiological Criteria in Food Industries: Guidelines Using an Example for Meat Preparations, *Food Control*58. DOI:10.1016/j.foodcont.2014.10.041.