

ISSN 1012-2354



ERCIYES ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ

ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

*Erciyes University
Journal of
the
Institute
of
Science and Technology*

Cilt (Vol.): 37

Sayı (No): 2



ERCİYES ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

Erciyes University Journal of Institute of Science and Technology

ISSN: 1012-2354



Genel Yayın Yönetmeni

Prof. Dr. Recai KILIÇ, Erciyes Üniversitesi

İmtiyaz Sahibi

Prof. Dr. Mustafa ÇALIŞ, Erciyes Üniversitesi

Editör

Prof.Dr. Mehmet AKKURT, Erciyes Üniversitesi

Prof.Dr. Emel KIZILKAYA AYDOĞAN, Erciyes Üniversitesi

Prof.Dr. M. Tamer ŞENEL, Erciyes Üniversitesi

Düzenleme Editörü

Demet ALICI KARACA

Editörler Kurulu

Prof. Dr. Musa SARI, Gazi Üniversitesi, msari@gazi.edu.tr

Prof. Dr. Orhan BÜYÜKGÜNGÖR, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, orhanb@omu.edu.tr

Prof. Dr. Hasan Küçükbay, İnönü Üniversitesi, hasan.kucukbay@inonu.edu.tr

Prof. Dr. Kamil KOÇ, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, kamil.koc@cbu.edu.tr

Prof. Dr. Tuncay CANDAN, The American University of the Middle East,
Tuncay.Candan@aum.edu.kw

Prof. Dr. Derviş KARABOĞA, Erciyes Üniversitesi, karaboga@erciyes.edu.tr

Prof. Dr. Ömer Galip SARAÇOĞLU, Erciyes Üniversitesi, saracog@erciyes.edu.tr

Prof. Dr. Doğan IŞIK, Erciyes Üniversitesi, dogani@erciyes.edu.tr

Prof. Dr. M. Duran TOKSARI, Erciyes Üniversitesi, dtoksari@erciyes.edu.tr

Doç. Dr. NİĞMET UZAL, Abdullah Gül Üniversitesi, nigmet.uzal@agu.edu.tr

Doç. Dr. Murat GÖKÇEK, Ömer Halisdemir Üniversitesi, [mgokcek@ohu.edu.tr](mailto:m gokcek@ohu.edu.tr)

Dr. Öğr. Üyesi Umut Çalışkan, Erciyes Üniversitesi, ucaliskan@erciyes.edu.tr



ERCİYES ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

Erciyes University Journal of Institute of Science and Technology

ISSN: 1012-2354



Yayın Danışma Kurulu

Prof. Dr. Ülkü YETİŞ, Ortadoğu Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Filiz B. DİLEK, Ortadoğu Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Gülçin BÜYÜKÖZKAN, Galatasaray Üniversitesi

Prof. Dr. Ceyda OĞUZ, Koç Üniversitesi

Prof. Dr. Yaman BARLAS, Boğaziçi Üniversitesi

Prof. Dr. Levent KANDİLLER, Yaşar Üniversitesi

Prof. Dr. Cengiz KAHRAMAN, İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Metin DAĞDEVİREN, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Okan KARAHAN, Erciyes Üniversitesi
Prof. Dr. Cevriye Temel GENCER, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet TANYAŞ, Maltepe Üniversitesi

Prof. Dr. TUNCAY CANDAN, Ömer Halisdemir Üniversitesi

Prof. Dr. Li TONGXING, Linyi University

Prof. Dr. Panos M. PARDALOS, University of Florida

Prof. Dr. José Machado Minho, University

Prof. Dr. Petraq PAPAJORGJË, University of New York Tirana

Prof. Dr. Fatih ALTUN, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Derviş KARABOĞA, Erciyes Üniversitesi



ERCİYES ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

Erciyes University Journal of Institute of Science and Technology

ISSN: 1012-2354



Cilt 37, Sayı 2, Hakem Kurulu

Prof. Dr. Yasemin EVRENOSOĞLU, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Prof. Dr. Önder YÜCEL, Ege Üniversitesi

Prof. Dr. Serkan NOHUT, Piri Reis Üniversitesi

Prof. Dr. Adil DENİZLİ, Hacettepe Üniversitesi

Prof. Dr. Nihal AYDOĞAN, Hacettepe Üniversitesi

Prof. Dr. Nuray ATEŞ, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Ali AKDAĞLI, Mersin Üniversitesi

Prof. Dr. Enise AYYILDIZ, Erciyes Üniversitesi

Prof. Dr. Şakir AYDOĞAN, Atatürk Üniversitesi

Prof. Dr. Bünyamin ŞAHİN, Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi

Prof. Dr. Adem Cengiz ÇEVİKEL, Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ali AKDAĞLI, Mersin Üniversitesi

Prof. Dr. Musa SARI, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Abdullah AYDIN, Kastamonu Üniversitesi

Prof. Dr. Cevriye GENCER, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Metin MÜJDECİ, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Doç. Dr. İlknur SOLMAZ, Çukurova Üniversitesi

Doç. Dr. Özcan KÖYSÜREN, Ankara Üniversitesi

Doç. Dr. Selçuk ASLAN, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi

Doç. Dr. Halis BİLGİL, Aksaray Üniversitesi

Doç. Dr. Utku KÖSE, Süleyman Demirel Üniversitesi

Doç. Dr. Şerife YALÇIN, Harran Üniversitesi

Doç. Dr. Niğmet UZAL, Abdullah Gül Üniversitesi

Doç. Dr. Enes YİĞİT, Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi

Doç. Dr. Veysel TURAN, Bingöl Üniversitesi

Doç. Dr. Adem GÜNEŞ, Erciyes Üniversitesi

Doç. Dr. Eren ÖZCEYLAN, Gaziantep Üniversitesi

Doç. Dr. Çağrı KOÇ, Ankara Sosyal Bilimler Üniversitesi
Doç. Dr. Melek ERDOĞDU, Necmettin Erbakan Üniversitesi
Doç. Dr. Osman SİMSEKER, Marmara Üniversitesi
Doç. Dr. Ertan YOLOĞLU, Adıyaman Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Senem TEKSOY BAŞARAN, İstanbul Medeniyet Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Murat DEVECİ, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Gökhan ÖZÇELİK, Karadeniz Teknik Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Ekin ASLAN, Kayseri Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Ayşe YAVUZ, Necmettin Erbakan Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi İsmail İsa ATABEYİ, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet BİLİM, Nuh Naci Yazgan Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Nuri KAPUCU, Hitit Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Ahmet ÖZKAYA, Adıyaman Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Murat BEKAR, Gazi Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Erdem AKSAKAL, Atatürk Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Öznur ÖZDEN, İstanbul Üniversitesi
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYA, Yozgat Bozok Üniversitesi
Dr. Arş. Gör. M. Raşit ATELGE, Siirt Üniversitesi
Dr. Arş. Gör. Mehmet PARLAK, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi
Dr. Öğr. Gör. Gözde BUHARALI, Bartın Üniversitesi
Dr. Öğr. Gör. Özge SÜRÜCÜ, Ege Üniversitesi
Dr. Öğr. Gör. Gözde BUHARALI, Bartın Üniversitesi
Dr. Öğr. Gör. Mustafa Batuhan KURT, Marmara Üniversitesi
Öğr. Gör. Nurullah ÖZTÜRK, Amasya Üniversitesi
Öğr. Gör. Bilgehan GÜRÜNLÜ, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi
Arş. Gör. Fatma OFLAZ, Fırat Üniversitesi
Dr. Özlem DEMİRCİ, Dicle Üniversitesi

Cilt: 37 Sayı: 2

Aralık 2021

İçindekiler

Sayfalar	Makaleler	Türü
206-220	Hemiselüloz Esaslı Polimerik Jel Filmlerin Antimikrobiyal ve Biyobozunma Özellikleri Üzerine Bitkisel Uçucu Yağların Etkisi	Araştırma Makalesi
221-231	Lagrange Yöntemi Kullanarak Varlık Yönetimi Problemlerinin Çözümü	Araştırma Makalesi
232-239	CuO Nanopartikül Katkı Maddesi ile PSf Ultrafiltrasyon Membrana Ait Geçiririmsizlik ve Ayrırma Özelliklerinin Geliştirilmesi	Araştırma Makalesi
240-248	ZnO Katkılı Greslerin Sıcaklık ve Soğurma Özelliklerinin Araştırılması	Araştırma Makalesi
249-259	Ters Esnek Matrislerde Çoklu Karar Verme Metodu	Araştırma Makalesi
260-282	NanoTAX: Nanogözenek DNA Dizileme Verisi Üzerinden Hızlı Patojen Tanıma	Araştırma Makalesi
283-295	Grafen-Demir Oksit Hibrit Nanoakışkanlarının Isıl ve Hidrolik Performanslarının Sayısal Olarak İncelenmesi	Araştırma Makalesi
296-305	Active Flow Control with DBD Plasma Vortex Generators around a NACA 2415 Airfoil	Araştırma Makalesi
306-313	Kayseri’de Tramvay Hattı Boyunca Gerçekleşen Trafik Kazalarının İncelenmesi	Araştırma Makalesi
314-322	Ralstonia eutropha H16 suşuyla sulu çözeltilerden kurşun ve bor biyogiderimi	Araştırma Makalesi
323-335	Snyder-Gama Sentetik Birim Hidrografın Yamula Barajı Havzasına Uygulanması	Araştırma Makalesi
336-347	Değişken Gecikmeli Sinir Ağları için Geliştirilmiş Niteliksel Kriterler	Araştırma Makalesi
348-355	Effects of Bendiocarb Insecticide on Lipid Peroxidation, Antioxidant Enzymes and DNA Damage in Human Leukocytes	Araştırma Makalesi
356-366	Numerical Investigation of Wind Loads on Building with Various Turbulence Models	Araştırma Makalesi

Hemiselüloz Esaslı Polimerik Jel Filmlerin Antimikrobiyal ve Biyobozunma Özellikleri Üzerine Bitkisel Uçucu Yağların Etkisi

Şeyda Taşar¹ *1, Meltem ÇAKMAK KALKAN¹ , Dursun ÖZER¹ , Ahmet ÖZER¹ 
¹Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği, ELAZIĞ

(Alınış / Received: 08.05.2020, Kabul / Accepted: 20.08.2021, Online Yayınlanma / Published Online: 31.08.2020)

Anahtar Kelimeler

Hemicellulose
Bitkisel uçucu yağ
Polimerik jel film
Disk difüzyon yöntemi
Biyobozunma kinetiği

Öz: Bu çalışmada, hemiselüloz esaslı, bitkisel uçucu yağ takviyeli (nane, biberiye, kekik, karanfil, ısırgan, lavanta, çam terebenti, sarımsak ve ardıç) antimikrobiyal özellik gösteren jel film üretimi, serbest radikalik polimerizasyon mekanizmasına göre gerçekleştirilmiştir. Jel filmlerin antimikrobiyal aktivitesi ve biyobozunma davranışları araştırılmıştır. Agar (disk) difüzyon yöntemi kullanılarak incelenen antimikrobiyal analiz için *E. coli* stok kültürü kullanılmıştır. Görüntü analizi MATLAB R2017 versiyonu ile yapılmıştır. Jel filmlerin biyobozunma hızları üzerine bitkisel uçucu yağların etkisi, toprak florası içerisine gömme testleri yapılarak tespit edilmiştir. Jel filmlerin biyolojik bozunma davranışları Coats Redfern Metodu kullanılarak modellenmiştir. Bozunmayı en iyi temsil eden teorik model eşitliği tespit edilmiş ve bozunma hızı, en uygun model eşitliğine (ikinci dereceden kinetik $F(2)$) göre hesaplanmıştır. Biberiye, kekik, karanfil ve ısırgan otu uçucu yağı içeren polimerik filmlerin, antimikrobiyal etki gösterdiği gözlenmiştir. Yapılan kinetik analiz sonucu antimikrobiyal özellik taşıyan uçucu yağ türlerinin, biyobozunma hızını yaklaşık 5 kat düşürdüğü ancak, nihai bozunma yüzdesi üzerinde etkili olmadığı tespit edilmiştir. Polimerik filmlerin 60 günlük süre sonunda toprak florasında, %95-98 oranında bozunduğu belirlenmiştir.

The Effect of Vegetable Essential Oils on the Antimicrobial and Biodegradation Properties of Hemicellulose Based Polymeric Gel Films

Keywords

Hemicellulose
Essentials herbal oil
Polymeric gel film
Disc diffusion method
Biodegradations kinetic

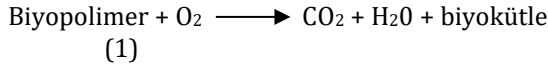
Abstract: In this study, hemicellulose-based, vegetable essential oil supplemented (mint, rosemary, thyme, clove, nettle, lavender, pine turpentine, garlic and juniper) gel film showing antimicrobial properties was produced according to the free radical polymerization mechanism. The antimicrobial activity and biodegradation behavior of gel films were investigated. *E. coli* stock culture was used for the antimicrobial analysis examined using the agar (disc) diffusion method. Image analysis was done with MATLAB R2017 version. The effect of vegetable essential oils on biodegradation rates was determined by embedding tests in soil flora. The biodegradation behaviors of gel films were modeled by using the Coats-Redfern Method. The theoretical model equation that best represents the biodegradation was determined and the rate of degradation was calculated according to the most suitable model equation (second-order kinetic $F(2)$). It has been concluded that polymeric films containing rosemary, thyme, clove, and nettle essential oil have an antimicrobial effect. The kinetic analysis conducted that the antimicrobial essential oil species reduced the rate of biodegradation approximately 5 times, but did not affect the final degradation percentage. It was determined that polymeric films were degraded 95-98% in the soil flora after 60 days.

*İlgili Yazar, email: sydtasar@firat.edu.tr

1. Giriş

Temel hammaddesi petrol olan sentetik polimerik mamullerin son yüzyılda artan kullanımı, yakın gelecekte iki temel büyük problemin oluşacağı düşüncelerini gündeme getirmiştir. Bunlar; (i) petrol rezervlerinin çok daha hızlı tükenme noktasına gelmesi ile enerji darboğazına girilecek olması (ii) biyobozunur nitelikte olmayan sentetik polimerlerin, çevrede birikmesi ile aşılamayan ekolojik sorunların ortaya çıkmasıdır. Bu nedenle petrol esaslı sentetik polimerlerin yerine, biyobozunur (doğada kendiliğinden bozunma yeteneğine sahip) özellik gösteren doğal polimerlerin kullanımının yaygınlaştırılması, ön görülen problemlerin çözümüne yönelik olarak, umut vaat edici çözüm olarak görülmüş ve araştırmalar bu alana yönelmiştir.

EN 14995 standartına göre, biyobozunur polimerler, belli kompostlama koşullarında (sıcaklık, nem ve mikroorganizma türü) ve belli sürede, mikrobiyal aktivite sonucu tamamen karbondioksit kadar parçalanabilen polimerik materyallerdir. Biyopolimerler, kullanım ömrü sonunda doğaya bırakıldıklarında petrol kökenli polimerlere göre daha kısa sürede parçalanarak ekolojik döngüye (C, N vs doğal döngüsüne) hızlıca katılabilmektedirler[1]. Biyopolimerler ortamda oksijen mevcutsa, aerobik şartlarda Eşitlik 1’de sunulduğu gibi bozunur ve karbondioksit kadar parçalanabilirler [2-4].



Biyopolimerlerin gazlara, suya, tuzlara, minerallere ve artık biyokütleyle dönüştürülmesi işlemine mineralizasyon denir. Tüm biyobozunur malzemeler tüketildiğinde ve tüm karbon karbondioksit dönüştürüldüğünde mineralizasyon tamamlanır [5]. Biyopolimerlerin biyolojik bozunma sürecinde çevreye herhangi bir zehirli veya zararlı madde salınımı yoktur [6,7]. Bu iki temel kriterden hareketle, polimerlerin biyobozunur nitelikte olup olmadığını tespit etmek için, bozunma sonucu açığa çıkan metabolit miktarının ve bozunma süresinin tespit edilmesi gerektiği ifade edilmektedir [8].

Biyobozunur özellik gösteren, yenilenebilir nitelikteki polimerlerik mamüllerin üretiminde genellikle bitkisel atıklardan kazanılan makromoleküller monomer olarak kullanılmakta ve bu sayede polimerik mamül üretim maliyetleri düşürülebilmektedir [5]. Ancak polimerik mamul üretiminde monomer olarak kullanılan (selüloz, hemiselüloz, nişasta vb) makromoleküller, mikroorganizmaların temel besin maddesi içerisinde olduğundan, biyo-esaslı polimerik mamüller, kullanım alanına da bağlı olarak, mikrobiyal kontaminasyona oldukça açık hale gelmektedir. Bu durum, biyo-esaslı polimerik mamullerin kullanım ömrü içerisindeki en önemli dezavantajlarından biridir. Çünkü, mikrobiyal kontaminasyon tıbbi cihazlar, ilaçlar, hijyen uygulamaları başta olmak üzere, su saflaştırma sistemleri, tekstil ürünleri ve gıda ambalaj materyalleri gibi sektörlerde de ciddi sorunlar oluşturmaktadır. Söz edilen sektörlerde yaygın olarak kullanılan polimerik malzemelerin antimikrobiyal özellik göstermesi istenmektedir. Bu amaçla, polimerik mamul üretim sürecinde kimyasal antimikrobiyal ajanlar yapıya ilave edilmektedir. Ancak gıda sektöründe, gıda ile temasta bulunan polimerik film ve kaplamaların üretiminde canlı sağlığı üzerinde olumsuz etkiler oluşturabilecek kimyasal antimikrobiyal ajanların kullanılmasına birtakım sınırlamalar getirilmiştir. Bunun sonucunda, antimikrobiyal özellik kazandırılmak istenen ambalaj malzemelerinin üretiminde doğal antimikrobiyal özellik gösteren ajanların kullanımına yönelik araştırmalar başlamıştır [9-11]. Bu kapsamda, anason, fesleğen, kişniş ve kekik gibi esansiyel yağların kitosan filmleri üzerinde [12], üzüm çekirdeği özütünün polietilen (PE) filmler üzerinde [13], mercanköşkü ve kekik esansiyel yağlarının soya proteini esaslı yenilebilir filmler üzerinde [14], antimikrobiyal etkisi araştırılmıştır. Ayrıca Pastor vd., (2011)[15] ve Erol, (2012)[16] tarafından gerçekleştirilen başka çalışmalarda ise propolisin antimikrobiyal etkinliği incelenmiştir. Yürütülen çalışmalarda, polimerik ambalajların yapısına katılan ajanların ürünün üretiminden tüketimine kadarki süreçte oluşabilecek mikrobiyal aktiviteleri engellemesi hedeflenmiştir [17]. Yapılan çalışmalarda denenen doğal antimikrobiyal ajanların ancak belirli bir konsantrasyonun üzerinde kullanılmaları durumunda antimikrobiyal aktivite gösterdikleri, yüksek miktarlarda kullanılmaları durumunda ise gıdaların kendine özgü tadını ve rengini etkiledikleri ortaya konulmuştur [18]. Bu ikilemin önüne geçilebilmesi, doğal kökenli en etkin antimikrobiyal ajanların tespit edilebilmesi ve optimum kullanım dozlarının belirlenmesi için çalışmaların daha detaylı olarak sürdürülmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Bu amaçla, bu çalışmada daha önce hemiselüloz bazlı polimerik film ya da mamuller üzerindeki antimikrobiyal etkisi ortaya konulmamış bazı uçucu bitkisel yağların antimikrobiyal etkinliği

karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Ayrıca, polimerik yapıya ilave edilen bu bitkisel uçucu yağların polimerin biyobozunma hızı üzerine etkileri de araştırılmış ve yorumlanmaya çalışılmıştır.

Yapılan çalışmada; nane, biberiye, kekik, karanfil, ısırgan, lavanta, çam terebenti, sarımsak ve ardıç olmak üzere dokuz farklı bitkisel uçucu yağın polimerik mamül üzerindeki antimikrobiyal etkisi araştırılmıştır. Böylece elde edilen hemiselüloz esaslı, uçucu yağ katkılı polimerik jel filmlerin *E. coli*'ye karşı antimikrobiyal etkinlikleri agar (disk) difüzyon metodu ile araştırılmıştır. Bitkisel uçucu yağların, biyobozunma hızları üzerine etkisi ise toprak florası içerisine gömme testleri yapılarak tespit edilmiştir. Jel filmlerin zamana bağlı olarak meydana gelen ağırlık kayıpları belirlenmiş, biyolojik bozunma davranışları Coats Redfern Metodu kullanılarak irdelenmiştir. Bozunmayı en iyi temsil eden teorik model eşitliği regresyon analizi ve ANOVA tablosu ile saptanmış ve bozunma hızı en uygun model eşitliği dikkate alınarak hesaplanmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Polimerik jel filmlerin sentezlenmesi

Hemiselüloz esaslı polimerik jel filmler, atık çay posasından kimyasal ön işlem süreçleri ile izole edilerek kazanılan hemiselüloz kullanılarak, serbest radikalik polimerizasyon mekanizmasına göre çözelti ortamında sentezlendi. Filmlerin üretimi ise çözelti dökme metoduna göre gerçekleştirildi.

Polimerik filme çevresel uyarıcılara cevap verebilme özelliği katabilmek amacı ile AAm (akrilamid) komonomeri, fiziksel dayanımını arttırmak amacı ile kitosan katkı maddesi ilave edildi. Jel filmlere antimikrobiyal özellik katmak için ise nane, biberiye, kekik, karanfil, ısırgan, lavanta, çam terebenti, sarımsak ve ardıç bitkisel uçucu yağları eklendi. Polimerik filmin çözünmesini önlemek, ağ yapılı polimerik matris oluşturmak için metilen bis akrilamid (BIS) çapraz bağlayıcısı kullanıldı. Hızlandırıcı kullanılmayan film üretim sürecinde, başlatıcı olarak amonyum persülfat kullanıldı. Tablo 1'de çalışmada kullanılan kimyasallar ve özellikleri sunulmuştur.

Hemiselüloz esaslı jel filmleri hazırlamak için çay posasından izole edilerek kazanılan hemiselülozun, %10'luk NaOH çözeltisi içerisinde katı sıvı oranı 1/10 (w/v) olacak şekilde, 55-60 °C'de 120 dk. süre ile 800 rpm karıştırma hızında karıştırılarak çözündürüldü. Tam çözünme sağlandıktan sonra oda sıcaklığına kadar soğutulan çözeltiye, 800 rpm karıştırma eşliğinde Tablo 1'de ifade edilen oranda sırası ile komonomer (AAm) ve çapraz bağlayıcı (BIS) ilave edildi. Tam karışma sağlandıktan sonra yapıya karışım oranı dikkate alınarak hesaplanan miktarda %2'lik asetik asit çözeltisinde çözündürülecek hazırlanmış katkı maddesi (kitosan) ilave edildi. Son olarak, hesaplanan miktarda redoks başlatıcısı (APS) eklendi ve bitkisel uçucu yağ esansları (nane, biberiye, kekik vb) ilave edilip karışım jelleşme süreci başlamadan hızlıca petri kaplarına döküldü. Üretilen polimerik filmlerin kalınlığını belirli bir aralıkta tutmak, yani standart kalınlıkta film üretimi gerçekleştirmek için 90x15'lik petri kapları kullanılmıştır.

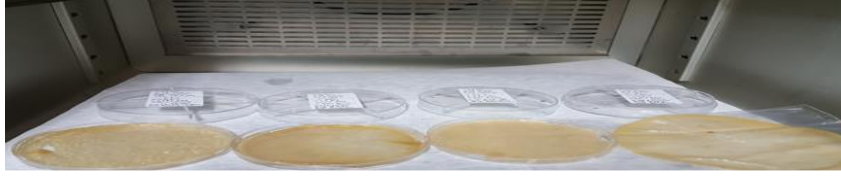
Tablo 1. İncelenen polimerizasyon parametreleri ve aralıkları

Kullanım amacı	Kimyasal	Aralık Oranları
Monomer	Hemiselüloz	KM/HC(w/w):0.25/1
Komonomer	AAm (akrilamid)	
Çapraz bağlayıcı	Metilen bisakrilamid (BIS)	ÇB/HC (w%): 0.5
Başlatıcı türü	Amonyum persülfat (PPS)	BŞ/HC (w%): 0.5
Katkı maddesi	Kitosan	Kitosan/HC(w/w):0.05/1
Doğal antimikrobiyal madde (bitkisel uçucu yağ)	Nane, Biberiye Kekik, Karanfil Isırgan, Lavanta Çam terebenti Sarımsak, Ardıç	AM/HC(v/w ml/g): 0.1/1
KM: Komonomer, HC: Hemiselüloz, ÇB: Çapraz bağlayıcı, BŞ: Başlatıcı, AM: Antimikrobiyal bitkisel uçucu yağ		

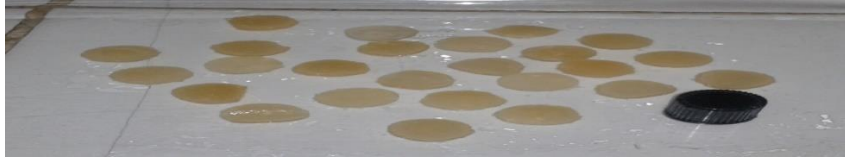
Dökümü gerçekleştirilen jel solüsyonun, 60 °C'de 24 saat etüvde tam olarak jelleşmesi sağlandı. Jelleşme süreci tamamlanan filmler, saf su ile yıkanarak yapısındaki reaksiyona katılmayan bileşenler/safsızlıklar tamamen uzaklaştırıldı. Yıkama işlemi sonrası polimerik filmler aynı şartlarda tekrar kurutuldu. Antimikrobiyal analiz ve biyobozunma testinde kullanılmak üzere, jel filmlerden eşit çapta diskler kesildi. Tüm filmler aynı şartlarda üretildi ve analiz sürecine kadar desikatör içerisinde muhafaza edildi. Üretim sürecine ilişkin görseller Şekil 1, 2 ve 3'de sunulmuştur.



Şekil 1. Sentezlenen jel filmlerin yıkama süreci



Şekil 2. Sentezlenen jel filmlerin kurutma süreci



Şekil 3. Sentezlenen jel filmlerin analiz süreçleri için eşit çaplarda hazırlanması süreci

2.2. Antimikrobiyal analiz

Doğal antimikrobiyal etkisi olduğu çeşitli çalışmalarda ifade edilen dokuz farklı bitkisel uçucu yağ (nane, biberiye, kekik, karanfil, ısırgan, lavanta, çam terebenti, sarımsak, ardıç) kullanılarak hazırlanan hemiselüloz bazlı jel filmlerin antimikrobiyal etkisi agar (disk) difüzyon yöntemi ile gerçekleştirildi. Antimikrobiyal analiz için *E coli* stok kültürü kullanıldı. Analiz iki paralel olacak şekilde yürütüldü.

Yayma tekniği [14, 19, 20] ile gerçekleştirilen analizde, mevcut stok kültürlerden, alınan *E coli* mikroorganizmasının Nutrient Broth besiyerine inoküle edildi. Duyarlılık testi için inokülüm miktarları, McFarland 0.5 standart değerine ulaşıncaya kadar, 37 °C'de inkübasyona bırakıldı. Yoğunluğu ayarlanmış kültürlerden (106 kob/ml), 0.5 mL alınarak, kültürün steril swab yardımıyla, Nutrient Agar besiyerine ekimleri gerçekleştirildi. Yüzey ekimi yapılmış agar plağı üzerine, nane, biberiye, kekik, lavanta vb. uçucu yağı içeren hemiselüloz bazlı filmlerden kesilen eşit çapa sahip disk şeklindeki (dairesel) filmler yerleştirildi. Petriler 37 °C'de 24 saat inkübasyona bırakıldı.

İnkübasyon sonucunda, filmlerin etrafında oluşan berrak zon çapı yani üremenin inhibe edildiği bölgeleri saptamak için petri kaplarının fotoğrafları çekildi. MATLAB programının R2017 sürümünün görüntü analiz teknikleri kullanılarak antimikrobiyal uçucu yağ içeren jel filmlerin antimikrobiyal etkinlikleri karşılaştırmalı olarak ortaya konuldu. Antimikrobiyal analiz sonucunda, elde edilen fotoğrafların görüntü analizinde kullanılan MATLAB program kodu aşağıda sunulmuştur.

Matlab Program kodu:

```

clc
clear all
ilkresim = imread('rnumune_no_2.jpg');
imshow(ilkresim);
I = rgb2gray(ilkresim);
figure, imshow(I);
K=ilkresim;
for i=1:2988
for j=1:5312
    if (K(i,j,1) < 170 && K(i,j,2) < 170 && K(i,j,3)< 170)
        K(i,j,1)=0;
        K(i,j,2)=0;
        K(i,j,3)=0;
    else
        K(i,j,1)=255;
        K(i,j,2)=255;
        K(i,j,3)=255;
    end
end
end
figure, imshow(K)
T=im2bw(K);
figure, imshow(T)

```

2.3. Biyobozunurluk testi

Hazırlanan polimerik jel filmlerin yapısına ilave edilen antimikrobiyal özellik gösterdiği bilinen uçucu yağların biyobozunma hızı üzerine etkisinin olup olmadığını belirlemek amacıyla, biyobozunma testleri yapıldı. Geleneksel bir yöntem olan ve pek çok çalışmada da kullanılan toprağa gömme testi, atıkların gerçek bertaraf koşullarına benzer olması nedeniyle, çeşitli mikroorganizma popülasyonlarının dahil olduğu enzimatik testle karşılaştırıldığında daha etkili bir yöntemdir [21, 23].

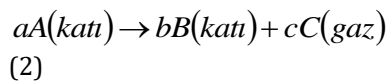
Bu amaçla farklı bölgelerden (Elazığ il sınırları içerisinde) temin edilen toprak örnekleri homojen hale getirildi ve nem içeriği tayin edildi. Polimerik film örneklerinin toprağa oranı ağırlıkça %1.0-0.5 olacak şekilde gömme testleri gerçekleştirildi. Tüm polimerik jel film örnekleri ayrı ayrı plastik kaplar içerisinde aynı derinliğe gömüldü. Gömme işlemi sonrasında plastik kaplar inkübatör içerisinde yerleştirildi ve ortam sıcaklığı 30°C±5°C olacak şekilde sabit tutuldu. Biyobozunurluk testleri boyunca toprağın nem içeriği su ilavesi ile ölçülen ilk nem (doğal nem) değerinde sabit tutulmaya çalışıldı. Belirli periyotlarda jel film örnekleri topraklar içerisinde çıkarılıp su ile yıkandıktan sonra ıslak havlu ile kurutulup tartıldı. Ağırlık azalmaları zamana bağlı olarak kaydedildi. Analiz iki paralel olacak şekilde yürütüldü ve sonuçların ortalaması alınarak kinetik hesaplama yapıldı.

Polimerik filmlerin bozunma hızları, zamana bağlı ağırlık azalması verilerinin kinetik analizi yapılarak ortaya konulmaya çalışıldı. Coats Redfern metodu kullanılarak gerçekleştirilen kinetik analizde, 20 farklı teorik bozunma model eşitliği dikkate alınarak, biyolojik bozunma sürecini en iyi temsil eden bozunma model eşitlikler belirlendi. Hesaplamalar için Excel programının veri çözümleme eklentisi içerisindeki Regresyon analizi kullanıldı. En uygun model eşitliğin hangisi olduğu kararı, regresyon analizi ile elde edilen R² katsayısı ve ANOVA tablosu anlamlılık katsayısının eş zamanlı değerlendirilmesi ile belirlendi. Tespit edilen en uygun teorik model eşitlikleri dikkate alınarak bozunma hızları hesaplandı.

2.4. Coats Redfern Metodu

Farklı şartlarda elde edilen polimerik jel filmlerin bozunma hızları, deneysel olarak elde edilen zamana bağlı bozunma verilerinin, integral çözünmeyi esas alan **Coats Redfern** metodu [24] ile belirlendi.

Bu metoda göre katı bir maddenin bozunması, aşağıda verilen (2) nolu genel reaksiyon ile ifade edilir.



Katı maddenin bozunma hızı ise, Eşitlik 3 kullanılarak hesaplanabilir.

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T)f(\alpha) \quad (3)$$

Burada α dönüşüm kesri ($\alpha = \frac{m_i - m_t}{m_i - m_s}$), t zaman, k(T) hız sabiti ve f(α) katı faz teorik bozunma model

eşitliğidir. α dönüşüm kesrinde yer alan, m_i : filmin başlangıçtaki kütesini; m_t : herhangi bir t anındaki filmin kütesini ve m_s ise ön görülen bozunma süresi sonunda filmin kütesini ifade etmektedir. Eşitlik 3 düzenlenirse;

$$g(\alpha) = \int \frac{d\alpha}{f(\alpha)} = k(T)t + C \quad (4)$$

elde edilir. t'ye karşı g(α) değerleri grafiğe geçirdiğinde elde edilen doğru denklemlerinden integral sabiti, C ve hız sabiti, k(T) belirlenir. Her bir "katı faz dönüşüm teorik modeli" için t'ye karşı g(α) değerlerinin grafiğe geçirilmesi ile elde edilen doğruların regresyon katsayıları dikkate alınarak, biyolojik bozunma sürecini en iyi temsil eden teorik bozunma modelinin hangi modeller olduğuna karar verilir. Çalışma kapsamında kullanılan katı hal bozunma teorik model eşitlikleri ve integre edilmiş formları Tablo 2'de görülmektedir. İlgili tabloda toplam 20 adet "Katı faz dönüşüm modeli" yer almaktadır.

Tablo 2. Katı faz dönüşüm teorik modelleri [25, 26]

Model	f(α)	g(α)
*Kimyasal kinetik F(0), *Power Law (P1), *Bir boyutlu etkileşim Geometrisi (R1)	1	α
*Kimyasal Kinetik F(1/2), *Etkileşim Geometrisi Silindirik sistemde (R2)	$(1 - \alpha)^{1/2}$	$[1 - (1 - \alpha)^{1/2}]$
*Kimyasal Kinetik F(2/3), *Etkileşim Geometrisi Küresel sistemde (R3)	$(1 - \alpha)^{2/3}$	$[1 - (1 - \alpha)^{1/3}]$
*Kimyasal Kinetik F(1) *Avrami-Erofeev eşitliği (A1, n=1)	$(1 - \alpha)$	$-\ln(1 - \alpha)$
Kimyasal Kinetik F(2)	$(1 - \alpha)^2$	$(1 - \alpha)^{-1} - 1$
Kimyasal Kinetik F(3)	$(1 - \alpha)^3$	$[(1 - \alpha)^{-2} - 1] / 2$
Power law (P2)	$2\alpha^{1/2}$	$\alpha^{1/2}$
Power law (P3)	$3\alpha^{2/3}$	$\alpha^{1/3}$
Power law (P4)	$4\alpha^{3/4}$	$\alpha^{1/4}$
Avrami-Erofeev eşitliği (A2, n=2)	$2 \times (1 - \alpha) \times (-\ln(1 - \alpha))^{1/2}$	$[-\ln(1 - \alpha)]^{1/2}$
Avrami-Erofeev eşitliği (A3, n=3)	$3 \times (1 - \alpha) \times (-\ln(1 - \alpha))^{2/3}$	$[-\ln(1 - \alpha)]^{1/3}$
Avrami-Erofeev eşitliği (A4, n=4)	$4 \times (1 - \alpha) \times (-\ln(1 - \alpha))^{3/4}$	$[-\ln(1 - \alpha)]^{1/4}$
Parabolic law (D1)	$1/2\alpha$	α^2
Holt-Cutler-Wadsworth/Valensi eşitliği (D2)	$1/(-\ln(1 - \alpha))$	$[(1 - \alpha)\ln(1 - \alpha)] + \alpha$
Jander eşitliği (D3)	$3 \times (1 - \alpha)^{2/3} / 2 \times [1 - (1 - \alpha)^{1/3}]$	$[1 - (1 - \alpha)^{1/3}]^2$
Ginstling- Brounshtein eşitliği (D4)	$3/2 \times [(1 - \alpha)^{1/3} / 1 - (1 - \alpha)^{1/3}]$	$1 - (2\alpha/3) - (1 - \alpha)^{2/3}$

3. Bulgular ve Tartışma

Agar (disk) difüzyon prosedürüne uygun olarak gerçekleştirilen analizlere ait bazı görseller Şekil 4’de sunulmuştur. Farklı bitkisel uçucu yağları içeren hemiselüloz bazlı filmlerin *E. coli*’e karşı antimikrobiyal aktiviteleri, inkübasyon sonrasında Nutrient Agar plaklarında oluşan inhibisyon zon çaplarının ölçülmesiyle belirlenmiştir. Antimikrobiyal analiz sonucunda oluşan inhibisyon zon çapları (mm olarak), zon sonrası mikroorganizma üreme yoğunluklarını gösteren renk pikselleri, görüntü analizi sonucu elde edilen RGB (Red Green Blue) değeri olarak Tablo 3’de özetlenmiştir.

Tablo 3 irdelendiğinde, agar (disk) difüzyon testi sonucunda uçucu bitkisel yağ içermeyen yani kontrol örneği olarak kullanılan hemiselüloz filmde normal üremenin gerçekleştiği, bundan dolayı inhibisyon zonunun oluşmadığı, yani hiç antimikrobiyal etki göstermediği teyit edilmiştir. Diğer taraftan kontrol filminin üzerinde üremenin olduğu da gözlemlenmiştir. Çalışmada kullanılan biberiye, kekik, karanfil ve ısırgan uçucu yağı içeren polimerik filmlerin ise antimikrobiyal etki göstererek, üremenin hiç gerçekleşmediği bir inhibisyon zon bölgesi oluşturduğu belirlenmiş ve oluşan zon ölçüm değerleri Tablo 3’de sunulmuştur. En etkin antimikrobiyal etkiyi biberiye uçucu yağı kullanılarak hazırlanan jel filmin gösterdiği ortaya konulmuştur. Diğer bitkisel uçucu yağların ise üremenin gerçekleşmediği bir zon oluşturmadıkları, ancak üreme aktivitesini düşürdükleri görüntü analizi ile belirlenmiştir. Diğer bitkisel uçucu yağların üreme aktivitesinde düşüşe yol açtığı yorumu, üremenin tam gerçekleştiği yere oranla daha açık renkte olan (Renk açıklık bölgesi) bir bölgenin mevcudiyetine dayandırılmıştır. Üremenin tam gerçekleştiği bölge ile üreme aktivitesinin düşük olduğu bölgeler görüntü analizi ile elde edilen RGB değerleri ile saptanmıştır ve Tablo 3’de üreme hızının düştüğü bölge çapları sunulmuştur.

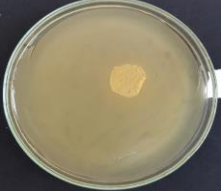
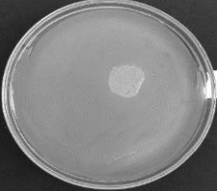








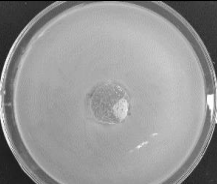
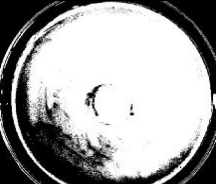
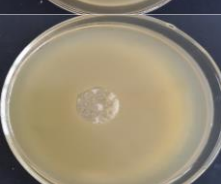
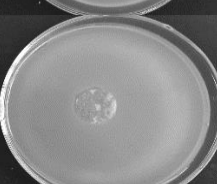
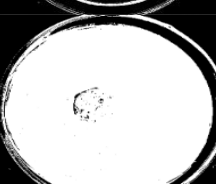
Elde edilen bulgular ve deneysel gözlemler, antimikrobiyal uçucu yağ içeren jel filmlerin antimikrobiyal etkisinin uçucu yağın *E. coli*’nin ekimi gerçekleştirilen agar üzerine difüzyonuna dayandığını göstermiştir. İnhibisyon zon çapının; diskteki antimikrobiyal maddenin miktarı, disk çapı, difüzyon yeteneği ve petri kutularındaki agarın kalınlığı gibi etmenlere bağlı olarak değiştiği, bu nedenle esansiyel yağların antimikrobiyal etkinliğinin kıyaslanması için agar (disk) difüzyon metodununun çok uygun bir metod olmadığı [27, 28] bilinse de, serbest uçucu yağlar ile çalışmamızda kullandığımız polimerik film yapısına tutuklanmış uçucu yağların antimikrobiyal etkisini kıyaslamak amacı ile literatür sunulan veriler ile kıyaslama yapmanın yararlı olduğunu düşünülmüştür.

Kekik uçucu yağının, *E.coli* üzerine antimikrobiyal etkisinin agar (disk) difüzyon metodu ile incelendiği Teixeira ve diğ., (2013)’in [29] çalışmasında inhibisyon zon çapı 47 mm, Fadli ve diğ., (2012) ‘in [30] çalışmasında ise zon çapının uçucu yağ konsantrasyonuna bağlı olarak 25-30 mm aralığında değiştiği sunulmuştur. Çalışmamızda ise, kekik uçucu yağı tutuklanmış polimerik jel filmlerin oluşturduğu inhibisyon zon çapı 4mm ile sınırlı kalmıştır. Bu kıyaslama, polimerik matriks içerisine tutuklanmış uçucu yağların literatürde sunulan serbest uçucu yağlar gibi davranmadığını ve uçucu yağların polimerik film içerisinden agar üzerine difüzyonunu sınırlandırdığını ortaya koymaktadır.


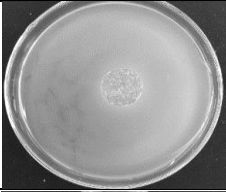

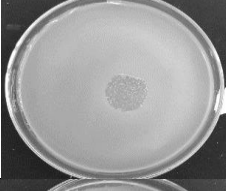
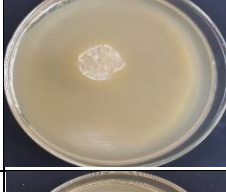
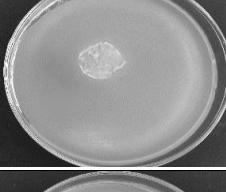
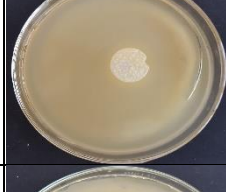
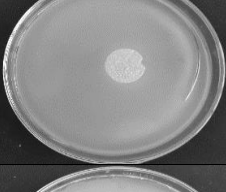




Şekil 4. Antimikrobiyal analiz sürecine ilişkin görseller
(Kullanılan uçucu yağlar; sterilizasyon; üretilen jel filmler; ekim ve inkübasyon süreçleri)

Tablo 3. Antimikrobiyal analiz sonuçları

Anti. Mik. Madde	Renkli Resim	Siyah Beyaz Resim		İnhibisyon Zon Çapı mm	İnhibisyon Zon pikseli RGB	Renk Açıklık Bölgesi (mm)	Açık Bölge Pikseli RGB	Temel Piksel RGB	Jel Pikseli RGB
Uçucu yağ içermeyen örnek				-	-	-	-	177x159x107	209x178x111
Biberiye				Sol: 2.46 Alt: 5.258 Sağ: 1.21 Üst: 1.33	136x110x75	Sol: 2.917 Alt: 1.804 Sağ: 4.049 Üst: 4.82	185x161x137	176x156x116	183x142x100
Kekik				Sol: 0.311 Alt: 1.153 Sağ: 0.498 Üst: 0.535	156x148x137	Sol: 3.273 Alt: 3.491 Sağ: 3.491 Üst: 4.021	193x184x175	189x175x146	173x157x134
Karanfil				Sol: 1.465 Alt: - Sağ: 1.221 Üst: -	136x125x107	Sol: 4.029 Alt: 3.1750 Sağ: 2.1981 Üst: 2.1981	177x160x132	172x156x132	186x168x111
Isırgan				Sol: 0.626 Alt: - Sağ: - Üst: 1.755	170x150x117	Sol: 1.5669 Alt: 1.2863 Sağ: 0.638 Üst: 1.7256	179x157x116	167x150x107	171x155x130

Tablo 3. Antimikrobiyal analiz sonuçları (Devam)

Anti. Mik. Madde	Renkli Resim	Siyah Beyaz Resim	İnhibisyon Zon Çapı mm	İnhibisyon Zon pikseli RGB	Renk Açıklık Bölgesi mm	Açık Bölge Pikseli RGB	Temel Piksel RGB	Jel Pikseli RGB
Lavanta			-	-	Sol: 2.7898 Alt:3.6388 Sağ:4.305 Üst:2.9717	204x193x171	174x170x141	230x203x195
Çam			-	-	Sol: 2.2283 Alt:2.8215 Sağ:3.3425 Üst:3.7139	212x194x156	187x172x139	186x175x156
Nane			-	-	Sol: 0.874 Alt:1.79 Sağ:1.274 Üst:4.837	186x164x127	181x164x134	209x200x191
Ardıç			-	-	Sol: 2.7809 Alt:2.407 Sağ: 3.2865 Üst:2.4017	186x169x127	173x155x117	213x201x189
Sarımsak			-	-	Sol: 3.2276 Alt: 1.7379 Sağ:2.9793 Üst:2.1103	212x193x151	195x177x139	222x206x180

Polimerik jel filmlerden uçucu bitkisel yağların agar üzerine etkin bir şekilde difüze olamamasının, jel filmlerin çapraz bağ yoğunluğunun yüksek olmasından ve uçucu bitkisel yağların hidrofobik özellik taşımasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Çapraz bağ yoğunluğunun yüksek olmasının, agarın bünyesindeki suyun ağ yapılı polimerik film içerisine nüfuzunu belirli ölçüde sınırlandırarak uçucu bitkisel yağların jel filmde agara difüze olmasını büyük ölçüde azalttığı şeklinde yorumlanmıştır. Propolis tutuklanmış PHB(polihidroksibütirat) filmleri ile yapılan antimikrobiyal çalışmada da çalışmamızda elde edilen sonuçlara benzer olarak bir difüzyon direnci olduğu ifade edilmiştir [31]. Yapılan çalışmalarda mikroorganizmanın gelişmesinin ve antimikrobiyal maddenin besini yerine difüzyonunun; agar kompozisyonu, filmin kimyasal yapısı ve film içerisindeki çapraz bağların oranından etkilendiği ortaya konulmuştur. Doğal antimikrobiyal ajanlarla, antimikrobiyal özellik kazandırılan filmlerin, antimikrobiyal etkisinin mikroorganizmanın gelişimi ve antimikrobiyal maddenin besini yerine difüzyon oranına bağlı olarak değişiklik gösterdiği ifade edilmiştir [19, 32].

Elde edilen sonuçlar ışığında, antimikrobiyal etkisi belirlenen uçucu yağların, antimikrobiyal etkinliğinin daha net olarak gözlemlenebilmesi ve yorumlanabilmesi için, jel filmlerin yapısına ilave edilen bitkisel uçucu yağ konsantrasyonlarının artırılması ya da çapraz bağ yoğunluğu düşük filmler ile çalışmanın tekrarlanması gerektiği sonucuna varılmıştır.

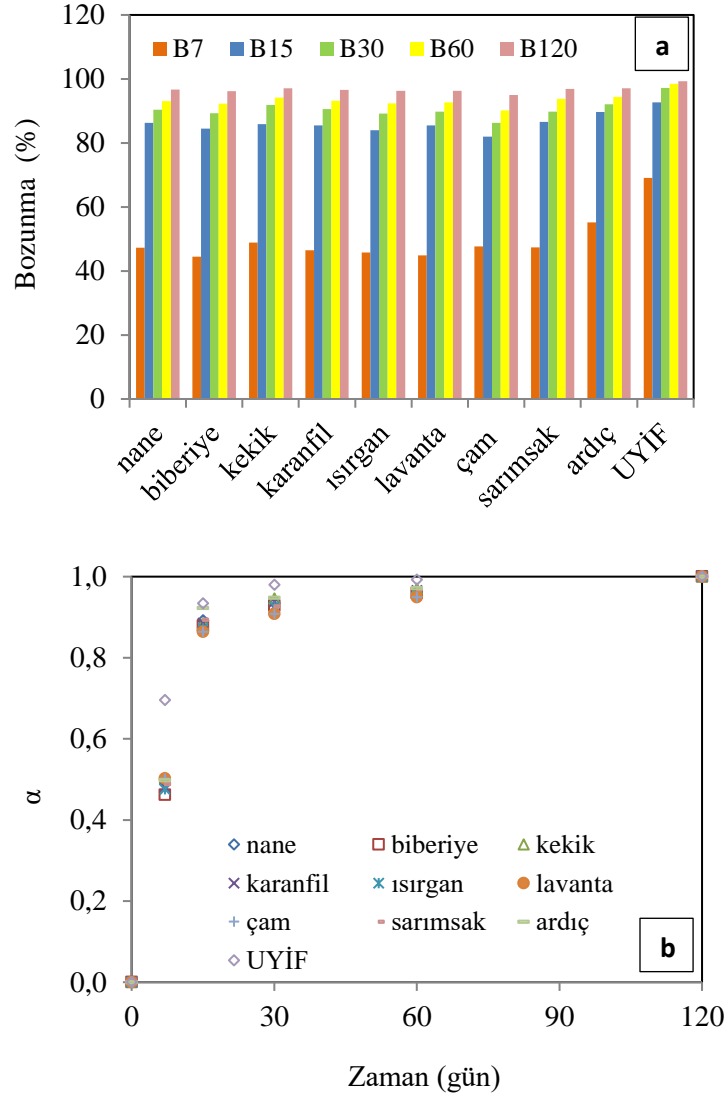
Biyobozunurluk testleri ve biyobozunma kinetiği

Polimerik malzemelerin bozulması, sadece polimer bilimi açısından değil, özellikle biyomedikal alan uygulamalarında çok önemlidir. Geleneksel ambalaj materyalleri ve biyomedikal malzemeler genellikle sentetik yapıya sahiptir. Sentetik polimerik mamuller ekonomik ve kullanışlı olmalarına karşın biyobozunur yapıya sahip olmadıkları için doğada uzun yıllar karbon döngüsüne katılmadan çevresel kirlilik unsuru olarak kalırlar. Bu sebeple son zamanlarda özellikle polimerik mamullerin yaygın olarak kullanıldığı sektörlerde, biyobozunur nitelikte polimerik ürünlerin üretimine yönelik çalışmalar yapılmaktadır [11, 18].

Bu çalışmada bitkisel uçucu yağların biyobozunma üzerine etkisinin anlaşılabilmesi ve bitkisel uçucu yağ katkılı polimerik jel filmlerin biyobozunma hızlarının kıyaslanabilmesi amacıyla, farklı bitkisel uçucu yağ içeren jel film örneklerinin toprak florası içerisine gömme testleri yapılmıştır. Zamana bağlı olarak jel filmlerin ağırlık kayıpları belirlenerek biyolojik bozunma yüzdeleri 7-15-30-60. ve 120. gün sonunda hesaplanmıştır. Farklı zamanlarda biyobozunma yüzdesinin antimikrobiyal uçucu yağ türü ile değişimi Şekil 5(a)'da, dönüşüm kesrinin zamanla değişimi ise Şekil 5(b)'de sunulmuştur.

Biyolojik olarak bozunabilen polimerlerin, bir yıl içinde doğal biyolojik döngüsünü tamamladığı, toksik olmayan suya veya karbondioksit'e ayrıştığı kabul edilmektedir [33]. Şekil 5(a) incelendiğinde farklı şartlarda üretilen polimerik filmlerin 60 günlük bozunma süresi sonunda toprak florasında, % 95-98 oranında bozunduğu yani, hemiselüloz esaslı jel filmlerin biyobozunur nitelikte olduğu kanıtlanmıştır. Şekil 5 (b)'den zaman ve dönüşüm arasındaki ilişkinin lineer olmadığı, bozunma hızının zamanla azaldığı, ilk 30 günlük süre içerisinde biyolojik bozunmanın büyük ölçüde tamamlandığı görülmektedir. Şekil 5(a-b) birlikte irdelendiğinde, antimikrobiyal uçucu yağ katkısının nihai bozunma yüzdesini kayda değer ölçüde değiştirmediği ancak, ilk 60 günlük biyolojik bozunma süreci için, dönüşüm kesrindeki artış trendini etkilediği görülmüştür. Dönüşüm kesrindeki artış trendi üzerinde en yüksek etkiye sahip olan antimikrobiyal uçucu yağın çam terebentini olduğu belirlenmiştir. Şekil 5'de sunulan grafikler dikkate alınarak yapılan yorumlar, Tablo 4'de sunulan kinetik bozunma hız verileri ile uygunluk göstermektedir.

Biyolojik parçalanma süresinin ya da başka bir yaklaşımla belirli bir süre zarfında ulaşılabilen bozunma kesrinin; polimerik mamulün kimyasal yapısına (fonksiyonel grup stabilitesi, reaktivite, hidrofilit ve denge şişme değeri vb), fizikokimyasal özelliklerine (moleküler ağırlık, gözeneklilik, kalınlık, esneklik ve morfoloji vb.) ve çevresel faktörlere (çevresel koşullar, mikrobiyal popülasyonun aktivitesi) bağlı olduğu bilinmekle [34, 35] birlikte, bu çalışma elde edilen sonuçların anlamlı ve özgün olduğunu daha nicel olarak ortaya koyabilmek açısından, literatürde sunulmuş biyopolimerlerlik filmlerin bozunma verileri ile kıyaslama yapılmasının faydalı olacağı düşünülmüştür.



Şekil 5. (a) Antimikrobiyal uçucu yağ türünün biyolojik bozunma üzerine etkisi (b) Dönüşüm kesrinin zamanla değişimi (U.Y.İ.F: uçucu yağ içermeyen film)

Poli(laktik asit) (PLA) ve polihidroksialkanoatlar (PHA) filmlerinin biyobozunma davranışının gömme testleri ile karşılaştırmalı olarak incelendiği bir çalışmada [36], PLA filmlerinin toprak gömme testleri sonucu bozunmasının beklenenden yavaş olduğu, 7 aylık süre sonunda bile PLA filmlerinin parçalanmasının tamamlanmadığı, biyobozunma sürecinin film kalınlığı ile doğrudan ilişkili olduğu sunulmuştur. PHA filmlerinin ise nisbeten daha yüksek biyolojik bozunmanın hızına sahip olduğu, toprak bünyesindeki mikroorganizmaların çevre sıcaklığından etkilenmeksizin PHA filminin yüzeyine kolayca saldırdığı ifade edilmiştir.

Modelli ve diğ. (1999) çalışmalarında [37], toz haline getirdikleri ($\geq 100\mu\text{m}$) poli (3-hidroksibutirat) (PHB) örneğinin, 65 günlük bozunma süresi sonunda % 90 oranında bozunduğunu ve biyolojik bozunma sürecinin birinci dereceden kinetiğe uyduğunu ortaya koymuşlardır.

Partikül büyüklüğünün biyobozunurluk üzerindeki rolünü daha fazla araştırmak için yürütülen başka bir çalışmada, polibütilen sebakat peletleri öğütülmüş ve böylece farklı yüzey alanlarına sahip (33, 89, 193 ve 824 cm^2/g) dört numune elde edilmiştir [2]. Farklı yüzey alanına sahip numuneler 138 gün boyunca toprakta biyodegradasyon açısından test edilmiştir. 138. gün sonunda 33 cm^2/g yüzey alanına sahip örnekler hariç, tüm örneklerin % 80 ila % 90 arasında bozunduğu, zamana bağlı bozunma

eğrisinin lineer olduğu, teorik maksimum biyodegradasyon hızının Lineweaver-Burk yaklaşımı (lineer regresyon) ile $k_{max} = 97\text{mg polimer/gün}$ olarak hesaplandığı sunulmuştur.

Laktik-Glukolik asit polimerlerinin (PLGA) biyodegradasyonunun incelendiği diğer bir çalışmada [38], biyobozunma hızının polimer bileşimi, polimer moleküler ağırlığı ve biyodegradasyon ortamının pH'ından etkilendiği bildirilmiştir. Yüksek moleküler ağırlığa sahip PLGA'ların, daha düşük moleküler ağırlığa sahip olanlardan daha hızlı bozduğu ayrıca bazik ortam şartlarında, asidik ortama kıyasla PLGA'nın biyobozunmasının yavaşladığı ortaya koyulmuştur. Farklı kompozisyonlarda üretilen PLGA örneklerinin bozunma verilerinin birinci derece kinetiğe uyduğu ve hız sabiti değerlerinin, 0.02-0.1 gün⁻¹ aralığında olduğu sunulmuştur.

Zamana bağlı biyolojik bozunma verilerinin regresyon analizi ve elde edilen ANOVA tablosu sonucunda, diğer kinetik model eşitliklerine kıyasla, Kimyasal Kinetik F(2) Modeli için elde edilen regresyon katsayılarının daha yüksek olması sebebi ile, jel filmlerin bozunmasını temsil eden en iyi modelin Kimyasal Kinetik F(2) olduğuna karar verilmiştir. Bu nedenle Tablo 4'de yalnızca kimyasal kinetik F(2) model eşitliği dikkate alınarak hesaplanan regresyon katsayıları, doğru denklemleri, bozunma hız sabiti, ANOVA katsayıları ve standart hata değerleri sunulmuştur.

Tablo 4 incelendiğinde regresyon analizi sonucu, tespit edilen en uygun model eşitliklerin regresyon katsayılarının 0.97 ile 0.99 arasında olduğu görülmektedir. Basit regresyon çıktısındaki ANOVA tablosu bize regresyon modelimizin genel olarak anlamlı bulunup bulunmadığını gösterir. Burada F-değerine ($F >> 0$) ve p-değerine ($p < 0.001$) bakarak regresyon modelimizin anlamlı bulunduğunu söyleyebiliriz. Yani kimyasal kinetik F(2) model denklemini kullanılarak, bozunma süresi ile zamana bağlı ağırlık azalması arasında anlamlı bir ilişki kurulabildiği anlaşılmıştır.

Tablo 4'de verilen bozunma hız sabitlerinin $k(T)$ değerleri dikkate alındığında, polimerik film yapısına katılan bitkisel uçucu yağların biyolojik bozunma hızını önemli ölçüde azalttığı belirlenmiştir. Antimikrobiyal uçucu yağ türlerinin tümünün, antimikrobiyal uçucu yağ içermeyen aynı bileşime sahip filmin bozunma hızına kıyasla, bozunma hızını yaklaşık 5 kat düşürdüğü saptanmıştır. Biyolojik bozunma hızı üzerinde en yüksek etkiye sahip olan antimikrobiyal uçucu yağlar çam, biberiye ve ısırganıdır.

Tablo 4. Regresyon analizi sonucu elde edilen biyolojik bozunma sürecini en iyi temsil eden model eşitlikleri, regresyon katsayıları, doğru denklemleri, ANOVA katsayıları.

Antimikrobiyal uçucu yağ türü	Model	Denklem	R ²	k(T)	Standart Hata	F	P (sig.)
Uçucu yağ içermeyen film (UYİF)	F(2)	2.1573t-10.316	0.9802	2.1573	8.434	148.19	0.00100
Nane	F(2)	0.4428t-0.0447	0.9802	0.4428	1.728	148.55	0.00100
Biberiye	F(2)	0.4037t-0.1390	0.9830	0.4037	1,461	172.97	0.00095
Kekik	F(2)	0.5681t-0.9428	0.9899	0.5681	1.580	292.79	0.00043
Karanfil	F(2)	0.4873t-0.5226	0.9884	0.4873	1.445	256.51	0.00052
Isırgan	F(2)	0.4051t-0.3085	0.9882	0.4051	1.217	250.74	0.00054
Lavanta	F(2)	0.4392t-0.2059	0.9835	0.4392	1.564	178.51	0.00090
Çam	F(2)	0.3173t-0.0911	0.9824	0.3173	1.165	167.91	0.00099
Sarımsak	F(2)	0.5257t-1.1348	0.9829	0.5257	1.908	171.97	0.00095
Ardıç	F(2)	0.5914t-0.0527	0.9744	0.5914	2.632	114.35	0.00074

4. Sonuç

Hemiselüloz esaslı polimerik jel filmlerin yapısına katılan bitkisel uçucu yağların, antimikrobiyal etkinliğini ve polimerik filmlerin biyobozunma hızı üzerine etkisini araştırmak amacı ile yürütülen çalışmada;

1. Polimerik jel film yapısına ilave edilen uçucu yağların antimikrobiyal etkinliğinin, uçucu yağın film bünyesinden agar üzerine difüzyonuna bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Fazlar arası kütle transferinin, jel filmlerin çapraz bağ yoğunluğu ve uçucu yağların hidrofobik yapıya sahip olması nedeniyle sınırladığı tespit edilmiştir.
2. Biberiye, kekik, karanfil ve ısırgan uçucu yağlarını içeren jel filmlerin antimikrobiyal etkiye sahip oldukları yani *E-coli*'nin üremesi üzerinde belirgin bir inhibisyon etkisi oluşturdukları tespit edilmiştir. Polimerik filmlerin antimikrobiyal etkinliğini daha etkin yorumlamak için polimerik yapıya ilave edilen uçucu yağ konsantrasyonunun etkisinin de incelenmesinde yarar olacağı sonucuna varılmıştır.
3. Farklı şartlarda üretilen hemiselüloz esaslı jel filmlerin biyobozunur nitelik taşıdığı, 60 günlük süre sonunda toprak florasında, % 95-98 oranında bozunduğu tespit edilmiştir. Regrasyon analizi sonucu Kimyasal kinetik (F2) model eşitliğinin biyolojik bozunma sürecini temsil eden iyi model olduğu ortaya konulmuştur. Yapılan kinetik hesaplamalar sonucunda, antimikrobiyal uçucu yağ türlerinin, biyobozunma hızını yaklaşık 5 kat düşürdüğü, ancak 120. gün sonundaki nihai bozunma yüzdesini değiştirmedikleri sonucuna varılmıştır.

Teşekkür

Şeyda TAŞAR'ın doktora tezi olan bu makale, 2211-C Öncelikli Alanlar Yurt İçi Doktora Burs Programı kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Ayrıca çalışma MF-16.11 Proje Numarası ile Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Destekleme Birimi tarafından doktora kapsamında desteklenmiştir.

Kaynakça

- [1]. Tezcan, G., "Biyoesaslı/Biyobozunur Polimerlerin Sentezi ve Film Oluşturma Özelliklerinin Araştırılması", Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 2011.
- [2]. Chinaglia, S., Tosin, M., Degli-Innocenti, F. "Biodegradation rate of biodegradable plastics at molecular level", *Polymer Degradation and Stability*, c. 147, ss. 237-244, 2018.
- [3]. Kyrikou J., Briassoulis D. "Biodegradation of Agricultural Plastic Films: A Critical Review". *J Polym Environ*. c. 15, ss. 125-150, 2007.
- [4]. Rudnik E., Briassoulis D., "Comparative Biodegradation in Soil Behaviour of two Biodegradable Polymers Based on Renewable Resources", *J Polym Environ*, c. 19, ss. 18-39, 2011.
- [5]. Chandra, R., "Biodegradable polymers", *Prog. Polym. Sci.*, c. 23, ss. 1273-1335, 1998.
- [6]. Dönmez, A.T., "Nanokompozit yapısındaki biyopolimerlerin sentezi ve uygulamaları", İstanbul Üniversitesi", Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Kimyasal Teknolojiler Bilim Dalı, İstanbul, 2017.
- [7]. Avella, M., Vlioger, J., Fischer, S., Vacca, P., "Biodegradable starch/clay nanocomposite for food packaging applications", *Food Chemistry*, c. 93, ss. 467-474, 2005.
- [8]. Dursun, S., Erkan, N., Yeşiltaş, M. "Doğal biyopolimer bazlı (biyobozunur) nanokompozit filmler ve su ürünlerindeki uygulamaları" *J. Fish. Sci.*, c. 4 (1), ss. 50-77, 2010.

- [9]. Cao-Hoang, L., Chaine, A., Gregorie, L., Wache, Y., “Potential of Nisin-İncorporated Sodium Caseinate Films to Control *Listeria* in Artificially Contaminated Cheese”, *Food Microbiology*, c. 27, ss. 940-944, 2010.
- [10]. Ricardo, A., Villacrés, E., Flores, S.K., Gerschenson, L.N. “Biopolymeric antimicrobial films: Study of the influence of hydroxypropyl methylcellulose, tapioca starch and glycerol contents on physical properties”, *Materials Science and Engineering: C*, c. 36, ss. 108-117, 2014.
- [11]. Ayana, B. “Antimikrobiyal Yenilebilir Filmlerin Üretimi ve Özelliklerinin Belirlenmesi”, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Mersin, 2007.
- [12]. Zivanovic, S., Chi, S., Draughon, A. F. “Antimicrobial activity of chitosan films enriched with essential oils”, *Journal of Food Science*, c. 70(1), ss. 45–50, 2005.
- [13]. Junk-Uk, H., Young-Min, K., Dong-Sun, L., “Multilayered antimicrobial Polyethylene Films Applied to the Packaging of Ground Beef”, *Packaging Technology and Science*, c. 15, ss. 55-62. 2001.
- [14]. Emiroğlu K. Z., Yemiş P. G., Çoşkun K. B., Candoğan, K. “Antimicrobial Activity of Soy Edible Films Incorporated with Tyhme and Oregano Essential Oils on Fresh Ground Beef Patties”, *Meat Science*, c. 86, ss. 283-288, 2010.
- [15]. Pastor, C., Sánchez-González, L., Cháfer, M., Chiralt, A., González-Martínez, C. “Quality and Safety of Table Grapes Coated with Hydroxypropylmethylcellulose Edible Coatings Containing Propolis Extract”, *Postharvest Biology and Technology*, c. 60, ss. 64–70, 2011.
- [16]. Erol E, “Doğal Antimikrobiyal Madde İçeren Biyobozunur Filmlerin Üretimi”, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Mersin, 2012.
- [17]. Cooksey, K. “Effectiveness of antimicrobial food packaging materials”, *Food Add. and Cont.*, c. 22(10), ss. 980–987, 2005.
- [18]. Ayana, B., Turhan, N., “Gıda ambalajlamasında Antimikrobiyal Madde İçeren Yenilebilir Filmler/Kaplamalar ve Uygulamaları”, *Gıda*, c. 2, ss. 151-158, 2010.
- [19]. Kalkan, S., Ünal, E., Erginkaya, Z., “Nisin ilave edilmiş metil selüloz filmlerin antimikrobiyal etkilerinin belirlenmesi”, *Journal of Food and Feed Science Technology*, c. 14, ss. 1-7, 2014.
- [20]. Kalkan, S., “Farklı antimikrobiyal maddeler içeren yenilebilir film kaplamaların macar salamında kullanım olanakları ve *Listeria innocuainaktivasyonu* üzerine etkileri”, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Adana, 2014.
- [21]. Hanafi I, Nor Fasihah Z., “The mechanical properties, water resistance and degradation behaviour of silica-filled sago starch/PVA plastic films” *Journal of Elastomers & Plastics*, c. 46(1), ss. 96–109, 2014.
- [22]. Ramaraj B, Poomalai P. “Development of potentially biodegradable polyamide-6 and polyvinyl alcohol blends: physico-mechanical properties, thermal properties, and soil test”, *J Appl Polym Sci*, c. 98, ss. 2339–2346, 2005.
- [23]. Ooi ZX., Chan, KL., Ewe, CY., “Mathialagan Muniyadi, Yi Peng Teoh, Hanafi Ismail, Evaluation of Water Affinity and Soil Burial Degradation of Thermoplastic Film Derived from Oil Palm Ash-filled Polyvinyl Alcohol”, *BioResources*, c. 21(2), s. 4111-4122, 2017.
- [24]. Coats, A.W., Redfern, J.P., “Kinetic Parameters From Thermogravimetric Data”, *Nature*, c. 201, ss. 68-69, 1964.

- [25]. Nunez L, Fraga F, Nunez MR, Villanueva M. "Thermogravimetric Study of the Decomposition Process of the System BADGE (n=0)/1,2 DCH", *Polymer*, c. 41(12), ss. 4635-4641, 2000.
- [26]. Orfao, J.J.M., Martins, F.G., "Kinetic Analysis of thermogravimetric data obtained under linear temperature programming-a method based on calculations of the temperature integral by interpolation", *Thermochimica Acta*, c. 390, ss. 195-211, 2002.
- [27]. Deans, S.G., Simpson, E., Noble, R.C., MacPherson, A., Penzes, L., "Natural antioxidants from *Thymus vulgaris* (thyme) volatile oil: the beneficial effects upon mammalian lipid metabolism". *Acta Horticulturae*, c. 332, ss. 177- 182, 1993.
- [28]. Dorman, H. J. D., Deans, S. G., "Antimicrobial agents from plants, antibacterial activity of plant volatile oils". *Journal of Applied Microbiology*, c. 88, ss. 308-316, 2000.
- [29]. Teixeira, B., Marques, A., Ramos, C., Neng, N.R., Nogueira, J.M.F., Saraiva, J.A., Nunes, M.L., "Chemical composition and antibacterial and antioxidant properties of commercial essential oils". *Industrial Crops and Products*. c. 43, ss. 587- 595, 2013.
- [30]. Fadli, M., Saad, A., Sayadi, S., Chevalier, J., Mezrioui, N. E., Pages, J. M., Hassan, L., "Antibacterial activity of *Thymus maroccanus* and *Thymus broussonetii* essential oils against nosocomial infection - bacteria and their synergistic potential with antibiotics". *Phytomedicine*, c. 19, ss. 464-471, 2012.
- [31]. Clarissa Dos Santos Pires, A., Soares, N.F.F., Andrade, N.J., Silva, L.H.M., Camilloto, G.P., Bernardes, P.C., "Development and Evaluation of Active Packaging for Sliced Mozzarella Preservation", *Packaging Technology and Science*, c. 21, ss. 375-383, 2008.
- [32]. Kalkan S., Erginkaya Z., "Nisin İlave Edilmiş Peyniraltı Suyu Protein İzolatı Filmlerin Karakterizasyonu ve *Listeria innocua*' ya Karşı Antimikrobiyal Etkilerinin Belirlenmesi", *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, c. 3(2), ss. 151-160. 2016.
- [33]. Van Der Zee M. Structure-Biodegradability Relationships of Polymeric Materials. 1, 1, 1997.
- [34]. Acemoglu M. "Chemistry of polymer biodegradation and implications on parenteral drug delivery", *Int J Pharm*. c. 277, ss. 133-139, 2004.
- [35]. Anderson J.M., Shive M.S. "Biodegradation and biocompatibility of PLA and PLGA microspheres". *Adv Drug Deliv Rev*. c. 28(1), ss. 5-24, 1997.
- [36]. Grima S., Bellon-Maurel V., Feuilleley P., Silvestre F. "Aerobic Biodegradation of Polymers in Solid-State Conditions: A Review of Environmental and Physicochemical Parameter Settings in Laboratory Simulation". *J Polymer Environ*. c. 8, ss. 183-195, 2002.
- [37]. Modelli A., Calcagno B., Scandola M., "Kinetics of aerobic polymer degradation in soil by means of the ASTM D 5988-96 standard method", *J. Environ. Polym. Degrad*. c. 7, ss. 109-116, 1999.
- [38]. Wu X. S., Wang N., "Synthesis, characterization, biodegradation, and drug delivery application of biodegradable lactic/ glycolic acid polymers. Part II: Biodegradation", *J.Biomater.Sci.PolymerEdn* ,c. 12, ss. 21-34, 2001

Using Lagrangian Relaxation Method for Asset Management Problems

Suna Çınar¹*, Mehmet Bayram Yıldırım¹

Wichita State University Department of Industrial, System and Manufacturing Engineering,
Wichita, USA

(Alınış / Received: 20.04.2020*, Kabul / Accepted: 25.08.2021, Online Yayınlanma / Published Online:31.08.2021)

Keywords
Wind turbine,
Mixed-integer linear
programming,
Lagrangian relaxation

Abstract: This paper addresses an asset management problem in the context of the wind energy industry. Asset management decisions (including operation and maintenance, retrofitting and purchasing) for assets reached their end-of-life are explicitly examined in a linear programming model over a planning horizon. Unfortunately, almost all important generic classes of integer programming problems are NP-hard and many of these problems are large-size. Therefore, in order to solve practical integer programming problems we may need to use problem specific algorithms which can exploit some special structures of the problem at hand. We propose a solution approach based on a Lagrangian relaxation and the subgradient method for a large size parallel asset management problem, which originally solved by using mixed integer linear programming (MILP). The decomposition approach considers the relaxation of different sets of constraints, including the budget and energy constraints. The computational results show that the incorporation of Lagrangian relaxation significantly improves the duality gap and solution time of a case study from wind turbine (WT) sector.

Using Lagrangian Relaxation Method for Asset Management Problems

Anahtar Kelimeler
Rüzgâr türbünü,
Karışık tam sayılı doğrusal
programlama,
Lagrangian gevşemesi

Öz: Bu makale, rüzgâr enerji sektöründe kullanım ömrünü doldurmuş rüzgâr türbinlerinin varlık yönetimini ele almaktadır. Kullanım ömrü dolmuş varlıklar için mevcut olan varlık yönetimi kararları (işletme ve bakım, güçlendirme ve satın alma dahil) bir planlama ufku üzerinden doğrusal bir programlama modelinde açıkça incelenir. Ne yazık ki, tamsayı programlama problemlerinin neredeyse hepsi NP-Zor (NP-Hard)'dur ve bu problemlerin çoğu büyük boyuttadır. Bu nedenle, pratik tamsayı programlama problemlerini çözmek için, problemin bazı özel yapılarından faydalanabilecek probleme özgü algoritmalar kullanmak gerekebilir. Bu çalışmada, başlangıçta karma tamsayı doğrusal programlama (MILP) kullanılarak çözülen büyük boyutlu bir paralel varlık yönetimi problemi için Lagrange gevşetmesi ve alt gradyan yöntemine dayanan bir çözüm yaklaşımı önerilmiştir. Bütçe ve enerji kısıtları gevşetilerek çözüm elde edilmeye çalışılmıştır. Vaka çalışması olarak Rüzgâr türbinlerinin kullanıldığı model sonuçları incelendiğinde, bu yöntem sayesinde, dual aralığı ve çözüm süresinin önemli ölçüde azaldığı gözlenmiştir.

*Corresponding Author, email: cinarsuna@yahoo.com

1. Introduction

As assets are utilized overtime, operating and maintenance costs increases. Therefore, an asset manager has to deal with the tradeoff between the lower operating and maintenance (O&M) costs of newer fleets and their higher initial capital costs as well as the tradeoff between conventional and new efficient technologies. Due to the nature

of the problem, asset management by itself (i.e. keeping an asset with preventive maintenance or replacing with a new one) is quite similar to a parallel replacement problem. The traditional approach to solving asset management problems is using economic service life approach, dynamic programming or mixed integer linear programming (MILP). In the literature, there are limited number of studies completed in the field of asset management problems. Therefore, in this section, most of the current studies are up to year 2018. These studies are summarized below.

Jones et al. (1991) analyzed the parallel machine replacement problem using dynamic programming and assuming that a fixed charge was incurred in each period of replacement, thus proving that cluster of the same-age assets would either be kept or replaced (no-splitting rules) as a group in any period if demand was constant [1]. Hartman (2000) examined the impact of fluctuating demand and budgeting consideration of the parallel replacement problem under economies of scale, where the purchase of an asset is subject to a fixed charge, regardless of the order size, and a capital budgeting constraint in each period. He recognizes that problem can get difficult when the number of assets is large because of the large state-space [2]. Karabakal et al. (1994) addressed a different parallel replacement problem with capital budgeting constraints solved by a branch-and-bound algorithm [3]. Karabakal et al. (2000) provide a heuristic multiplier adjustment method for solving large, realistically sized problems [4]. Hartman and Dearden (1999) presented integer programming solutions that allow decision makers to determine minimum cost-replacement strategies with variable utilization schedules and categorize assets based on age and cumulative utilization [5]. Hartman and Clarke (2002) integrated a production planning problem with a parallel replacement problem, and illustrated how their integer programming model accurately predicts costs production decisions and may alter replacement decisions [6]. Hartman (2004) examined asset replacement decisions, based on age and cumulative utilization, under variable periodic utilization [7]. Lakswong et al. (2014) presented a new approach for the parallel fleet replacement problem. In this study, the aim was to determine an optimal replacement schedule for a fleet of vehicles that results in minimal total cost of owning and operating the fleet [8]. Seif and Rabbani (2014) assessed life cycle costing (LCC) of equipment based on the failure rates of machine components. The LCC was assessed, mathematically modeled, and incorporated to the parallel machine replacement problem with capacity expansion consideration [9]. Chen (1998) study solution algorithms for the parallel replacement problem under economy of scale [10]. Abhishek (2000), examined three or more assets and higher number of discrete utilization levels per asset under stochastic demand by different algorithm including exhaustive search dynamic programming, demand approximation, relaxed integrated approximation and decision approximation. Based on the results, it was concluded that decision approximation algorithm provided the best result [11]. Ching-Jung and Kuo-Rui (2016), proposed to use Lagrangian relaxation heuristic that can be an effective solution method for the capacitated p hub median location problem with multiple capacity levels [12]. Hartman (2000) studied the parallel asset replacement problem under economies of scale and non-decreasing demand with branch-and-cut. He showed that parallel replacement problems (PRP) are NP-hard [13].

Mainly two options, either keeping asset with preventive maintenance or purchase a new asset has been considered for PRP. Yet, there can be another alternative, which is retrofitting, for asset management in the field of wind energy. There exists little literature regarding the PRP with retrofitting as an improvement options in an optimization model. Therefore, there is a need for such an asset management model that provides the strategic operation and management plan to decision makers under budget and energy constraints. To close this gap, Cinar et al. (14) proposed a MILP to determine the optimal replacement scheduling incorporating retrofitting options into the model under a limited budget [12]. As this proposed parallel replacement problem with retrofitting (PRP-R) considered as NP-hard, to reduce the solution time for a large problems, we propose an approximate solution approach based on Lagrangian relaxation and the subgradient method as an alternative to obtain approximate solutions. Coupled with a Lagrangian relaxation, this should provide us with feasible solutions and estimates of the potential error. Our main objective have been to analyze the potential of this approach for a difficult asset management problem and, hence, we have applied the wind farm. To the best of our knowledge, this is the first study that Lagrangian relaxation algorithm developed for PRP-R. Therefore, the proposed model can be considered as the main research contribution. Our computational results show that the incorporation of Lagrangian relaxation significantly improves the integrality gap and reduces the solution time of a case study problem of the WT's asset management.

Brief summary of the Lagrangian relaxation method is given in Section 2. A description of the problem is outlined in Section 3 and the mathematical model, which takes form of a MILP, is then presented in Section 3.1. Section 3.2 briefly describe the sub-gradient algorithm used for the model. Section 4 presents a case study that validates the model. Finally, Section 5 presents conclusions and suggestions for future research.

2. Lagrangian Relaxation for Proposed Model

The power of commercial MILP solvers has improved greatly over the last ten to fifteen years. This is due partly to much faster Linear Programming (LP) solvers, which allow a much quicker processing of the nodes in the Branch-and-Bound tree. In addition, increased use of logical processing and heuristic tools for tightening models and for

finding solutions help the process. Despite the fact that some of the combinatorial optimization problems are still very difficult to solve using Branch-and-Bound alone. This seems to be the case for problems containing different components that are only loosely connected together by constraints.

In our original problem, when we increase the size of the problem, we observe that computational time to solve the problem increased exponentially. Therefore, in order to solve the problem faster, we develop and implement Lagrangian relaxation algorithm to pick a set of complicating constraints, which, if relaxed, is much easier to solve than the original problem.

Lagrangian relaxation was developed in the early 1970's with the pioneering work of Held and Karp on the travelling salesman problem. [15]. Lagrangian relaxation is a relaxation and decomposition method to solve mathematical programming problems. The main idea of Lagrangian relaxation is to separate the constraints as easy constraints and the hard constraints, and eliminate the hard constraints from the constraint set of the mathematical programming model [16]. Lagrangian relaxation is a technique commonly used to relax these complicating constraints in order to have an easier problem to optimize [17]. The method of Lagrangian relaxation lifts these complicating constraints and makes use of the special structure to solve the relaxed problem. This produces a lower bound for a minimization problem. There are two general techniques available: sub-gradient optimization and multiplier adjustment methods. With Lagrangian relaxation, a good approximate solution or the best (tight) bound can be obtained by subgradient optimization methods where a subgradient vector is obtained by minimizing the relaxed primal problem and the dual variables are updated iteratively along the direction of this subgradient vector [18]. Lagrangian relaxation with subgradient optimization method is provided in literature by several authors [17].

Considering PRP-R being NP-hard, in this study, we use the Lagrangian relaxation with subgradient optimization method for our problem. We provide insight into solving large-scale problems with the use of Lagrangian relaxation method for the problem developed in previous research [14]. Considering the motivations above, the objective of this work is to extend the PRP-R model that we develop to aid the replacement and retrofitting decision-making in wind farms. The work focuses on the economic and financial aspects of the replacement problem, trying to identify the optimal replacement, retrofitting or recycling timing and the consequences of alternative decisions.

3. Solving Original Parallel Replacement Problem-Retrofitting (PRP-R) Mathematical Model by Lagrangian Relaxation

The model used in this study is originally proposed by Cinar et al. (2018) [14]. In this model, a MILP is developed to determine the optimal replacement policy for the WT industry. The proposed MILP model consists of formulating the total cost, including the cost for operating, retrofitting and replacing WTs. As PRP-R model defined as NP-Hard, we propose to solve the original model by using Lagrangian relaxation to reduce the solution time.

3.1. Model Details

In the original MILP model, we select the constraint (3) and (4) as complicating constraints and modify the objective function by adding two difficult constraints to the objective function and solving the problem with subgradient optimization. Constraint 3 and 4 are dualized into original objective function. We represent the notation and model formulation with a network illustration, shown in Figure 1 [14].

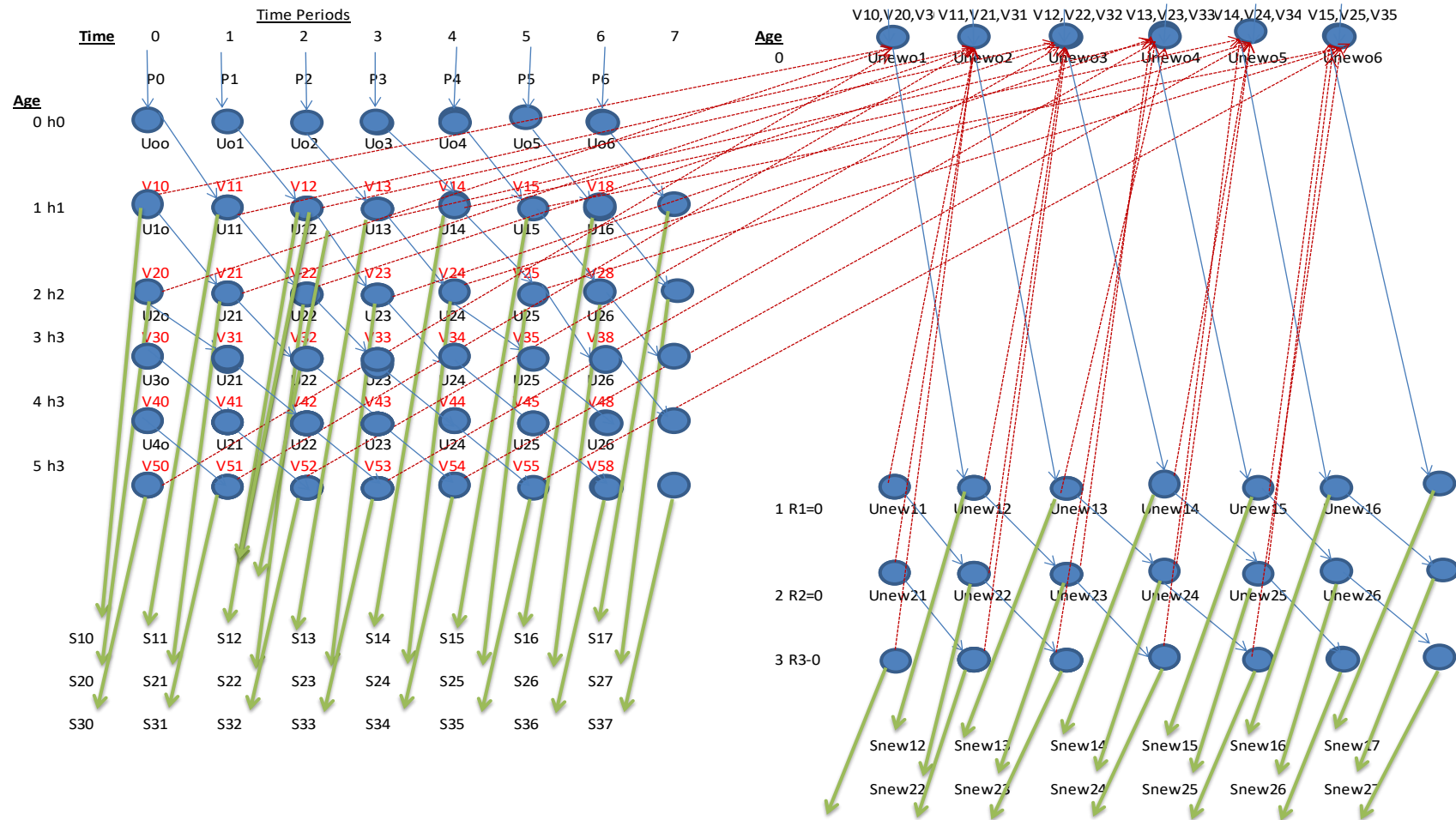


Figure 1. Representation of RRR as a network with flow representing purchase (P), retrofitting (V, VN), utilization (U), salvage (S), retrofitted WT salvaged (SNEW), retrofitted WT utilized (UNEW) variables, and initial WT (h, R), initial retrofitted WT (R) with N=3 and T=7. [124]

The model for the proposed problem has the following sets, indexes, parameters, cost, and decision variables.

i : asset age, $i \in I = \{1, \dots, |I|\}$
 t : time period, $t \in T = \{1, \dots, |T|\}$

Parameters:

B_t : budget at time period t (\$)
 D_t : energy demand at time period t (kW)
 F_t : fixed cost of retrofit at the end of year t (\$)
 EO_{it} : energy production of an old asset at age i at time period t (kW)
 EN_t : energy production of a new asset at time period t (kW)
 ER_t : energy production of a retrofitted asset at time period t (kW) ($EN_t \geq ER_t$)
 E_t : unit cost of electricity at time period t (\$/Kw)
 h_i : number of existing assets at age i (initial cluster size)
 r_i : number of retrofitted assets at age i at time period zero

Costs:

OP_i : operation and maintenance costs for i year old asset receiving preventive maintenance (\$)
 OR_i : operation and maintenance costs for i year old asset receiving retrofit (\$)
 SA_{it} : salvage revenue (negative cost) from selling i year old assets at time period t (\$)
 SR_{it} : salvage revenue (negative cost) from selling i year old retrofitted asset at time period t (\$)
 θ_t : cost of purchasing a new asset at the end of year t (\$)
 dr : inflation rate

Decision Variables:

U_{it} : number of i -year-old assets that received preventive maintenance at end of year t
 UN_{it} : number of i -year-old assets that received retrofitting and utilized at end of year t
 V_{it} : number of i -year-old assets that received retrofit at end of year t
 VN_{it} : number of i -year-old retrofitted assets that received another retrofit at end of year t
 P_t : number of assets purchased at end of year t (new asset)
 S_{it} : number i -year-old assets salvaged at end of year t
 SN_{it} : number i -year-old retrofitted asset salvaged at end of year t for retrofitting

The objective function, shown as equation (1), includes the operation and maintenance cost, purchase cost of a new asset, and fixed cost of retrofitting the main components (i.e., structure, motors, gearbox, blades, generator, etc.) of an existing asset and minimizes the sum of purchasing, maintaining, operating, and salvaging over the period of analysis, i.e., from time zero (present) to the end of year t . Constraints (2) and (3) provide that there is enough energy production to satisfy periodic demands at time zero and after time zero, respectively. Constraint (4) shows that purchase costs, operation and maintenance costs, and fixed costs cannot exceed the yearly budget. Constraints (5) to (10) are referred to as flow conservation constraints. The age of any asset in use will increase by one year after each time period (5). Constraint (6) ensures that the conservation of assets, i.e., the initial asset (not 0-age ones) must be used, sold, or retrofitted. At the end of the last time period, there will be no asset in use for any age or type of asset, i.e., all assets will be sold. Constraint (7) is the initial boundary condition for an asset at age 0 at time period t is equal to a newly purchased plus retrofitted asset at period $t - 1$ (previous period). Constraints (8) and (9) are flow balance constraints for the last period of an existing asset, which should be either retrofitted or salvaged from the previous period. Constraint (10) is a flow balance constraint for the number of assets utilized during year zero, which must be equal to the sum of existing assets plus purchased assets. The decision variables associated with purchasing, utilization, retrofitting, and salvaging decisions must be integer positive numbers, as shown in expression (11). To be able to determine if retrofitting is profitable as a WT asset management strategy, we modified the objective function based on total profit, which includes total electricity production price minus total operating, purchasing, and retrofitting costs.

$$\begin{aligned}
\text{Minimize } z = & \sum_{t \in T \setminus \{T\}} \sum_{i \in I \setminus \{I\}} OP_{it} * U_{it} * (1 + dr)^{-t} \\
& + \sum_{t \in T \setminus \{T\}} \sum_{i \in I \setminus \{I\}} OR_{it} * UN_{it} * (1 + dr)^{-t} \\
& + \sum_{t \in T \setminus \{T\}} \theta_t * P_t * (1 + dr)^{-t} \\
& + \sum_{t \in T \setminus \{T\}} \sum_{i \in I} F_{it} * V_{it} * (1 + dr)^{-t} + \sum_{t \in T \setminus \{T\}} \sum_{i \in I} F_{it} * VN_{it} * (1 + dr)^{-t} \\
& - \sum_{t \in T} \sum_{i \in I \setminus \{0\}} SA_{ti} * S_{it} * (1 + dr)^{-t} - \sum_{t \in T} \sum_{i \in I \setminus \{0\}} SR_{ti} * SN_{it} * (1 + dr)^{-t}
\end{aligned} \tag{1}$$

Subject to:

$$\sum_{i \in I \setminus \{I\}} U_{i(t_0)} * EO_i + P_{(t_0)} * EN_{(i_0)} \geq D_{(t_0)} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
P_{t+1} * EN_{(i)} + \sum_{i \in I} V_{(i+1)t} * ER_{(i)} + \sum_{i \in I} VN_{(i+1)t} * ER_{(i)} \sum_{i \in I} U_{i(t+1)} * EO_i + \sum_{i \in I} UN_{i(t+1)} \\
* EN_i \geq D_{(t+1)} \quad t \in T \setminus \{T\}
\end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
\sum_{i \in I \setminus \{I\}} U_{it} * OP_{it} + \sum_{i \in I \setminus \{I\}} UN_{it} * OR_{it} + \sum_{i \in I \setminus \{0\}} V_{it} * F_{it} + \sum_{i \in I \setminus \{0\}} VN_{it} * F_{it} + \sum_{t \in T \setminus \{T\}} P_t \\
* \theta_t - \sum_{i \in I \setminus \{0\}} S_{it} * SA_{ti} - \sum_{i \in I \setminus \{0\}} SN_{it} * SR_{ti} \leq B_t \quad t \in T \setminus \{T\}
\end{aligned} \tag{4}$$

$$U_{(i-1)(t-1)} = U_{it} + V_{it} + S_{it} \quad i \in I \setminus \{0\}, \quad t \in T \setminus \{0\} \tag{5a}$$

$$UN_{(i-1)(t-1)} = UN_{it} + VN_{it} + SN_{it} \quad i \in I \setminus \{0\}, \quad t \in T \setminus \{0\} \tag{5b}$$

$$h_i = U_{i0} + V_{i0} + S_{i0} \quad i \in I \setminus \{0\} \tag{6a}$$

$$r_{i0} = 0 \quad i \in I \setminus \{0\} \tag{6b}$$

$$U_{(0)(t+1)} = P_{t+1} + \sum_{i \in I} V_{it} \quad i \in I \setminus \{0\}, \quad t \in T \setminus \{T\} \tag{7a}$$

$$UN_{(0)(t+1)} = \sum_{i \in I} V_{it} + \sum_{i \in I} VN_{it} \quad i = \{I\}, \quad t \in T \setminus \{T\} \tag{7b}$$

$$U_{(I-1)t} = S_{I(t+1)} + V_{I(t+1)} \quad i = \{I\}, \quad t \in T \setminus \{T\} \tag{8a}$$

$$UN_{(I-1)t} = SN_{I(t+1)} \quad i = \{I\}, \quad t \in T \setminus \{T\} \tag{8b}$$

$$U_{i(|T|-1)} = S_{(i+1)|T|} \quad i \in I \setminus \{I\} \tag{9a}$$

$$UN_{i(|T|-1)} = SN_{(i+1)|T|} \quad i \in I \setminus \{I\}, \quad t = \{T\} \tag{9b}$$

$$U_{00} = P_0 + h_0 \tag{10}$$

$$U_{it}, S_{it}, SN_{it}, V_{it}, VN_{it}, UN_{it}, P_t \in Z^+ \quad i \in I, t \in T \tag{11}$$

3.2. Model Details

In the PRP-R, when the size of the problem is increased, it can be seen that the computational time to solve it increases exponentially. In order to solve the problem faster, a Lagrangian relaxation algorithm is proposed. This algorithm penalizes a set of complicating constraints to the objective function, which results in a problem easier to solve than the original problem, and a subgradient optimization method is used to update the penalty.

In other words, the Lagrangian relaxation method lifts these complicating constraints and makes use of the special structure to solve the relaxed problem. This produces a lower bound for a minimization problem. There are two general techniques to implement a Lagrangian relaxation algorithm: subgradient optimization and multiplier adjustment methods [19]. Several authors, including Fisher (2004) and Lemaréchal (2001) use Lagrangian relaxation with the subgradient optimization method [15, 20]. A multiplier adjustment method is an iterative method that generates a series of monotonically increasing lower bounds. In general, a multiplier adjustment method requires less iteration than the subgradient method per iteration. On the other hand, it cannot guarantee lower bounds that are as good as those produced by the subgradient method [21]. As, subgradient method has always appeared to give good lower bounds which is often close to the optimal integer solution, this method is usually preferred.

In the problem here, constraints (3) and (4) (production and budget constraints, which are inequalities) are selected as complicating constraints and the objective function is modified by penalizing these constraints to the objective function and solving the problem using the subgradient optimization technique. The resulting objective function is as follows:

$$\begin{aligned}
& \text{Minimize } \sum_{t \in T \setminus \{T\}} \sum_{i \in I \setminus \{I\}} OMPN_{it} * U_{it} * (1 + dr)^{-t} + \sum_{t \in T \setminus \{T\}} \sum_{i \in I \setminus \{I\}} OMLR_{it} * UN_{it} * (1 + \\
& dr)^{-t} + \sum_{t \in T \setminus \{T\}} PUR_t * P_t * (1 + dr)^{-t} + \sum_{t \in T \setminus \{T\}} \sum_{i \in I} FRET_{it} * V_{it} * (1 + dr)^{-t} + \\
& \sum_{t \in T \setminus \{T\}} \sum_{i \in I} FRET_{it} * VN_{it} * (1 + dr)^{-t} - \sum_{t \in T} \sum_{i \in I \setminus \{0\}} SAL_{ti} * S_{it} * (1 + dr)^{-t} - \sum_{t \in T} \sum_{i \in I \setminus \{0\}} SAL_{ti} * \\
& SN_{it} * (1 + dr)^{-t} + \sum_{t \in T \setminus \{T\}} \sum_{i \in I \setminus \{I\}} \Phi_{it} * (EndDem - P_{t+1} * ENNEW_{(i0)} + \sum_{i \in I} V_{(i+1)t} * ENRET_{(i0)} + \\
& \sum_{i \in I} VN_{(i+1)t} * ENRET_{(i0)} \sum_{i \in I} U_{i(t+1)} * ENOLD_i + \sum_{i \in I} UN_{i(t+1)} * ENNEW_i) + \\
& \sum_{t \in T \setminus \{T\}} \sum_{i \in I \setminus \{I\}} \delta_{it} * (\sum_{i \in I \setminus \{I\}} U_{it} * OMPN_{it} + \sum_{i \in I \setminus \{I\}} UN_{it} * OMLR_{it} + \sum_{i \in I \setminus \{0\}} V_{it} * FRET_{it} + \\
& \sum_{i \in I \setminus \{0\}} VN_{it} * FRET_{it} + \sum_{t \in T \setminus \{T\}} P_t * PUR_t - \sum_{i \in I} S_{it} * SAL - \sum_{i \in I} SN_{it} * SAL_{ti} - Budget)
\end{aligned}
\tag{12}$$

Subject to constraints (2), (5a), (5b), (6a), (6b), (7a), (7b), (8a), (8b), (9a), (9b), (10), and (11).

The subgradient algorithm used for this problem is shown below. Two Lagrangian relaxation multipliers based on MILP formulation are used for the original problem. First, the budget and energy constraints are relaxed; then a relaxation with the integrality property is obtained. This is useful for solving the MILP relaxation of the original problem approximately. Relaxation is obtained by dualizing the set of constraints (4) and (5) with Φ_{it} and $\delta_{it} \geq 0$, where Φ_{it} and δ_{it} are multipliers associated with budget and energy constraints, respectively, of period t .

$$\Phi_{it} \text{ and } \delta_{it} \geq 0 \quad i \in I \text{ and } t \in T
\tag{13}$$

The pseudo code for the proposed Lagrangian algorithm is presented in Table 1.

Table 1. Pseudo Code for Proposed Subgradient Optimization Algorithm for PRP-R

Algorithm Steps	Explanation for each step
Input: LLBP();	//Lagrangian lower bound
Input: Lup;	//Upper bound value for original problem
{Initialization}	
$\theta := \theta_{init}$;	//Subgradient agility, suggested $\theta_{init}=2$ [22]
An initial value $\phi^0 \geq 0, \delta^0 \geq 0$	//Lagrangian multiplier
$Lmax = -\infty$;	//Best lower bound so far
for $\mu=0,1,\dots$ {Sub-gradient iterations}	
$\gamma^t := g(x^t)$ $\sigma^t := g(y^t)$	//Gradient of $L(\phi^t)$ and //Gradient of $L(\delta^t)$
$\partial_t := \theta_t(L^* - L(\phi^t))/\ \gamma^t\ ^2$ and $\psi_t := \theta_t(L^* - L(\delta^t))/\ \sigma^t\ ^2$	//Compute step size
$\phi^{t+1} := \max\{0, \phi^t + \partial_t \gamma^t\}$ and $\delta^{t+1} := \max\{0, \delta^t + \psi_t \sigma^t\}$	//Update step size
If $\ \phi^{t+1} - \phi^t\ < \varepsilon$ and If $\ \delta^{t+1} - \delta^t\ < \varepsilon$ then	// Suggested $\varepsilon = 0.01^{(1)}$
Stop End if If no progress in more than K iterations, then $\theta_{t+1} := \theta_t/2$	//Reduce agility
else $\theta_{t+1} := \theta_t$ End if $\mu := \mu + 1$ end for	

4. Results and Discussion

For each instance we first solved the original formulation using Branch and Bound algorithm. We then solved the Lagrangian relaxation algorithm. To further illustrate the applicability of the model and solution method, we apply our methodology on available data for the GE 1.5 MW WT, which is widely used throughout the US in wind farms. Even though, there are many types and style of WTs can exist at each wind farm; we consider only one type and one style of WTs. For implementation, we consider 50 replacement periods (years), and three scenarios with small, medium, and large size of initial inventory of assets. Summing all the cost data provided above, cost data for the experimental design is presented in Table 2.

Table 2. 1.5 MW WT data for model illustration

Parameter	Symbol	Data	Reference
Unit purchase cost	$P_{1,t}$	\$1,400-\$2000 per kw increasing by 2% each time period t	[23]
Unit O&M cost	$OMP_{1,t}$, $OMLR_{1,t}$	\$ 9 -\$20 per MWh increasing by 10% each time period	[23]
Unit salvage value	$S_{1,t}$, $SN_{1,t}$	80% of $P_{1,t}$ and decreasing by 20% each time period t	Estimated value
Demand	$EnDem$	15,500,000-45,000,000 kWh per year	Estimated value
Energy production	EN	4,500,000 kWh per year for 1.5 MW WT	[24]
Budget	$Budget$	\$250,000-\$1,500,000	Estimated value
Cost of electricity	$ECost$	0.02-0.05\$/kW	[24]
New wind turbine cost (GE 1.5 XLE 1.5 MW)	$P_{1,t}$	\$1,400,000	[25], [26]
Gearbox 10-15% of total cost of WT	$V_{1,t}$, $VN_{1,t}$	\$140,000-\$210,000	[25], [26]
Generator % 5-10 of total cost of WT (including installation cost)		\$70,000-\$140,000;	
Blades % 10-25 of total cost of WT (including installation cost)		\$140,000-\$210,000;	
Tower cost %10-35 of total cost of WT (including installation cost)		\$140,000-\$350,000	

We solve original problem using CPLEX and alternative method for three scenarios, present results, and illustrate the solution effectiveness in Table 3. The computational experiments with Computational experiments with Lagrangian relaxation suggest that subgradient optimization is quite effective in solving large-scale problems. When the problem planning period is 100 time units, the subgradient algorithm solves the problem in approximately less than 1.5% of the CPU time that the PRP-R model requires to find the optimal solution using CPLEX. Each run results in a number of iterations, which are provided in Table 4. Lagrangian relaxation suggest that sub-gradient optimization is quite effective in solving the large scale problems.

Table 3. Run Times with Lagrangian Relaxation

Time Period	Main Problem CPU (sec)	LR CPU (sec)	Number of Iterations
25	10	0.08	3
50	70	2	7
100	4,568	60	15
100—Case a (20% operation and maintenance cost increase)	4,452	56	12
100—Case b (20% retrofitting cost increase)	4,376	49	10
100—Case c (20% increasing energy demand)	4,735	83	14

Based on the results obtained it was concluded that the Branch and Bound algorithm was not able to solve the basic formulation in a reasonable time, except in the small instance. However, a significant improvement is obtained by strengthening the formulation of the model. This benefits both the straightforward use of Branch and Bound, and the Lagrangian relaxation. Notice that the Branch and Bound leads higher CPU times compared to the Linear Relaxation approach.

This paper present Lagrangian relaxation with subgradient method for the previously designed MILP programming for an asset replacement problem. A significant number of previous studies have focused on both theoretical development and mathematical modeling of asset management problems. To the best of our knowledge this is the first study considers Lagrangian relaxation approach to solve the NP-Hard PRP-R. As a result this is a significant contribution to the field of study.

5 Conclusion

In this study, we have analyzed WT's asset management problem modelled through a combinatorial optimization formulation that can be viewed as the composition of a location problem and a fixed charge problem. Due to the difficulty of solving a given the combinatorial complexity of the subproblems, we used Lagrangian relaxation approach to solve the problem. We tested a WT asset management problem with both small and large instances.

In summary, we note that strengthening of the formulation does significantly improve the solutions process, and Lagrangian relaxation seems to be a promising approach for larger, more difficult to solve problems. Strengthening the formulation led to optimal solutions for the large and medium sized problems in reasonable CPU time. Detail testing is needed to achieve better conclusions on the applicability of Lagrangian relaxation, but this preliminary study results suggests that the approach is promising, specially if it is combined with strengthening procedures.

Further research is suggested in the analysis of other Lagrangian heuristics, such as simple versions of Ant Colony Optimization and GRASP, among other well-known heuristics and metaheuristics to compare the model solution time. In addition, to be able to test the proposed algorithm, different application (such as different type of end of life product including vehicles and electronic goods) can be studied.

References

- [1] Jones, P. C., Zydiak, J. L., & Hopp, W. J. 1991. Parallel machine replacement, *Naval Research Logistics (NRL)*, 38(3), 351-365.
- [2] Hartman, J. C. 2000. The parallel replacement problem with demand and capital budgeting constraints' *Naval Research Logistics (NRL)*, 47(1) 40-56.
- [3] Karabakal, N., Lohmann, J. R., & Bean, J.C. 1994. Parallel replacement under capital rationing constraints, *Management Science*, 40 (3), 305-319.
- [4] Karabakal, N., Bean, J. C., & Lohmann, J. R. 2000. Solving large replacement problems with budget constraints, *The Engineering Economist*, 45(4), 290-308.
- [5] Hartman, J.C., & Dearden, J.A. 1999. Equipment replacement under environmental regulation. *Proceedings of the 8th Industrial Engineering Research Conference* 7.
- [6] Hartman, J. C., & Clarke, M. O. 2002. Integrated production planning and parallel replacement analysis, In *IIE Annual Conference. Proceedings* (p. 1). Institute of Industrial Engineers-Publisher.
- [7] Hartman, J. C. 2004. Multiple asset replacement analysis under variable utilization and stochastic demand', *European Journal of Operational Research*, 159, 145-165.
- [8] Laksuwong, E., Pannakkong, W., Parthanadee, P., Buddhakulsomsiri, J. 2014. A Study of a Single-Period Model for the Parallel Fleet Replacement Problem, *Applied Mechanics and Materials*, 619, 364-370.
- [9] Seif, J., Rabbani M. 2014. Component based life cycle costing in replacement decisions, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 20(4), 436-452
- [10] Chen, Z. 1998. Solution algorithms for the parallel replacement problem under economy of scale, *Naval Research Logistics*, 45(3), 279-295, doi: 10.1002/(SICI)1520-6750(199804)45:3
- [11] Abhishek, I. 2000. Multiple assets parallel replacement analysis under stochastic demand, *Lehigh University, Thesis*
- [12] Ching-Jung, T & Kuo-Rui, L. 2016. A Lagrangian Relaxation for Capacitated Single Allocation P-hub Median Problem With Multiple Capacity Levels. *14th IMHRC Proceedings (Karlsruhe, Germany - 2016)*. 31.
- [13] Hartman, J. C. 2000. The parallel replacement problem with demand and capital budgeting constraints' *Naval Research Logistics (NRL)*, 47(1) 40-56.
- [14] Cinar, S. Rubaiee, S., and Yildirim, M. 2018. Asset Management Strategies for Wind Turbines: Keeping or Retrofitting Existing Wind Turbines?, *International Journal Of Operational Research*, doi: 10.1504/IJOR.2018.10015452
- [15] BenchamolJean-Charles., P, Charles., R, RousseauLouis-Martin, R., Willem-Jan van Hoeve,W., 2010. Improving the Held and Karp Approach with Constraint Programming, *Conference: Integration of AI and OR Techniques in Constraint Programming for Combinatorial Optimization*

- Problems, 7th International Conference, CPAIOR 2010, Bologna, Italy, June 14-18, 2010., DOI: 10.1007/978-3-642-13520-0_6,
- [16] Balaman, Ş. Y. 2019 Modeling and Optimization Approaches in Design and Management of Biomass-Based Production Chains, Decision-Making for Biomass-Based Production Chains, 2019, DOI: 10.1016/B978-0-12-814278-3.00007-8
- [17] Fisher, M., L. 2004. Comments on the Lagrangian Relaxation Method for Solving Integer Programming Problems. *Management Science*, 50(12), 1872-1874.
- [18] Visweswaran V. 2008. Decomposition Techniques for MILP: Lagrangian Relaxation. In: Floudas C., Pardalos P. (eds) *Encyclopedia of Optimization*. Springer, Boston, MA
- [19] Guta, B. 2003. Subgradient Optimization Methods in Integer Programming with an Application to a Radiation Therapy Problem, Dissertation, Universität at Kaiserslautern
- [20] Lemaréchal, C. 2001. Lagrangian Relaxation. In *Computational Combinatorial Optimization, Optimal or Provably Near-Optimal Solutions [based on a Spring School]*, pp. 112–156, London, UK. Springer-Verlag.
- [21] van de Velde, S.L. 1995. Dual decomposition of a single-machine scheduling problem”, *Mathematical Programming*, 69 (1-3), 413-428.
- [22] Putz, P. 2007. Subgradient Optimization Based Lagrangian Relaxation and Relax-and-Cut Approaches for the Bounded-Diameter Minimum Spanning Tree Problem, Vienna University of Technology, Dissertation Thesis
- [23] Lantz, E., Wiser, R., & Hand, M. 2012. The past and future cost of wind energy, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO. Report No. NREL/TP-6A20-53510.
- [24] Wind Measurement International. 2015. Operation and Maintenance Costs for WTs. <http://www.windmeasurementinternational.com/wind-turbines/om-turbines.php> (Accessed 17 September 2015).
- [25] Oliveira, W. S. & Fernandes, A. J. 2012. Cost analysis of the material composition of the wind turbine blades for Wobben Windpower/ENERCON GmbH model E-82. <https://pdfs.semanticscholar.org/5bf8/323188b9d2ceba26fddc81b4d64f094cfea3.pdf> (Accessed 11 May 2016)
- [26] Repowering Solutions. 2015. http://www.repoweringsolutions.com/english/sales_brochure/Brochure_refurbished_wind_turbines.pdf (Accessed 17 September 2015)

CuO Nanopartikül Katkı Maddesi ile PSf Ultrafiltrasyon Membrana Ait Geçiririmsizlik ve Ayırma Özelliklerinin Geliştirilmesi

Bahar Özbey-Ünal^{*1,2}, Çiğdem Balçık-Canbolat¹

^{*1} Gebze Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü KOCAELİ.

² Gebze Teknik Üniversitesi Yer ve Deniz Bilimleri Enstitüsü KOCAELİ.

(Alınış / Received: 21.10.2020, Kabul / Accepted: 19.08.2021, Online Yayınlanma / Published Online: 31.08.2021)

Anahtar Kelimeler

Ultrafiltrasyon,
Nanopartikül,
Membran prosesler,
Akı,
Rejeksiyon

Öz: Bu çalışmanın amacı, faz inversiyon yöntemi kullanılarak bakır oksit (CuO) nanopartikülü katkı mikropözeneekli polisülfon (PSf) ultrafiltrasyon membran üretiminin gerçekleştirilmesi ve üretilen CuO nanopartiküllerinin hidrofilik yapısından faydalanarak PSf membranların özelliklerinin geliştirilmesidir. CuO nanopartikülleri tek adımlı bazik yöntem kullanılarak üretilmiştir. Sentezlenen CuO nanopartikülleri, X-Işınları Difraksiyonu (XRD) ve Fourier Dönüşümlü Kızıl Ötesi Spektrometresi (FT-IR) cihazı ile üretilen membranlar ise Taramalı Elektro Mikroskopu (SEM) ile karakterize edilmiştir. XRD ve FT-IR analizi sonucunda elde edilen şablon ve adsorpsiyon bandları ile istenen nanopartikül kristallerinin oluşumu doğrulanmıştır. Membran yüzey morfolojisine ait SEM görüntüleri incelendiğinde ise, PSf membran dökme çözeltisine CuO ilave edildikçe, membran yüzeyinde CuO nanopartiküllerinin varlığının arttığı ve membran yüzeylerinde, ciddi miktarda CuO aglomerasyonu oluşumunun gerçekleşmediği tespit edilmiştir. Membran dökme çözeltisine ilave edilen %0.5 CuO ilavesi ile membran yüzeyi hidrofilitesi arttığından dolayı saf su akısının 283 kg/m².sa'den 452 kg/m².sa'e, bovin serum albümin (BSA) protein çözeltisine ait süzüntü suyu akısının ise 65.44 kg/m².sa'den 114.64 kg/m².sa'e arttığı görülmüştür. Ayrıca membran dökme çözeltisinde CuO konsantrasyonu %0'dan %0.75'e artığında BSA tutunum değerinin %87,9'dan %99,9'a arttığı tespit edilmiştir.

Development of Permeability and Separation Properties of PSf Ultrafiltration Membrane with CuO Nanoparticle Additive

Keywords

Ultrafiltration,
Nanoparticle,
Membrane processes,
Flux,
Rejection

Abstract: The aim of this study is to produce copper oxide (CuO) nanoparticles added microporous polysulfone (PSf) ultrafiltration membrane by using the phase inversion method and to improve the PSf membrane properties by utilizing the hydrophilic structure of the produced CuO nanoparticles. CuO nanoparticles were produced by using the one-step basic method. Synthesized CuO nanoparticles were characterized by X-Ray Diffraction (XRD) technique and Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) while the CuO/PSf membranes were characterized by Scanning Electro Microscope (SEM). Formation of the desired nanoparticle crystals was confirmed with the template and adsorption bands obtained as a result of XRD and FT-IR analysis. When the SEM images of the membrane surface morphologies were examined, it was found that as CuO was added to the PSf membrane dope solution, the presence of CuO nanoparticles on the membrane surface increased and there was no significant amount of CuO agglomeration on the membrane surfaces. Due to the increase in the hydrophilicity of the membrane surface with the addition of 0.5% CuO nanoparticle to the membrane dope solution, the pure water flux was increased from 283 kg/m².h to 452 kg/m².h, and the flux of bovine serum albumin (BSA) protein solution was enhanced from 65.44 kg/m².h to 114.64 kg/m².h. In addition, when the CuO concentration in the membrane dope solution was increased from 0% to 0.75%, it was determined that the BSA rejection value increased from 87.9% to 99.9%.

*İlgili Yazar, email: bozbey@gtu.edu.tr

1. Giriş

Basınç sürücülü membran ayırma prosesleri ters osmoz (TO), nanofiltrasyon (NF), ultrafiltrasyon (UF) ve mikrofiltrasyon (MF) teknolojilerinden oluşmaktadır [1]. NF ve MF prosesleri arasında yer alan UF teknolojisi 1-100 nm gözenek çapına sahip virüs, protein, makromolekül, nanopartikül ve kolloid gibi bileşenleri gidermek amacıyla birçok farklı alanda kullanılmaktadır [1, 2]. UF membranları özellikle süt endüstrisinde proteinlerin konsantrasyonu edilmesi, meyve sularının saflaştırılması gibi gıda endüstrisine ait su ve atıksuların arıtımında oldukça yaygın kullanım alanına sahiptir [3, 4].

UF membranların performansı ve yapısı, polisülfon (PSf), poliviniliden florür (PVDF), selüloz asetat (SA), polietilen (PE), poliamid, polipropilen ve polietersülfon (PES) gibi kullanılan polimerlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerine oldukça fazla bağlıdır [5, 6]. PES ve PVDF polimerleri termal ve kimyasal stabilitesi ve mekanik dayanımı gibi dikkat çekici özelliklere sahip olduğundan dolayı UF membran üretiminde oldukça fazla kullanılır iken PSf, yüksek termal stabilite, yeterli mekanik mukavemet, geniş bir pH aralığında yüksek kimyasal direnç ve UF uygulamaları için mükemmel film oluşturma yeteneği dahil dikkat çeken fizikokimyasal özelliklere sahip olması nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır [7,8]. Bununla birlikte, PSf'nin önemli bir dezavantajı, çoklu aromatik halkaların ve polar grupların azlığının bir sonucu olarak sahip olduğu hidrofobik doğasıdır [9]. PSf'nin hidrofobikliği, membran yüzeyinde ve membran gözenekleri içinde istenmeyen bileşenlerin birikmesi olan membran kirlenmesine neden olup süzöntü suyu akışının azalmasına, membran performansının düşmesine ve membran ömrünün azalmasına sebep olmaktadır [10].

Kirlenmeye ve akı düşüşüne karşı membran performansının geliştirilmesi amacıyla PSf membranların yüzey hidrofobikliğinin geliştirilmesi gerekmektedir. Hem membran akışının artırılması hem de membran kirliliğinin azaltılması amacıyla plazma uygulaması, graft polimerizasyonu, diğer polimerler ile karıştırma, kaplama, organik ve inorganik hidrofilik maddelerin ilavesi gibi modifikasyonlara başvurulabilmektedir [7, 11]. Yüzey modifikasyonu amacıyla bu doğrultuda, polivinilidenpirolidon (PVP), polietilen glikol (PEG) gibi organik bileşenler ile titanyum dioksit (TiO₂), çinko oksit (ZnO), bakır oksit (CuO), karbon nanotüpler gibi inorganik bileşenler ilave edilebilmektedir [7, 12]. Membran yüzeyinin nanopartiküller ile modifikasyonu membran performansını olumlu yönde oldukça fazla arttırabilmektedir [13].

CuO, geniş nanopartikül yelpazesi arasında membran özelliklerini iyileştirmek için uygun hidrofilik malzeme seçimlerden biri olabilmektedir. Uygun konsantrasyonda CuO nanopartikül ilavesi ile süzöntü suyu akışı iyileştirilebilmekte, CuO nanopartikül yüzeyindeki hidrofilik ve hidroksil grupları (-OH) gözenekliliğin artmasına neden olabilmektedir [5, 14]. CuO nanopartikülleri içme suyu arıtımında oldukça fazla kullanım alanına sahiptir [15].

PSf membranlarda karşılaşılan düşük akı problemlerine çözüm bulmak ve membran özelliklerini geliştirmek amacıyla yapılan bu çalışmada, faz inversiyon membran üretimi yöntemi ile metal nanopartikül ilaveli karışık matrisli CuO/PSf UF membran üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, farklı konsantrasyonlarda CuO ilavesinin süzöntü suyu akışı, tutunum performansı ve membran özellikleri üzerinde etkisi incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyaller

CuO nanopartikül sentezi için kullanılan CuSO₄.5H₂O ve NaOH Merck'den (Almanya) temin edilmiştir. PSf membranı üretimi için kullanılan 99.8% saflıkta susuz N,N-Dimetilasetamid (DMAC) ve PSf (PSf, MA=22,000 g/mol), Fluka'dan, polietilenglikol (PEG, MA=6,000 g/mol) Sigma Aldrich'den satın alınmıştır. Filtrasyon deneylerinde kullanılan bovin serum albumin (MA~66,000 Da) ise Sigma Aldrich'den temin edilmiştir.

2.2. CuO nanopartiküllerinin hazırlanması

CuO nanopartiküllerin hazırlanmasında, daha önceden kapalı bir cam numune hazırlama kabında 90 ml saf suya 1 g NaOH ilave edilerek hazırlanan çözeltiye 1 g CuSO₄.5H₂O ilave edilmiş ve ilk olarak 30 dk. boyunca karıştırıcıda karıştırılmış ve sonrasında karışım haline gelen çözelti 80 °C sıcaklıkta 24 saat boyunca karıştırılmaya devam edilmiştir. Katı sediment elde edildikten sonra, katı faz en az üç kere saf su ile yıkanmış ve 80 °C sıcaklıkta 12 saat boyunca kurutulmuştur [16, 17].

2.3. CuO/PSf ultrafiltrasyon membranların hazırlanması

PSf ultrafiltrasyon membranları hazırlamak için faz inversiyon yöntemi kullanılmıştır. İlk olarak, farklı konsantrasyonlarda CuO nanopartikülleri (toplam çözelti miktarına bağlı olarak ağırlıkça %0, 0.1, 0.25, 0.75 ve 1) DMAC çözücüsü içerisinde çözünmüştür. Daha sonrasında, gözenek yapıcı olarak PEG 6000 (toplam çözelti miktarına bağlı olarak ağırlıkça %2) ilave edilmiştir. PEG 6000'nin çözelti içerisinde tamamen çözülmesinden sonra, ağırlıkça %18 konsantrasyonunda PSf ilavesi gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan membran dökme çözeltileri, 12 saat boyunca 600 rpm'de oda sıcaklığı altında karıştırılmıştır. Çözelti içerisinde meydana gelebilecek hava kabarcıklarının uzaklaştırılması amacıyla çözelti 50 °C'ye ayarlı etüv fırında bekletilmiştir. Membran dökme çözeltileri hazırlandıktan sonra, hazırlanan çözelti 250 µm kalınlığa membran dökme bıçağı kullanılarak cam levha üzerinde dökülmüş ve membran dökme bıçağı aracılığıyla cam levha üzerinde polimerik film elde edilmiştir. Sonrasında, elde edilen polimerik film hızlıca 25 °C sıcaklığa sahip saf su içerikli su koagülasyon banyosuna daldırılmıştır. Elde edilen membranlar, filtrasyon deneylerinde test edilene kadar saf su içerisinde bekletilmiştir. Üretilen membranlara ait kodlar ve deneyler esnasında kullanılan dökme çözeltisi kompozisyonu Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Üretilen membranların kodu ve dökme çözeltisi kompozisyonu

Membran Kodu	PSf (wt%)	CuO (wt%)	PEG (wt%)	DMAC (wt%)
MCu0	18	0	2	80
MCu0.1	18	0.1	2	80
MCu0.25	18	0.25	2	80
MCu0.5	18	0.5	2	80
MCu0.75	18	0.75	2	80

2.4. Üretilen CuO nanopartikülünün ve CuO/PSf ultrafiltrasyon membranların karakterizasyonu

Üretilen CuO nanopartiküllerinin kristal yapısı, Rigaku Rint 2200 marka Cu Kα radyasyonlu ($\lambda=1.5406 \text{ \AA}$) X-Işınları Difraksiyonu (XRD) cihazı ile oda sıcaklığı altında incelenmiştir. CuO nanopartiküllerinin fonksiyonel gruplarını incelemek için 4000-650 cm^{-1} bandı aralığında Perkin Elmer Spectrum 100 marka Fourier Dönüşümlü Kızıl Ötesi Spektrometresi (FT-IR) analizi gerçekleştirilmiştir.

Üretilen membranların yüzey morfolojisini ve kimyasal kompozisyonunu incelemek için Zeiss Supra 55 marka Taramalı Elektro Mikroskobu (SEM) analizi gerçekleştirilmiştir. Membranlar, SEM analizi gerçekleştirilmeden önce 40 °C sıcaklıkta kurutulmuştur.

2.5. Membran filtrasyon deneyleri

Laboratuvar ölçekli membran filtrasyon deneyleri Sterlitech Corp. marka HP4750 model kapalı uçlu membran filtrasyon düzeneği ile gerçekleştirilmiştir. Etkin membran alanı 14.6 cm^2 olup çalışma hacmi 300 ml'dir. Deneyler süresince işletme basıncı, kapalı uçlu membran filtrasyon düzeneğine bağlı inert azot gazı ile sağlanmıştır. Her bir deney seti öncesi membranlar 30 dk. boyunca saf su ile 5 bar basınç altında sıkıştırılmıştır. Bütün deneylerde işletme basıncı ise 3 bar olarak ayarlanmış ve deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında tam karışımı sağlamak ve membranda konsantrasyon polarizasyon oluşumunu minimize etmek için filtrasyon düzeneği içerisinde yer alan besleme çözeltisi bir manyetik karıştırıcı aracılığıyla 400 rpm'de karıştırılmıştır. Her bir deney setinde 100 g besleme çözeltisi kullanılmış ve geri kazanım oranı %80 olarak ayarlanmıştır.

Toplanan süzüntü suyu miktarı bir hassas terazi aracılığıyla takip edilmiş ve elde edilen veriler 60 sn'de bir bilgisayara aktarılmıştır. Herbir membrana ait süzüntü suyu akısı aşağıda yer alan eşitlik ile hesaplanmıştır.

$$J = \frac{m}{A \cdot t} \quad (1)$$

Burada, J süzüntü suyu akı değerini ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{sa}$), m toplanan Süzüntü suyu miktarını (kg), A etkin membran alanını (m^2), t ise zamanı (sa) ifade etmektedir.

Filtrasyon deneyleri ise 500 mg/L konsantrasyona sahip BSA protein ile gerçekleştirilmiş ve her bir deney için hem süzüntü suyu akısı hem de protein tutunum değerleri takip edilmiştir. Besleme suyu ve süzüntü suyunda BSA analizi UV-Vis spektrofotometresi (Hach DR 2000) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Protein tutunumunu hesaplamak için aşağıda yer alan eşitlikten faydalanılmıştır.

$$R (\%) = \left(1 - \frac{C}{C_0}\right) \times 100 \quad (2)$$

Burada, R protein tutunum değerini (%), C süzüntü suyu protein değerini (mg/L), C₀ besleme suyu protein değerini (mg/L) ifade etmektedir.

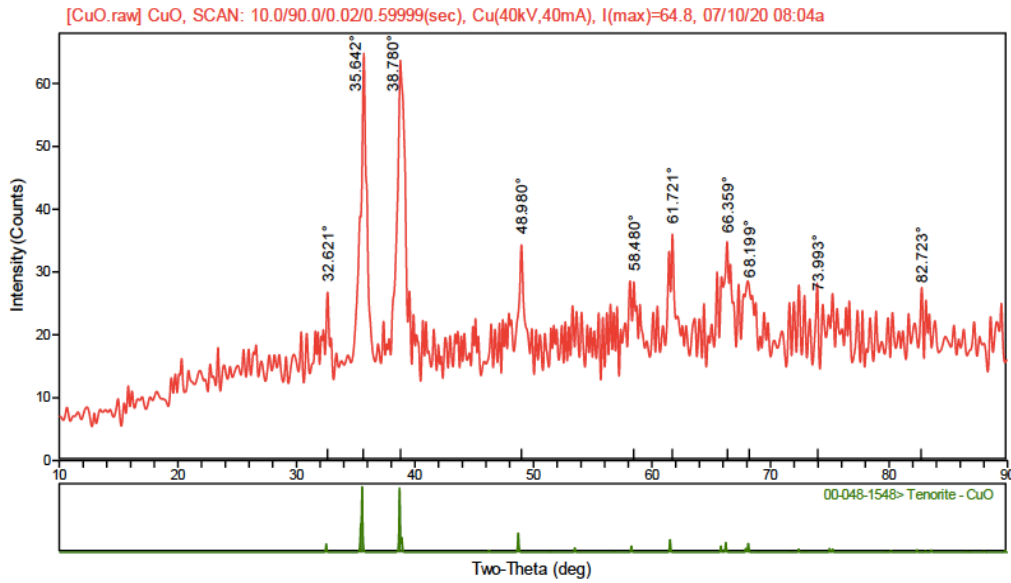
3. Bulgular

3.1. CuO nanopartiküllerinin karakterizasyonu

Üretilen CuO nanopartiküllerin görüntüsü Şekil 1'de ve kristal yapısına ait sonuç Şekil 2'de verilmiştir. XRD analizine göre CuO nanopartiküllerin XRD şablonu, Tenorit-CuO standart şablonu ile uyumlu bulunmuştur (Şablon No:00-048-1548). CuO kristallerinin varlığını doğrulamak için bu model arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. XRD analizi sonucu elde edilen şablon ile istenen kristallerin oluşumu doğrulanmıştır.

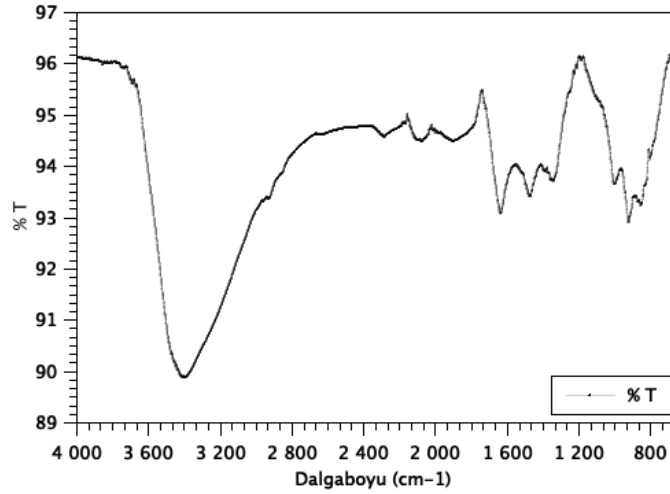


Şekil 1. CuO nanopartiküllerine ait fotoğraf.



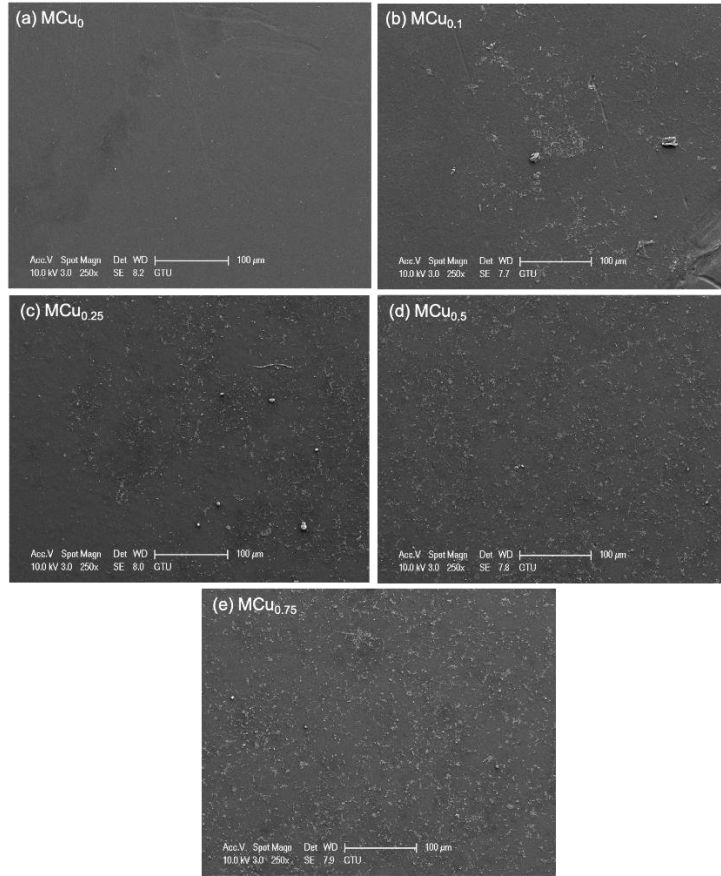
Şekil 2. CuO nanopartiküllerine ait XRD şablonu

CuO nanopartiküllerine ait FT-IR spektrumu Şekil 3'de verilmiştir. Şekil 3. incelendiğinde 3450 cm⁻¹'de görülen ana adsorpsiyon bandında O-H streçlenmesi görülmüştür. O-H bandındaki moleküler su, 1625 cm⁻¹ ve 1000 cm⁻¹ civarında görülen adsorpsiyon bandı ile ilişkilendirilmiştir [18].



Şekil 3. CuO nanopartiküllerine ait FT-IR spektrumu

Üretilen membranlara ait SEM görüntüsü Şekil 4’de verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde, PSf membran dökme çözeltisine CuO ilave edildikçe, membran yüzeyinde CuO nanopartiküllerinin varlığının arttığı tespit edilmiştir. Membran yüzeylerinde, ciddi miktarda CuO aglomerasyonu oluşumu tespit edilmemiştir.

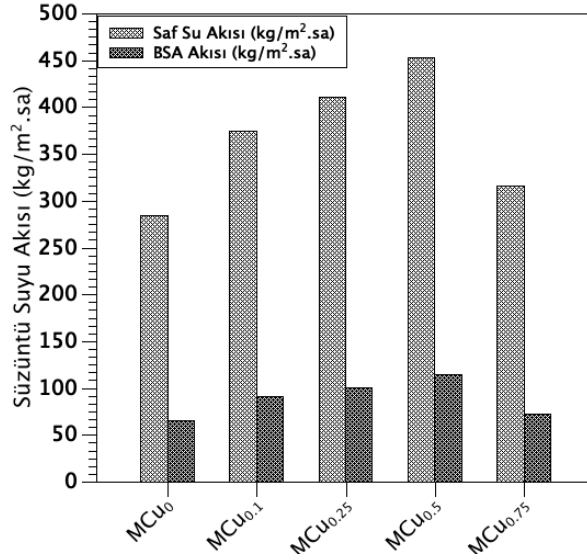


Şekil 4. Üretilen CuO/PSf membranlara ait SEM görüntüsü; (a) MCu₀, (b) MCu_{0.1}, (c) MCu_{0.25}, (d) MCu_{0.5}, (e) MCu_{0.75}.

3.2. Membran filtrasyon deneyleri

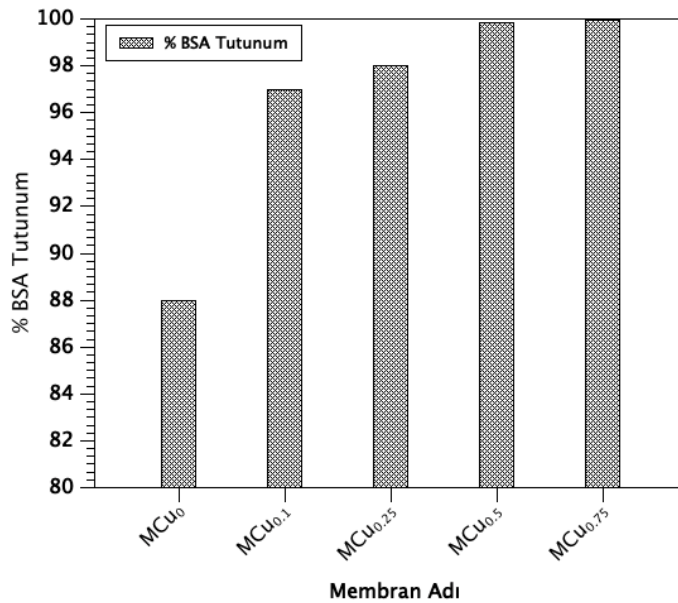
Üretilen CuO/PSf membranlara ait saf su ve BSA akı değerleri Şekil 4’de verilmiştir. Şekil 4’de de görüldüğü üzere membran dökme çözeltisi içerisinde CuO nanopartikül konsantrasyonu arttıkça hem saf su akısında hem de BSA akısında artış görülmüştür. Görülen bu akı artışının, CuO nanopartikülün yüzeyindeki hidroksil gruplarından (-OH) kaynaklı daha hidrofilik yapıda olması ve membran dökme çözeltisine CuO ilavesiyle PSf membran yapısının daha hidrofilik hale gelmesi ve temas açısının düşmesidir [19]. Nosrallahi et al. (2019) tarafından gerçekleştirilen

çalışma incelendiğinde üretilen PES membranlara ait membran dökme çözeltilerine CuO nanopartikülü ilave ettikçe temas açısı değerlerinin 69.8°'den 61.9°'ye düştüğü görülmüştür [20]. Temas açısı değerinin düşmesiyle su moleküllerinin membran matrisi içerisinde adsorpsiyonu kolaylaşmakta ve bu de su moleküllerinin membran yüzeyinden geçmesini kolaylaştırmaktadır. Şekil 4. incelendiğinde PSf dökme çözeltisine %0.5 CuO ilavesiyle saf su akışının yaklaşık olarak 283 kg/m².sa'den 452 kg/m².sa'e, BSA akışının ise 65.44 kg/m².sa'den 114.64 kg/m².sa'e arttığı görülmüştür. Süzüntü suyu akışında görülen bu artışın bir diğer nedeni, faz inversiyon prosesi sırasında, CuO nanopartiküllerinin hidrofilik doğasından dolayı çözücü/çözücü olmayan bileşenler arasında daha hızlı değişim olması sebebiyle gözenek yapısında görülen artıştır [21]. Membran dökme çözeltisinde CuO konsantrasyonu %0.5'den %0.75 arttığında, çözelti viskozitesinin artmasından ve bunun da daha yoğun membran yapısına neden olmasından dolayı saf su ve BSA akıları sırasıyla 452 kg/m².sa'den 315 kg/m².sa'e, 114 kg/m².sa'den 71 kg/m².sa'e düştüğü görülmüştür.



Şekil 4. CuO/PSf membranlara ait saf su ve BSA akısı

Üretilen CuO/PSf membranlara ait BSA tutunum değerleri Şekil 5'de verilmiştir. Membran dökme çözeltisinde CuO konsantrasyonu %0'dan %0.75'e arttığında BSA tutunum değerinin %87.9'dan %99.9'a arttığı görülmüştür. Membran dökme çözeltisine CuO ilavesiyle membran yüzeyinin daha hidrofilik hale geldiği bilinmektedir. Membran yüzeyi hidrofilitésinin artmasından dolayı daha hidrofobik yapıdaki BSA proteinin tutunum değerinin arttığı düşünülmektedir. Ayrıca, membran yüzeyinde herhangi bir kirliliğin oluşmasını etkileyen en önemli faktörlerden biri adsorpsiyon mekanizması olduğundan dolayı, membran yüzeyi hidrofilikliği artmasıyla hidrofobik ajanlara karşı membran kirliliği oluşumu azalmaktadır [22].



Şekil 5. CuO/PSf membranlara ait BSA tutunum değerleri

4. Tartışma ve Sonuç

Gerçekleştirilen çalışmada, membran dökme çözeltisine farklı konsantrasyonlarda CuO nanopartikülleri ilavesi ile modifiye edilmiş PSf membran üretimi gerçekleştirilmiştir. Kompozit CuO/PSf membran üretimi faz inversiyon metodu kullanılarak başarıyla gerçekleştirilmiştir. Üretilen metal nanopartiküle ilişkin karakterizasyon sonuçları incelendiğinde CuO nanopartikül üretiminin başarıyla gerçekleştirildiği tespit edilmiştir. PSf polimerinden oluşan membran dökme çözeltisine Hidrofilik CuO nanopartiküllerinin ilavesiyle üretilen membranlarda membran hidrofilitesinin artmasından kaynaklı daha yüksek süzüntü suyu akılarına ve BSA protein tutunum değerlerine ulaşıldığı görülmüştür. Sonuç olarak, nispeten daha yüksek hidrofobisiteye sahip PSf membranlara hidrofilik CuO nanopartikül ilavesiyle, membran geçirimsizlik ve rejeksiyon değerlerinin iyileştirilebileceği ve membran özelliklerinin geliştirilebileceği tespit edilmiştir.

Kaynakça

- [1] Mulder, M. 1991. Basic principles of membrane technology. Springer Science & Business Media, 520s.
- [2] Su, Y., Mu, C., Li, C., Jiang, Z. 2009. Antifouling property of a weak polyelectrolyte membrane based on poly (acrylonitrile) during protein ultrafiltration. *Industrial & engineering chemistry research*, 48(6) (2009), 3136-3141.
- [3] Cancino-Madariaga, B., Ruby, R., Astudillo Castro, C., Saavedra Torrico, J., Lutz Riquelme, M. 2012. Analysis of the membrane fouling mechanisms involved in clarified grape juice ultrafiltration using statistical tools. *Industrial & engineering chemistry research*, 51(10) (2012), 4017-4024.
- [4] Lu, H., Zou, W., Chai, P., Wang, J., Bazinet, L. 2016. Feasibility of antibiotic and sulfate ions separation from wastewater using electrodialysis with ultrafiltration membrane. *Journal of Cleaner Production*, 112 (2016), 3097-3105.
- [5] Nasrollahi, N., Aber, S., Vatanpour, V., Mahmoodi, N. M. 2018. The effect of amine functionalization of CuO and ZnO nanoparticles used as additives on the morphology and the permeation properties of polyethersulfone ultrafiltration nanocomposite membranes. *Composites Part B: Engineering*, 154 (2018), 388-409.
- [6] Arefi-Oskoui, S., Vatanpour, V., Khataee, A. 2016. Development of a novel high-flux PVDF-based ultrafiltration membrane by embedding Mg-Al nanolayered double hydroxide. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 41 (2016), 23-32.
- [7] Ganj, M., Asadollahi, M., Mousavi, S. A., Bastani, D., Aghaeifard, F. 2019. Surface modification of polysulfone ultrafiltration membranes by free radical graft polymerization of acrylic acid using response surface methodology. *Journal of Polymer Research*, 26(9) (2019), 231.
- [8] Gokulakrishnan, S. A., Arthanareeswaran, G., Zsuzsanna, L., Veréb, G., Kertész, S., Kweon, J. 2021. Recent development of photocatalytic nanomaterials in mixed matrix membrane for emerging pollutants and fouling control, membrane cleaning process. *Chemosphere*, 130891.
- [9] Mokhtari, S., Rahimpour, A., Shamsabadi, A. A., Habibzadeh, S., Soroush, M. 2017. Enhancing performance and surface antifouling properties of polysulfone ultrafiltration membranes with salicylate-alumoxane nanoparticles. *Applied Surface Science*, 393 (2017), 93-102.
- [10] Shi, X., Tal, G., Hankins, N. P., Gitis, V. 2014. Fouling and cleaning of ultrafiltration membranes: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 1 (2014), 121-138.
- [11] Fan, Z., Wang, Z., Sun, N., Wang, J., Wang, S. 2008. Performance improvement of polysulfone ultrafiltration membrane by blending with polyaniline nanofibers. *Journal of Membrane Science*, 320(1-2) (2008), 363-371.
- [12] Nasrollahi, N., Vatanpour, V., Aber, S. 2019. Improving the permeability and antifouling property of PES ultrafiltration membranes using the drying method and incorporating the CuO-ZnO nanocomposite. *Journal of Water Process Engineering*, 31 (2019), 100891.
- [13] Bhattacharya, P., Mukherjee, D., Deb, N., Swarnakar, S., Banerjee, S. 2021. Indigenously developed CuO/TiO₂ coated ceramic ultrafiltration membrane for removal of emerging contaminants like phthalates and parabens: Toxicity evaluation in PA-1 cell line. *Materials Chemistry and Physics*, 258, 123920.
- [14] Saraswathi, M. S. S. A., Rana, D., Divya, K., Gowrishankar, S., Sakthivel, A., Alwarappan, S., Nagendran, A. 2020. Highly permeable, antifouling and antibacterial poly (ether imide) membranes tailored with poly

(hexamethylenebiguanide) coated copper oxide nanoparticles. *Materials Chemistry and Physics*, 240 (2020), 122224.

- [15] Bhattacharya, P., Swarnakar, S., Ghosh, S., Majumdar, S., Banerjee, S. 2019. Disinfection of drinking water via algae mediated green synthesized copper oxide nanoparticles and its toxicity evaluation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(1), 102867.
- [16] Li, B., Wang, Y. 2010. Facile synthesis and photocatalytic activity of ZnO–CuO nanocomposite. *Superlattices and Microstructures*, 47(5) (2010), 615-623.
- [17] Mahmoodi, N. M., Chamani, H., Kariminia, H. R. 2016. Functionalized copper oxide–zinc oxide nanocomposite: synthesis and genetic programming model of dye adsorption. *Desalination and Water Treatment*, 57(40) (2016), 18755-18769.
- [18] Laokul, P., Amornkitbamrung, V., Seraphin, S., Maensiri, S. 2011. Characterization and magnetic properties of nanocrystalline CuFe₂O₄, NiFe₂O₄, ZnFe₂O₄ powders prepared by the Aloe vera extract solution. *Current Applied Physics*, 11(1) (2011), 101-108.
- [19] Hong, J., He, Y. 2012. Effects of nano sized zinc oxide on the performance of PVDF microfiltration membranes. *Desalination*, 302 (2012), 71-79.
- [20] Nasrollahi, N., Aber, S., Vatanpour, V., Mahmoodi, N. M. 2019. Development of hydrophilic microporous PES ultrafiltration membrane containing CuO nanoparticles with improved antifouling and separation performance. *Materials Chemistry and Physics*, 222 (2019), 338-350.
- [21] Vatanpour, V., Madaeni, S. S., Moradian, R., Zinadini, S., Astinchap, B. 2011. Fabrication and characterization of novel antifouling nanofiltration membrane prepared from oxidized multiwalled carbon nanotube/polyethersulfone nanocomposite. *Journal of membrane science*, 375(1-2) (2011), 284-294.
- [22] Vatanpour, V., Madaeni, S. S., Moradian, R., Zinadini, S., Astinchap, B. 2012. Novel antibifouling nanofiltration polyethersulfone membrane fabricated from embedding TiO₂ coated multiwalled carbon nanotubes. *Separation and purification technology*, 90 (2012), 69-82.

ZnO Katkılı Greslerin Sıcaklık ve Soğurma Özelliklerinin Araştırılması

Nimeti DÖNER¹*, Gökhan GÖKDEMİR¹, Zerrin SERT², Fatih ŞEN³

¹Gazi University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, ANKARA

²Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ESKİŞEHİR

³Dumlupınar Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Biyokimya Bölümü, KÜTÜHYA

(Alınış / Received: 05.12.2020, Kabul / Accepted: 08.06.2021, Online Yayınlanma / Published Online: 31.08.2021)

Anahtar Kelimeler

Gres,
Mikroparçacık,
Sıcaklık dağılımları,
Soğurma,
Işınım özellikleri

Öz: Dış ortamlarda çalışan büyük iş makinalarının hareketli aksamalarını yağlamakta kullanılan greslerin iki tipi seçilerek, ısı özellikleri hem deneysel hem sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Gerçek çalışma şartlarını simule eden bir test düzeneği hazırlanmıştır. Katkısız ve mikroparçacık katkı greslerin sıcaklık ve moment değişimleri bu test düzeneğinde analiz edilmiştir. Katkı maddesi olarak yüksek enerjili elektromanyetik ışınım özelliğine sahip, yarı iletken bir malzeme olan ZnO (çinko oksit) ağırlıkça farklı oranlarda greslere karıştırılarak test edilmiştir. Işınım özellikleri görünür dalga boyunda ve 2.5–20 µm'lik kızılötesi dalga boyu aralıklarında incelenmiştir. Ayrıca deneysel sonuçlar, Ayrık Dipol Yaklaşımı (DDA) yöntemiyle soğurma verimlilik faktörleri bakımından değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar moment, sıcaklık ve soğurma değerleri şeklinde sunulmuştur. Sıcaklık ve moment değişimleri, metalik mikroparçacıkların ağırlıkça katkı oranlarına ve greslerin tipine göre değişiklik göstermiştir. Kauçukla kalınlaştırılmış gres, lityumla kalınlaştırılmış grese göre daha yüksek momentlere ulaşmaktadır. Katkılı greslerin soğurma değerleri, kızılötesi dalga boyundaki katkısız greslere göre daha küçüktür. Bu nedenle, katkı greslerin büyük iş makinalarının hareketli aksamalarında oluşan ısıyı hızlı bertaraf edebilecekleri öngörülmektedir.

Investigation of Temperature and Absorption Properties of ZnO Additived Greases

Keywords

Grease,
Microparticle,
Temperature distributions,
Absorption,
Radiative properties

Abstract: Two types of greases, namely, lithium- and caoutchouc-thickened greases, used to lubricate the moving parts of huge heavy machines operating in outdoor environments are selected and their thermal properties are investigated using both experimental and numerical methods. A test setup for simulating the actual operating conditions is prepared. The temperature and torque variations of greases without additives and with microparticle additives are analyzed in the test setup. ZnO (zinc oxide), a semiconductor material that relies on high energy electromagnetic radiation as an additive, is tested by mixing it into greases in weight fractions. The radiative properties are analyzed in the visible and the infrared wavelength ranges of 2.5–20 µm. Furthermore, the experimental results are validated by the discrete dipole approximation (DDA) method by evaluating the absorption efficiency factors. The obtained results are presented with the changes in momentum, temperature and absorption values. The temperature and torque distributions vary according to the weight fractions of the metallic microparticles and the type of greases. The caoutchouc-thickened grease reaches higher torques than the lithium-thickened grease. The absorption values of the greases with additives are smaller than the greases without additives in the near-infrared wavelength. Therefore, it is seen that greases with additives can quickly eliminate the heat generated in the moving parts of heavy machines.

*İlgili Yazar, email: nimetidoner@gazi.edu.tr

1. Giriş

Gresler endüstriyel yağlamada oldukça yaygın kullanılan, sürtünmeyi azaltarak makinelerin daha az tahrip olmasını sağlayan ve korozyonu önleyen yarı sıvı akışkanlardır. Viskoz özelliğe sahip gresler menteşeler, pimler, darbe ve talaşlı imalat tezgâhlarının ayna, mil, dişli gibi tüm hareketli parçalarında kullanılmaktadır. Bunların

yanında, yol yapım çalışmalarında kullanılan büyük arazi araçlarının, hareketli aksamaların yataklarında da uygulanmaktadır ve ağır çalışma şartları altında, özelliğini yitirmesinden dolayı günlük olarak değiştirilmektedir. Dolayısıyla, yağlama işlemi koruyucu ve hasar önleyici özelliği nedeniyle, araçların ve hareketli parçalarının servis bakım periyodunun uzamasını ve makina sistemlerinin uzun çalışma ömürlü olmasını sağlar. Ağır iş makinalarında greslerin uygulanmasının dezavantajı ise, her gün yapılan yağlama işlemi, işçilik ve yağ-bakım maliyetini artırmaktadır.

Dış ortamda çalışan makineler gündüz güneş ışınımına maruz kalmaktadır. Dünya yüzeyine ulaşan güneş ışınları 300 nm ila 2500 nm dalga boyu aralığında olup, yeryüzüne ulaşan güneş ışınımı %5 ultraviyole, %43 görünür ve %52 kızılötesi dalga boyu aralığına denk gelmektedir [1-6, 8]. Bu nedenle, dış ortamlarda çalışan makinelerde hareketli parçalarda oluşan sürtünme kaynaklı ısı probleminin yanında, güneş ışınımının soğurulmasından kaynaklanan ısının da azaltılması gerekmektedir. Bunun için görünür ve kızılötesi dalga boylarındaki soğurmayı en aza indirmek önemlidir.

Gresin içeriği ve ısıl özellikleri, çalışma koşullarına ve kullanıldığı endüstriyel uygulamalara göre çeşitlilik gösterir. Gres üç bileşenden oluşur. Bunlar; kalınlaştırıcı, baz yağ ve katkı maddeleridir ve içerdiği kalınlaştırıcıya göre adlandırılır [9]. Lityum ile kalınlaştırılmış gres; ağır yük ve yüksek hızda çalışan mekanik sistemlerde geniş uygulama sıcaklığı, su geçirmez özelliği ve düşük maliyet nedeniyle oldukça yaygın kullanılmaktadır. Kalsiyum ile kalınlaştırılmış gres ise genellikle orta ve hafif yük altında çalışan mekanik sistemlerde kullanılmaktadır [10, 11].

Sürtünmenin sebep olduğu ısının, baz yağdan daha yüksek ısıl iletkenliğe sahip nano-mikro parçacıklar kullanılarak ortamdaki hızlı transfer edilmesi ve aynı zamanda yağlama özelliğinin sürdürülebilirliği üzerine literatürde bir çok çalışmalar mevcuttur. Prasad vd. [12] çeşitli metalik mikroparçacıkların yağa eklenmesi durumunu inceleyerek, uzun çalışma sürelerinde sıcaklık değişimlerini analiz etmişlerdir. Nicoletti [13], Si, SiO₂, Al, Al₂O₃, Cu, CuO gibi nano parçacıkların grese eklenmesini sayısal modelleyerek çalışmıştır ve nano parçacık içeren greslerin viskozitelerinin yüksek oranda sıcaklığa bağlı olduğunu tespit etmiştir. Goyal vd. [14] ise grese nano parçacık eklenmesinin ısıl özellikleri nasıl etkilediğini irdeleyen derleme çalışması yapmışlardır. Buna göre, grese nano parçacık eklenmesinin yatak-yük taşıma kapasitesini artırdığını, sürtünme kuvvetlerini ve temas yüzeylerindeki temas alanını azalttığı tespit edilmiştir. Peña-Parás vd. [15], sıcaklığın CuO ve TiO₂ nanoparçacık katkılı yağlayıcıların aşırı basınç altındaki etkilerini incelemişlerdir. Sonuç olarak, hareketli yüzeylerin temas alanında bir azalma ve yük taşıma kapasitesinde bir artış bulmuşlardır. Karbon nano-tüp eklenmiş greslerin ısıl iletkenlikleri Hong vd. [16] tarafından incelenip, nano parçacıkların ağırlıkça karışım oranının ısıl özellikleri etkilediği sonucuna varmışlardır. Başka bir çalışmada, sıcaklık ve viskozitenin greslerin performansına etkileri, grafit katkılı gres ile incelenmiş ve sıcaklık arttıkça viskozitenin azaldığı görülmüştür [17].

Gresler lityum, sodyum ve kalsiyum gibi uzun yağ asit zincirli sabunların kalınlaştırma özelliğinin dağıtılmasıyla yağlamayı gerçekleştirir. Lityum ile kalınlaştırılmış gresler, çok fonksiyonlu özellikleri ve uzun kullanım süreleri ile sodyum ve kalsiyum ile kalınlaştırılmış greslerin yerini almaktadır [18]. Yaşlandırma işlemi öncesi ve sonrasındaki lityum bazlı gresin, soğurma özellikleri düşük sıcaklıklarda Zhou vd. [19] tarafından araştırılmıştır. Mekanik sistemlerde nano parçacık katkılı gresin (TiO₂, Al₂O₃, CuO, ve karbon nanotüplerin) ısıl iletkenlik, sürtünme ve yük direnci Pena-Paras vd. [20,21] tarafından ayrıntılı olarak incelenmiştir. Çalışmalarında iki farklı grese, ağırlık miktarları % 0.01, % 0.05 ve % 0.1 olan nano katkı maddeleri ekleyerek çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalarının sonucunda nano parçacık katkılı greslerin ısıl ve tribolojik performans için kullanılabilir olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Greslerin veya nanoakışkanların ısıl ve akış özelliklerinin incelenmesinde solar ışınımını dikkate alarak yapılan çalışma sayısı oldukça azdır. Bunlardan birinde, güneş ışınımına maruz kalan nano sıvıların ısıl davranışları Kandasamy vd. [22] tarafından incelenmiştir. Bu çalışmada; sıcaklığın, nanoparçacık hacim oranının ve akış alanının güneş ışınımından oldukça etkilendiğini ve akış özelliklerinin değiştiğini tespit etmişlerdir. Wang vd. ve Ahlatli vd.'lerinin çalışmalarında [23, 24], güneş ışınımına maruz kalan nanoakışkan kullanan akış kanalları ve güneş kollektörlerinin ısıl performansları ve optik özellikleri değerlendirilmiştir. Literatürde greslerin özelliklerini inceleyen çalışmalardan, baz yağdan daha yüksek ısıl iletkenliğe sahip nanoparçacıklar kullanıldığında, sistemde oluşan ısının ortamdaki daha hızlı uzaklaştırıldığı ve yağlama özelliğinin sürdürülebilirliğinin korunduğu görülmüştür. Ancak, literatürde bir iki çalışma dışında, greslerin ışınım özelliklerinin pek incelenmediği görülmüştür. Bu nedenle, çalışmamızda dış ortamlarda çalışan makinelerde kullanılan greslerin katkısız ve mikroparçacık katkılı durumları, sıcaklık, moment ve ışınım özellikleri bakımından incelenecektir.

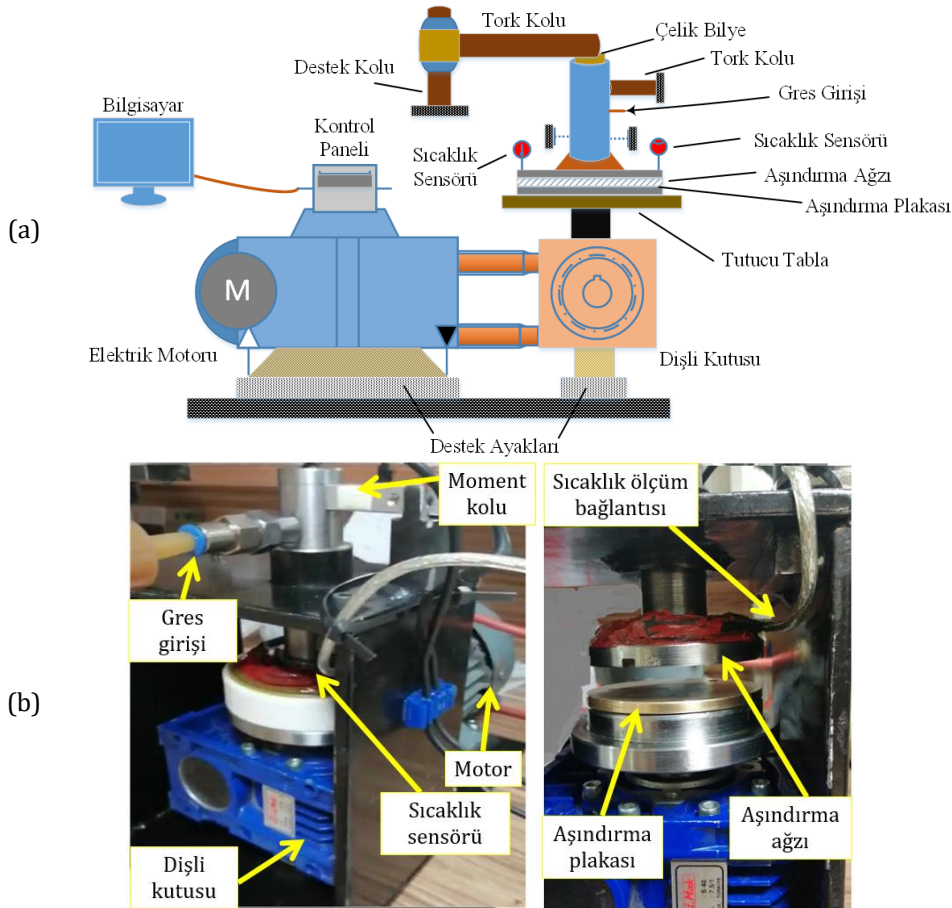
Çalışmamızda, gerçek çalışma koşullarını simule eden test düzeneğinde greslerin sıcaklık ve moment değişimleri incelenmiştir. Anlatım kolaylığı için, lityum kalınlaştırıcı gres, Gres 1 ve kalsiyum kalınlaştırıcı gres, Gres 2 olarak adlandırılmıştır ve gresler DIN standardında, sırasıyla 51502-KP 2 K-20 ve 51825-KP 2 E-10 kodlu ürünlerdir. Katkı maddesi olarak ZnO mikroparçacıkları kullanılmıştır. Katkısız greslerin görünür ve kızılötesi dalga boyu aralığındaki ve ZnO katkılı greslerin yakın-kızılötesi (infrared) dalga boyu aralığındaki soğurma özellikleri deneysel çalışmalar ile ölçülmüştür. Dış ortamlarda güneş ışınımına uzun süre maruz kalan iş

makinelerinin hareketli aksamalarının yatak bölgelerinde kullanılan greslerde; sürtünme sonucu oluşan sıcaklık artışı (ısınma) ile birlikte, güneş ışınımının soğurulması sonucu daha fazla sıcaklık artışı (ısınma) oluşmakta, dolayısıyla yataklardaki ısı problemi daha karmaşık hale gelmektedir. İş makinelerinin çalışma periyodunun aksamaması ve hareketli aksamaların efektif ve uzun süre çalışabilmesi için, yataklardaki ısının hızlı bir şekilde ortamdaki transfer edilmesi yada yapısal özellikler ile ısı artışının önlenmesi gibi çözümler gerektirmektedir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Sıcaklık ve moment değişimi ölçümleri

Şekil 1'de greslerin sıcaklık ve moment değişimlerini incelemek için hazırlanan deney düzeneğinin (a) şematik görünümü ve (b) fotoğrafı verilmektedir. Deney düzeneğinde birbiri ile sürtünme halinde olan birer adet çelik aşındırma çenesi ile, pirinç malzemeden yapılmış aşınma plakası mevcuttur. Sistemde tahrik elemanı olarak 3 faz 450 Volt, 0,25 kW gücünde, 1390 dev/dak dönme hızına sahip elektrik motoru kullanılmıştır. Motorun hemen çıkışında, hareketi 90 derece yön değiştiren, 7,5/1 tahvil oranına sahip dişli redüktör bulunmaktadır. Bu redüktör ile motorun sahip olduğu 1390 dev/dak dönme hızı test parçalarına ortalama 185 dev/dak olarak iletilmekte, döndürme momenti de ortalama 7,5 kat arttırılmaktadır. Her iki yönde döndürme ile uygulanan yük miktarı ayarlanabilmektedir. Tork kolu mili üzerinden yük aşındırma çenesine iletilmektedir. Aşındırma çenesi milinin üzerine uygulanan kuvvetin mil üzerinde sürtünme kuvveti oluşturarak sürtünme kuvvetinin ölçümünde hataya neden olmaması için noktasal temas sağlamak üzere bir adet çelik bilye yerleştirilmiştir. Aşındırma çenesi milinin eksenine boyunca 5 mm çapında bir delik açılarak test edilecek gres yağının sürtünme ortamına bu kanaldan sevk edilmesi sağlanmıştır. Yükleme miktarı bir load-cell ile ölçülerek elektronik kontrol kartına gönderilmektedir. Bu değerlerin ölçülmesi, yapılacak ölçüm karşılaştırmalarının aynı şartlarda olmasını sağlamak açısından önemlidir.



Şekil 1. Test düzeneği (a) şematik görünümü ve (b) fotoğrafları

Yükleme, aşınma plakası üzerinden aksel yönde doğrudan tahrik tablasına etkidiğinden, yükü üzerine alarak redüktöre ek yük getirmemesi için konik bir yükleme rulmanı kullanılmıştır. Tüm yük bu rulmanın üzerinde olup diğer tahrik parçalarına ek bir kuvvet uygulamamaktadır. Aşınma plakası 80 mm çapında, 5 mm kalınlığında pirinç-bronz malzemeden üretilmiştir. Bu malzeme bir çok uygulamada yatak malzemesi olarak kullanıldığından gerçek çalışma şartlarını sağlamak üzere seçilmiştir. Elektronik kontrol ünitesi Arduino Uno cinsi programlama kartına sahiptir. Ünitenin içinde aynı zamanda üç fazlı motoru kontrol etmek üzere elektrik kontaktörleri mevcuttur. Bu kontaktörler sayesinde elektrik motorunun dönme zamanı ve yönü kontrol edilmektedir.

Elektronik programlama kartı, sıcaklık ve yük sensörlerinden aldığı bilgileri işleyerek kontrol ünitesinin üzerindeki LCD ekrana ve kullanılan bir seri port veri yolu ile bilgisayar ortamına gönderilmektedir. Hazırlanan kontrol programında elektrik motorunun, dolayısıyla sürtünme parçalarının birbiri üzerinde hangi süreyle sağa sola döneceği ayarlanmaktadır. Bu uygulama için 10 saniye sağa, 10 saniye sola dönecek şekilde ayarlanmıştır. Her bir sağa ve sola dönüş tamamlandığında 1 tekrar yapılmış sayılmaktadır. Bu süre göz önünde bulundurularak tekrar sayısı kontrol ünitesi üzerinde ayarlanabilmektedir. Kontrol ünitesi, her bir tekrardan sonra tekrar sayacını 1 arttırarak saymakta, ayarlanan tekrar sayısına ulaşıncaya sistemi durdurmaktadır. Aşınma plakası tahrik tablasına yerleştirildikten sonra, 60 cc hacimli bir enjektör ile test yağı aşındırma çenesinin ekstenel kanalı boyunca çalışma alanına sevk edilir. Bu enjektör ile gönderilen yağ miktarı ölçülebilmektedir. Bu durum, test edilerek karşılaştırılan yağların aynı şartlarda ve miktarda uygulanması açısından önemlidir. Yapılan testlerde, yağ kanallarında bulunan yağ hariç çalışma alanına verilen ilk yağ miktarı 12 cc'dir. Yağ uygulaması yapıldıktan sonra çeneler birbiri üzerine oturtularak yüklemeye somunu ile uygulanmak istenen yük miktarı ayarlanmaktadır. Yük miktarı eş zamanlı olarak LCD ekran üzerinden görüldüğü için miktar ayarı kolaylıkla yapılabilmektedir. Yapılan ilk testlerde bu miktar 40 kg olarak seçilmiştir. Yüklemeye miktarı tüm numunelerin test edilmesi sırasında aynıdır. Ayarlanan tekrar sayısına ulaşıncaya kadar cihaz çalışmakta, her bir tekrar sonunda ölçülen yüklemeye, moment, sıcaklık ve tekrar sayısı LCD ekranda ve bilgisayar seri ekranına yazdırılarak kaydedilmektedir.

2.2. Soğurma özelliğinin ölçümü

Işınım, ısı transferi mekanizmalarından biri olup, elektromanyetik dalgalar veya fotonlar yardımıyla gerçekleşen, hacimsel enerji aktarımıdır. Işınımın dalga özelliği, mikron olarak dalga boyu (λ) ile ifade edilir. Uygulamada karşılaşılan elektromanyetik ışınım, 10^{-10} 'dan 10^{10} 'a kadar geniş bir dalga boyu aralığındadır. Görünür dalga boyu 0.4 ile 0.7 μm aralığında iken kızılötesi (infrared) daha boyu 0.75 μm ile 100 μm aralığında yayılır [7]. Madde elektromagnetik ışınım ile etkileştiğinde, yapısında bulunan elektronların salınım ve yörünge değiştirmeleri sonucunda enerji açığa çıkmaktadır. Bu durumda, maddenin iç enerjisi ve sıcaklığında değişimler gerçekleşmektedir.

Maddelerin soğurma özelliği, dalga boyu, maddenin parçacık boyutu ve yansıtma indeksi ($m = n + ki$) ile değişir. Yansıtma indeksi, n reel kısım ve k sanal kısım olmak üzere iki parametreden oluşur ve dalga boyuna göre soğurma ve saçılma özelliklerinin belirlenmesinde oldukça önemlidir [25]. Ayrıca, bir ortamda yayınan ışınım parçacıklar ile karşılaştığında, parçacıklar tarafından soğurulur veya yansıtılır. Işınımın ortamdaki geçerken soğurulmasından kaynaklanan şiddetindeki azalma, Denklem (1) de verilen Beer-Lambert yasası [8] ile ifade edilir:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-Lk_{toplam}} \quad (1)$$

Burada L ortamın derinliğini (cm), I_0 başlangıçtaki ışınım şiddetini (W/m^2), I ortamdaki ışınım şiddetini (W/m^2), k_{toplam} ($=k_{gres} + k_{parçacık}$) ise gresin (k_{gres}) ve katkı maddesinin ($k_{parçacık}$) soğurma katsayılarının toplamını tanımlamaktadır.

Çalışmada soğurma ölçümleri iki farklı spektrofotometre cihazı ile yapılmış olup, görünür dalga boyundaki (UV-VIS) soğurma ölçümlerinde, PerkinElmer Lambda 750 spektrofotometre cihazı kullanılmıştır. UV-VIS dalga boyundaki soğurma ölçümleri, organik ve inorganik maddelerin miktarını belirlemek için sıkça kullanılan bir yöntemdir. Moleküler absorpsiyon spektroskopisi, λ dalga boyunda bir ışın yolu olan şeffaf bir kap içinde bir çözeltinin geçirgenliğinin (T) veya absorpsiyonunun ($A = -\log T$) ölçülmesine dayanır. Bu soğurma ölçümleri çözelti halindeki numunelere yapılabilmektedir. Bu yüzden yarı-katı yağlayıcı olan gres hekzan ile seyrestirilmiş ve çözelti haline getirilmiştir. Sekiz adımda oluşturulan çözelti üzerinden soğurma ölçümleri yapılmıştır. Birinci çözelti, 50 ml hekzan ile 0.1 gr gres manyetik karıştırıcıda 30 dakika karıştırılıp, 0.4 μm 'lik filtreden süzülerek oluşturulmuştur. Daha sonraki yedi çözelti, 2 ml önceki adımdaki çözelti (gres+hekzan karışımı) ve 2 ml hekzanın vorteks karıştırıcı ile karıştırılması ile elde edilmiştir. Bu süreç, Gres 1 ve Gres 2 için aynı adımlar ve sürelerde tekrarlanmıştır. Görünür dalga boyunda sadece katkısız gresin soğurma değerleri ölçülebilmektedir, katkılı greslerin ölçümleri için birçok test yapılmış, ancak metal parçacıkların çökmesi nedeniyle sonuç elde edilememiştir. Mikroparçacık katkılı ve katkısız greslerin, yakın-kızılötesi dalga boyu aralığındaki soğurma özellikleri PerkinElmer Spectrum Two spektrofotometre cihazı (FTIR) ile ölçülmüştür. Tüm ölçümler oda sıcaklığında yapılmış ve sonuçların kararlılığı için en az üç kez tekrarlanmıştır.

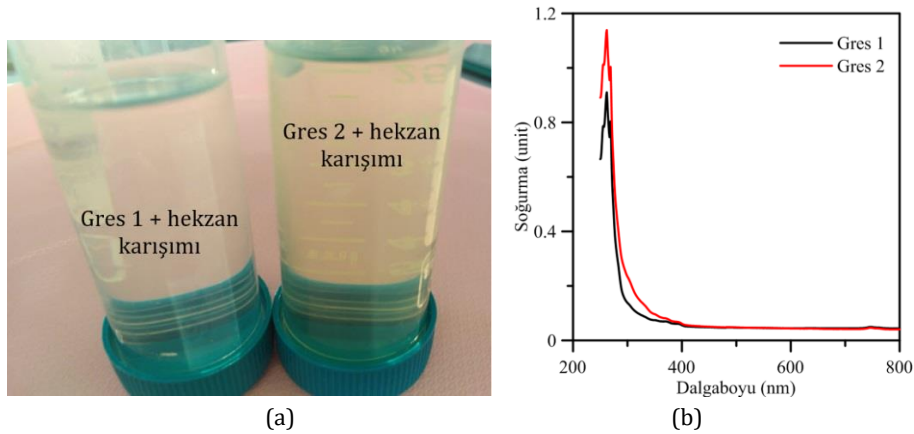
Deneylerde kullanılan ZnO Sigma-Aldrich firmasından temin edilmiştir ve parçacık büyüklükleri 5 μm 'den küçüktür. ZnO ultraviyole ışınlar karşı güçlü koruma sağlayan yani UV emici özellik gösteren bir yarı iletkenidir. Ayrıca yapılan çalışmalarda ZnO katkılı nanoakışkanlı ısı transferi analiz deneylerinde başarılı sonuçlar elde edildiği görülmüştür [26]. ZnO'nin kararlı haldeki şeklinin hegzagonal yapıda olması ve deneylerde kullanılan ZnO'nin %99 saflıkta olması nedeniyle, DDA yönteminde mikroparçacıkların şekli hegzagonal olarak kabul edilmiştir. Bunlara ek olarak; ZnO mikroparçacığının yansıtma indeksi $m = 2 + 0.5i$ [27] olarak alınmıştır.

2.3. Soğurma ve saçılma etkenliklerinin sayısal hesabı

DDA yöntemi bir ortamdaki ışınım saçılmasının modellenmesini sağlar [28]. Bu sayısal yöntemin hesaplama doğruluğu, birçok çalışmada çeşitli büyüklük ve geometrilerdeki parçacıklar ve topaklanmalar için test edilmiş ve yüksek hassasiyette sonuçlar verdiği görülmüştür [25, 29]. Bir parçacık üzerine gelen ışınımın etkileri yansıtma, kırılma ve soğurmadan oluşur. Dolayısıyla, bu yöntem bir parçacığın ışınım özellikleri olan yok olma, saçılma ve soğurma etkenliklerini tanımlayan Q terimlerini (birimsiz) hesaplar. Açık kod olarak ulaşılabilen, fortran programlama dilinde yazılmış ve DDSCAT olarak adlandırılan programda yansıtma indeksi, dalga boyu ve efektif yarıçap ($a_{\text{efektif}} = N^{1/3}a$) veri olarak kullanılır [30]. Efektif yarıçap formülündeki, N parçacık sayısı, a ise parçacık yarıçapıdır [25]. Bir parçacığın kesit alanındaki soğurma, saçılma ve yok olma katsayısı $C_i = Q_i \pi a_{\text{efektif}}^2$ şeklinde tanımlanır. Burada i alt indisi yok olma, soğurma ve saçılmayı ifade etmektedir ($C_{\text{yok_olma}} = C_{\text{soğ}} + C_{\text{saç}}$). DDA yönteminin hassasiyeti dipol olarak isimlendirilen uç hesaplama noktalarının sayısı ile oldukça alakalıdır. Dipol nokta sayısı (N) yüksek değerlerde olduğunda ve $|m|kd < 1$ kriteri sağlandığında DDA sonuçlarının doğru olduğu kabul edilir. Burada d kafes uzunluğu, m yansıtma indeksi, k ise dalga sayısıdır ($2\pi/\lambda$). Yöntem ile ilgili daha fazla ayrıntılı Türkçe bilgilere Kaynakça [31]'den ulaşılabılır. Gres içindeki bir tek ZnO mikroparçacığın ışınım soğurma ve saçılma etkenlikleri, $a_{\text{efektif}} = 2.5 \mu\text{m}$ efektif yarıçap için, $10 \times 10 \times 10$ ortalama açısız dağılım ve $N=170688$ dipol sayısı kullanılarak hesaplanmıştır. Parçacık şekli hegzagonal olduğu için üç adet şekil parametresi tanımlanır. Bunlar hegzagonal parçacığın uzunluğu a_1 ve alt kenar genişliği a_2 ve ışınım saçılma doğrultuları şeklinde olup, dalga boyu aralığı 2–20 μm için analizler yapılmıştır. DDA yöntemi ile hegzagonal ZnO nanoparçacıkların UV dalga boyundaki ışınım özelliklerinin incelendiği Al-Hilli ve Willander [32] tarafından yapılan çalışmada, hegzagonal şekilli parçacıkların farklı büyüklük oranlarındaki ışınım özellikleri arasında çok küçük farklar olduğu, esas önemli özelliğin efektif yarıçap olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle, ZnO parçacığının farklı geometrik özellikleri için analizler yapılmamıştır. Bir malzeme içinde (gömülü halde) olan metalik parçacıkların yansıtma indeksinin sanal kısmını tanımlayan k parametresinin, soğurma ve saçılma özelliklerini çok daha fazla etkilediği ve bu parametrenin bilinen değerlerinden çok daha büyük olması gerektiği Dombrovsky'nin [33] deneysel ve modelleme çalışması ile tespit edilmiştir. Bu çalışmaya dayanarak, DDA analizlerimizde ikinci yansıtma indeksi $m = 2 + 5.0i$ kullanılarak soğurma ve saçılma özelliklerinin değişimi incelenmiştir.

3. Sonuçlar ve Yorumlar

Görünür dalga boyu aralığındaki soğurma özelliği ölçümleri için, Gres 1 ve Gres 2'nin hekzan karışımı çözeltileri Şekil 2 (a)'da ve ölçüm sonuçları Şekil 2 (b)'de verilmektedir. Bu soğurma değerleri, dış ortamda çalışan ağır iş makinelerinde kullanılacak gresler için büyük önem taşımaktadır.

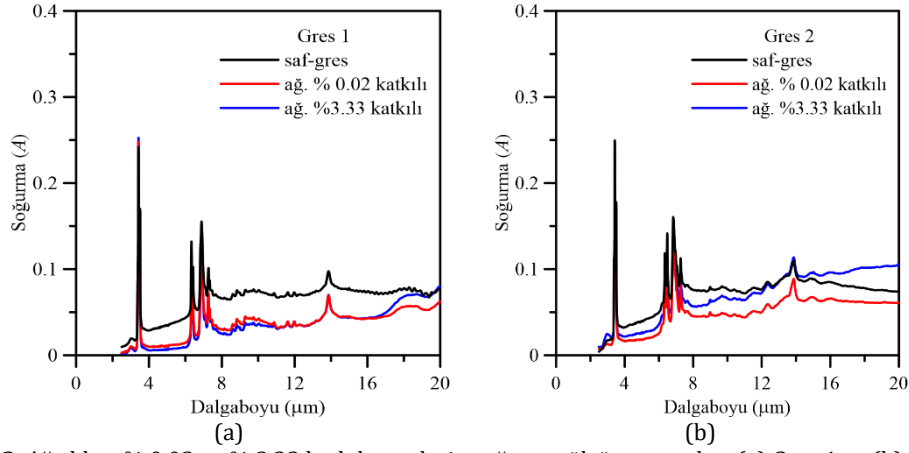


Şekil 2. (a) Gres numunelerinin çözelti halleri ve (b) Görünür dalga boyundaki soğurma değerleri

Katkısız greslerin tanımlanan dalga boyu aralığındaki soğurma ölçüm sonuçları incelendiğinde, soğurma değerlerinin 0.4 μm (400 nm) ve üzerindeki dalga boylarında, ~ 0.1 değerinde olduğu Şekil 2 (b)'den görülmektedir. Dalga boyu 0.3 μm (300 nm) civarında, Gres 1 ve Gres 2'nin maksimum soğurma değerlerinin sırasıyla ~ 0.8 ve ~ 1 olduğu tespit edilmiştir. Yani, 0.4 μm den büyük dalga boyu aralıklarındaki soğurma değerleri ile karşılaştırıldığında Gres 1'in yaklaşık 8 kat, Gres 2'nin yaklaşık 10 kat büyük soğurma özelliğine sahip olduğu görülür.

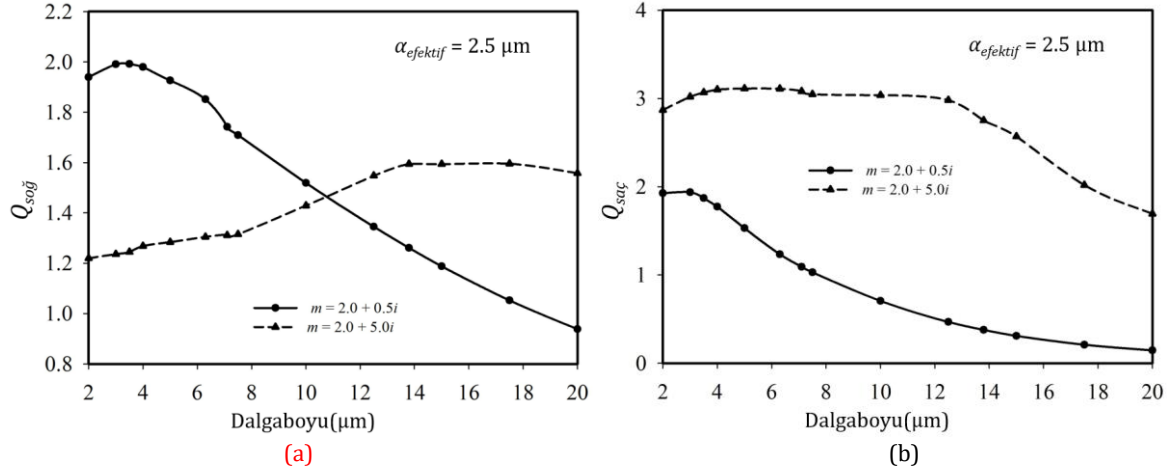
Ağırlıkça % 0.02 ve % 3.33 oranında ZnO mikroparçacıkları katılan greslerin 2.5–20 μm dalga boyundaki ölçülen soğurma özellikleri Şekil 3'de verilmektedir. Her iki gresin katkısız soğurma değerleri, katkılı durumlarına göre yüksek çıkmıştır. Sadece Gres 2'nin %3.33 katkılı durumu, dalgaboyu 14–20 μm aralığında iken, katkısız gresin değerlerinin üzerine çıktığı görülür. Gres 1'in ağırlıkça iki katkı durumlarının soğurma değerlerinin birbirine yakın

olduğu ve katkısız Gres 1'in değerlerinin çok altında olduğu Şekil 3 (a)'dan görülmektedir. Gres 2'nin soğurma değerleri Şekil 3 (b)'den incelendiğinde ise; %3.33 katkılı numunenin soğurma değerlerinin, %0.02 katkılı duruma göre biraz yüksek olduğu görülür. Her iki gresin incelenen bu dalgaboyu aralıklarındaki soğurma değerleri, 3.2 ve ~7 μm dalga boylarında elde edilen pik değerleri hariç, Şekil 2 (b) deki UV-görünür dalga boyu aralığındaki soğurma değerlerinden küçüktür.



Şekil 3. Ağırılıkça % 0.02 ve % 3.33 katkılı greslerin soğurma ölçüm sonuçları (a) Gres 1 ve (b) Gres 2

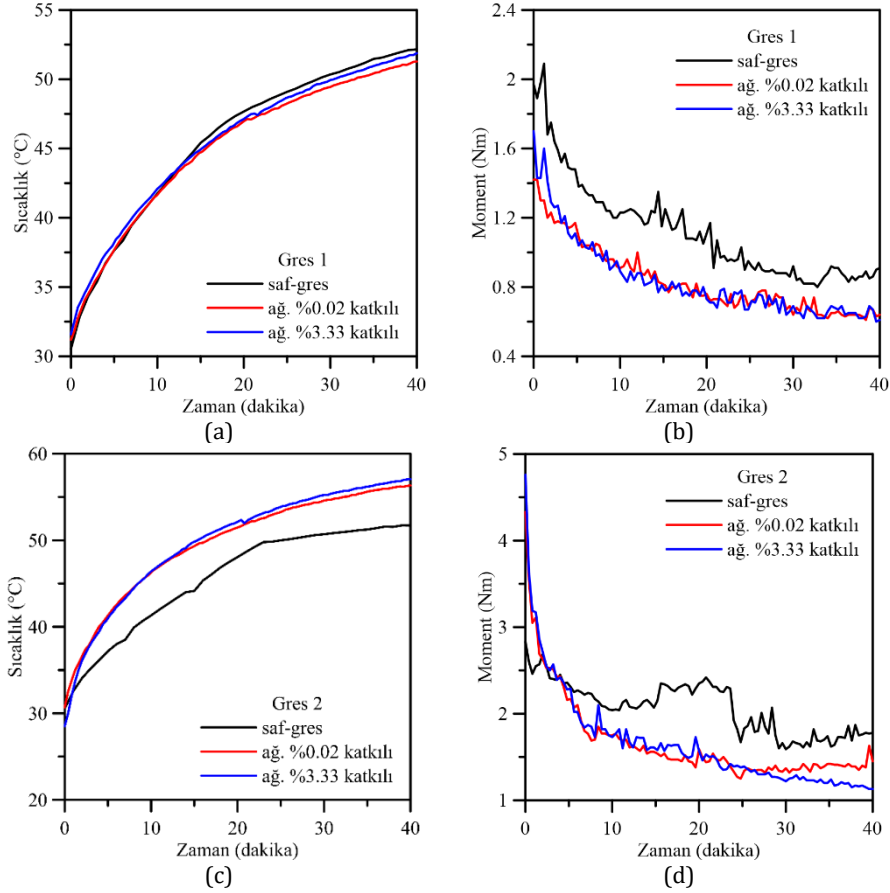
DDA ile gres içindeki bir tek ZnO parçacığın yakın-kızılötesi (2.5–20 μm) dalga boyu aralığında hesaplanan $Q_{soğ}$ ve $Q_{saç}$ değerleri, iki yansıtma indeksi için Şekil 4'de verilmektedir. Sanal indeksin büyük olduğu durumda ($k=5$) elde edilen $Q_{soğ}$ değerleri, deneysel ölçüm sonuçlarına benzer şekilde, dalga boyu ile artış göstermektedir. Deneysel sonuçlarda (Şekil 3 (a) ve (b) de) görülen, soğurma değerlerinin 7 ve 14 μm civarındaki pikleri, Şekil 4 (a)'daki değişim eğrisinde de hafifçe gözlenmektedir. Hesaplamalar tek parçacık için yapıldığından, $Q_{soğ}$ değerlerinde bu değişimler çok belirgin değildir. Deneysel soğurma sonuçlarında belirgin piklerin oluşması, karışımda daha fazla mikroparçacık bulunmasından kaynaklanmaktadır. Sanal indeksin küçük ($k=0.5$) değeri için hesaplanan $Q_{soğ}$, deneysel sonuçların aksine, dalga boyu arttıkça belirgin bir şekilde azalmaktadır.



Şekil 4. Gres içindeki tek ZnO parçacığın DDA ile hesaplanan (a) soğurma ve (b) saçılma etkenlikleri

Katkısız ve katkılı Gres 1 ve Gres 2'nin Şekil 1'de gösterilen test düzeneğinde yapılan sıcaklık ve moment ölçümleri Şekil 5'de verilmiştir. Şekil 5 (a) ve (c)'den, katkısız Gres 1'in sıcaklık değerleri ZnO+Gres 1'in sıcaklık değerlerine göre bir miktar yüksek olduğu gözlenmiştir. Katkısız Gres 2'nin sıcaklık değerleri ZnO+Gres 2'nin değerlerine göre küçüktür. Katkı maddesi olan ZnO mikroparçacıkların ısı iletkenliği (29 W/mK) [34], esas malzeme olan gresinkinden daha yüksek olduğundan; ZnO+gres karışımının, yatak içerisindeki sıcaklığı çevre yüzeylere hızlı transfer etmesi sözkonusudur [35]. Bu durum, makine aksamlarının çalışma ömrünü ve yataklardaki greslerin kullanım ömrünü olumlu etkileyeceği öngörülmektedir. Moment değişimlerini veren Şekil 5 (b) ve (d) incelendiğinde katkısız her iki gresin moment değerlerinin daha yüksek olduğu görülür. Bilindiği gibi artan moment ile uygulanan kuvvetin artması gerekmektedir. Katkılı Gres 1 ve Gres 2'nin momentleri ise daha küçüktür. Çalışma periyodunun ilk 10 dakikasındaki momentler yüksek iken, daha sonraki çalışma sürelerinde sıcaklıkların artması nedeniyle, uygulanan moment değerleri azalmaktadır. ZnO+Gres 1'in moment değerleri, ZnO+Gres 2'nin

değerlerinden daha azdır. ZnO+Gres 1'in moment değerleri, ilk çalışma periyodu hariç, 1 Nm değerinin altına inerken, ZnO+Gres 2'nin moment değerleri 2 Nm'nin altındadır. Yani, ZnO+Gres 2, yatak içinde daha zor hareket kabiliyetine sahip iken, ZnO+Gres 1 daha kolay hareket kabiliyetine sahiptir. Gres 1 ve Gres 2'nin sıcaklık ve momentlerindeki önemli farklılıkların, kendi yapısal özellikleri ve kalınlaştırıcı malzemelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Sıcaklık ölçümü deneylerindeki standart sapma değerleri, katkısız gresler için 5.40 olup, ZnO+Gres 1 için 5.25 ve ZnO+Gres 2 için 5.55 olarak bulunmuştur. Moment ölçümlerindeki standart sapma değerleri katkısız Gres 1 ve Gres 2 için 1.22 ve 1.78 iken, katkılı Gres 1 ve Gres 2 nin değerleri sırasıyla 1.35 ve 2.12 olarak tespit edilmiştir. Standart sapma değerlerinin yeteri kadar küçük olması, sonuçların güvenilirliğini teyit etmektedir.



Şekil 5. Katkısız ve katkılı Gres 1 ve Gres 2'nin test düzeneğindeki çalışma testlerine göre (a) ve (c) sıcaklık değişimleri, (b) ve (d) moment değişimleri

4. Sonuçlar

Dış ortamlarda çalışan ağır iş makinalarının (boldozer, greyder, ekskavatör gibi) hareketli aksamalarının yatak kısımlarında en yaygın kullanılan greslerden, lityum ve kauçuk kalınlaştırıcılı greslerin, ısıl özellikleri incelenmiştir. Hazırlanan bir test düzeneği yardımıyla, sıcaklık ve moment değişimi irdelenmiştir. 2.5–20 μm dalga boyu aralığındaki soğurma özellikleri, katkısız ve ZnO mikroparçacıkları katkılı numuneler için analiz edilmiştir. Her iki grese ağırlık oranı %0.02 ve %3.33 olan ZnO mikroparçacıkları homojen olarak eklenmiştir. Deneysel çalışmaların yanı sıra greslerin soğurma ve saçılma etkenlikleri, iki yansıtma indeksi ($m=2.0+0.5i$ ve $m=2.0+5.0i$) için Ayrık Dipol Yaklaşımı (DDA) kullanılarak belirlenmiştir. Deneysel ve nümerik çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Görünür dalga boyunda katkısız Gres 2'nin soğurma değerleri, Gres 1'in değerlerinden büyüktür. Her iki gres tipinin maksimum soğurma değeri 0.3 μm dalga boyunda gerçekleşmektedir.
- Kızılötesi dalga boyunda her iki gres tipi için katkısız greslerin soğurma değerleri katkılı numunelerin soğurma değerlerinden yüksektir.

- Sıcaklık ve moment dağılımları, metal mikroparçacıkların ağırlıkça katkı oranlarına ve greslerin çeşidine göre değişmektedir. ZnO katkılı Gres 1'in sıcaklık dağılımları, katkısız duruma göre daha düşüktür. Gres 2'nin sıcaklık dağılımlarında ise ZnO katkılı Gres 2'nin sıcaklıkları daha yüksektir.
- Kauçukla kalınlaştırılmış gres (Gres 2), lityumla kalınlaştırılmış gres (Gres 1) daha yüksek moment değerlerine sahiptir.
- Gres içindeki ZnO parçacığının $m=2.0+5.0i$ şeklindeki yansıtma indeksi kullanılarak yapılan ışınım özellikleri analizde, soğurma etkenlik değerleri, deneysel soğurma sonuçlarına benzer şekilde değişimler göstermiştir. Dalga boyu arttıkça, soğurma özelliği de artmıştır.
- Katkılı greslerin ısı transferi özelliklerinin, katkısız greslerin özelliklerine göre daha iyi olduğu tespit edilmiştir.

Kaynakça

- [1] Levinson R., Berdahl P., Akbari H. 2005. Solar spectral optical properties of pigments e part I: model for deriving scattering and absorption coefficients from transmittance and reflectance measurements. *Solar Energy Material Solar Cells*, 89, 319-349.
- [2] Xie G., Xiong J.Y., Liu H.T., Xu B.P., Zheng H.F., Yang Y.J. 2015. Experimental and numerical investigation on a novel solar still with vertical ripple surface. *Energy Conversion and Management*, 98, 151-160.
- [3] O. Behar O., Khellaf A., Mohammedi K. 2015. Comparison of solar radiation models and their validation under Algerian climate—the case of direct irradiance. *Energy Conversion and Management*, 98, 236-251.
- [4] Zhou Z., Cheng Q., Li P.P., Zhou H.C. 2014. Non-imaging concentrating reflectors designed for solar concentration systems. *Solar Energy*, 103, 494-501.
- [5] Cheng Q., Chai J. L., Zhou Z., Song J.L., Su Y. 2014. Tailored non-imaging secondary reflectors designed for solar concentration systems. *Solar Energy*, 110, 160-167.
- [6] Cheng Q., Chai J., Zhang Z. 2016. Investigation of double-layer coating pigmented with CuO particles of different concentrations on aesthetic and thermal aspects. *International Journal of Thermal Sciences*, 105, 36-44.
- [7] Çengel, Y. A. 2012. Isı ve Kütle Transferi Pratik Bir Yaklaşım, 3. Baskı, ss 878.
- [8] Howell J.R., Siegel R., Mengüç M.P. 2010. *Thermal Radiation Heat Transfer* fifth ed., CRC Press, Taylor & Francis Group New York.
- [9] Kaneta M., Ogata T., Takubo Y., Naka M. 2000. Effects of a thickener structure on grease elastohydrodynamic lubrication films. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 214 (4), 327-36.
- [10] Lugt, P.M. 2013. *Grease Lubrication in Rolling Bearings*. Wiley & Sons, New York, NY.
- [11] Sanchez M. C., Franco J., Valencia C., Gallegos C., Urquiola F., Urchegui R. 2011. Atomic Force Microscopy and Thermo- Rheological Characterisation of Lubricating Greases. *Tribology Letters*, 41(2), 463-470.
- [12] Prasad B. K., Rathod S., M. S. Yadav M. S., O. P. Modi O. P. 2010. Effects of Some Solid Lubricants Suspended in Oil Toward Controlling the Wear Performance of a Cast Iron. *ASME Journal of Tribology*, 132(4), 041602.
- [13] Nicoletti R. 2014. The Importance of the Heat Capacity of Lubricants with Nanoparticles in the Static Behavior of Journal Bearings. *ASME Journal of Tribology*, 044502-1.
- [14] Goyal D., Dang R. K., Dhama SS, Chauhan A. 2017. Effect of Nanoparticles based Lubricants on Static Thermal Behaviour of Journal Bearings: A Review. *Research Journal of Engineering and Technology*, 8(2).
- [15] Peña-Parás L., García-Pineda P., Maldonado-Cortés D., Garza G. T., Taha-Tijerina J., 2017. Temperature dependence of the extreme-pressure behavior of CuO and TiO₂ nanoparticle additives in metal-forming polymeric lubricants. *Industrial Lubrication and Tribology*, 69 (5), 730-737.
- [16] Hong H., Waynick A., Roy W. 2007. Heat transfer nanolubricant and nanogrease based on carbon nanotubes. *ECS Transactions*, 2 (12), 133-138.
- [17] Lee C.-G., Hwang Y.-J., Choi Y.-M., Lee J.-K., Choi C., Oh J.-M. 2009. A study on the tribological characteristics of graphite nano lubricants. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 10, 85-90.

- [18] Fikry RM, El-Adly RA, Ismail NA, El-Tabei AS., Al-Aidy H. 2013. Some azine and azole derivatives as antioxidant additives for lithium lubricating grease. *Egyptian Journal of Petroleum*, 22, 61–71.
- [19] Zhou Y., Bosman R., Lugt P.M. 2018. A model for Shear Degradation of Lithium Soap Grease at Ambient Temperature. *Tribology Transactions*, 61(1), 61-70.
- [20] Peña-Parás L., Taha-Tijerina J., García A., Maldonado D., Nájera A., Cantú P., Ortiz D. 2015. Thermal transport and tribological properties of nanogreases for metal-mechanic applications. *Wear*, 332, 1322-1326.
- [21] Peña-Parás, L., Gao, H., Cortés, D.M., Vellore, A., García-Pineda, P., Montemayor, O.E., Nava, K.L., Martini, A. 2018. Effects of substrate surface roughness and nano/micro particle additivesize on friction and wear in lubricated sliding. *Tribology International*, 119, 88–98.
- [22] Kandasamy, R., Muhaimin, I., Mohamad, R. 2013. Thermophoresis and Brownian motion effects on MHD boundary-layer flow of a nanofluid in the presence of thermal stratification due to solar radiation. *International Journal of Mechanical Sciences*, 70, 146-154.
- [23] Wang, N., Xu, G., Li, S., Zhang, X. 2017. Thermal properties and solar collection characteristics of oil-based nanofluids with low graphene concentration. *Energy Procedia*, 105, 194-199.
- [24] Ahlatli, S., Mare, T., Estelle, P., Doner, N. 2016. Thermal performance of carbon nanotube nanofluids in solar microchannel collectors: an experimental study. *International Journal of Technology*, 2, 78-85.
- [25] Doner, N., Pargan, A.R., Aygahoglu, A., Liu, F., Sen, F. 2019. Radiative properties of hematite particles in the UV-visible spectrum. *International Journal of Thermal Sciences*, 139, 79-87.
- [26] Demirpolat, A. B., Daş, M. 2020. CuO ve ZnO İçeren Nanoakışkanların Termofiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi ve Yapay Sinir Ağı İle Modellenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 11 (1), 225-238.
- [27] Yoshikawa, H., Adachi, S. 1997. Optical Constants of ZnO. *Japanese Journal of Applied Physics*, 36, 6237-6243.
- [28] Draine, B. T., Flatau, P. J. 1994. Discrete-Dipole Approximation For Scattering Calculations. *Journal of the Optical Society of America. Part A, Optics and Image Science*, 1491-1499.
- [29] Ayranci, I., Vaillon, R., Selçuk, N. 2007. Performance of discrete dipole approximation for prediction of amplitude and phase of electromagnetic scattering by particles. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 103, 83-101.
- [30] Draine, B.T., Flatau, P.J. (2014), User Guide to the Discrete Dipole Approximation Code DDSCAT 7.3. <http://arXiv:1305.6497>.
- [31] Döner, N. 2017. İs (siyah karbon) topaklanmalarında yapısal durumların ışınım özelliklerine etkileri. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, Cilt 22, Sayı 1, 125-137.
- [32] Al-Hilli, S.M., Willander, M. 2006. Optical properties of zinc oxide nano-particles embedded in dielectric medium for UV region: Numerical simulation. *Journal of Nanoparticle Research* 8, 79–97.
- [33] Dombrovsky, L. A. 2010. Radiative properties of metal particles in infrared and microwave spectral ranges. *Thermopedia*. Doi:10.1615/thermopedia.000148.
- [34] Kim, SH, Choi, SR, Kim, D. 2007. Thermal Conductivity of Metal-Oxide Nanofluids: Particle Size Dependence and Effect of Laser Irradiation. *J Heat Transfer* 129:298–307. Doi:10.1115/1.2427071.
- [35] Tawfik M.M. 2017. Experimental Studies of Nanofluid Thermal Conductivity Enhancement and Applications: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 75 1239-1253.

Ters Esnek Matrislerde Çoklu Karar Verme Metodu

Emin Aygün^{*1}, Rüveyda Ateş², Seda Erdiñç²

^{*1} Erciyes Üniversitesi Fen Fakültesi Matematik Bölümü, KAYSERİ

² Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Matematik Anabilim Dalı, KAYSERİ

(Alınış / Received: 14.01.2021, Kabul / Accepted: 21.08.2021, Online Yayınlanma / Published Online: 31.08.2021)

Anahtar Kelimeler

Esnek Kümeler,
Ters Esnek Kümeler,
Ters Esnek Matrisler,
Çoklu Karar Verme

Öz: Molodtsov tarafından ortaya atılan esnek küme teorisi, belirsizlikle başa çıkmak için etkili bir matematiksel araç olarak görülmektedir. Bu teori, bilgi sistemleri, karar verme problemleri, optimizasyon teorisi, cebirsel yapılar ve matematiksel analiz gibi belirsizlik içeren birçok alana uygulandı. Bu çalışmada ters esnek matrisler üzerinde ve, veya, ve-değil, veya-değil satır işlemleri olarak adlandırılan yeni işlemler tanımlanmıştır. Ayrıca α -ters kesişim, α -ters birleşim, üst α -ters kapsam ve alt α -ters kapsam işlemlerini ve seçim değerini tanımlanmıştır. Son olarak yeni bir ters esnek çoklu karar verme algoritması oluşturulmuştur.

Multiple Decision Making in Inverse Soft Matrices

Keywords

Soft Sets,
Inverse Soft Sets,
Inverse Soft Matrices,
Multiple Decision Making

Abstract: The soft set theory proposed by Molodtsov is seen as an effective mathematical tool for dealing with uncertainty. This theory has been applied to many areas involving uncertainty such as information systems, decision-making problems, optimization theory, algebraic structures, and mathematical analysis. In this study, new operations called and, or, and-not, or-not row operations on inverse soft matrices are defined. In addition, α -inverse intercept, α -inverse union, upper α -inverse scope and lower α -inverse scope operations and selection value are defined. Finally, a new inverse soft multiple decision making algorithm has been created.

*İlgili Yazar, email: eaygun@erciyes.edu.tr

1. Giriş

Gündelik hayatta karşılaşılan belirsizlikleri tarif etmek ve bu belirsizliklerin üstesinden gelmek için bulanık küme, kaba küme, belirsiz küme, aralık matematiği gibi birçok matematiksel yapı geliştirildi. Son yıllarda, belirsizlik içeren yapılarda bir çözüm elde etmek veya çözümün elde edilemediği durumlarda çözümü basite indirmek için Rus matematikçi Molodtsov [1] tarafından esnek küme teorisi önerildi. Bu küme yapısında nesnelerin belirlenmesinde herhangi bir şartın bulunmaması bu kümelerin kısa sürede birçok araştırmacının ilgisini çekmesini sağladı. Ayrıca oyun teorisi, karar verme, bilgi sistemleri ve olasılık gibi matematiksel yapıların kullanıldığı çeşitli alanlarda uygulanmasına olanak sundu. Esnek küme teorisinde nesnelerin tanımlanması için herhangi bir sınırlandırma yoktur. Dolayısıyla araştırmacılar parametreleri ihtiyaç duydukları formda seçebilirler. Bu ise karar vermeyi oldukça kolaylaştırır.

Esnek küme teorisi üzerine çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir. Maji ve ark. [2] esnek kümelerin ikili tablo gösterimini verdi ve daha sonra Çağman ve Enginoğlu [4-7] bu yapıyı geliştirerek esnek matrisleri tanımladı. Ayrıca onlar aynı boyuttaki esnek matrislerin bazı işlemlerini sundu ve bu işlemleri kullanarak bir esnek karar verme metodu oluşturdu. Esnek matrislerde toplama ve çıkarma işlemleri türetildi. Atagün ve ark. [8] farklı boyuttaki esnek matrisler için bazı esnek çarpımları genelleştirdi ve bu çarpımlar yardımıyla yeni bir karar metodu önerdi. Esnek küme ve esnek matris teorileri birçok karar verme problemine başarıyla uygulanmıştır.

Esnek küme çalışmalarının yanı sıra Çetkin ve ark. [9] ortak evrensel küme üzerinde ters esnek küme tanımladı. Kamacı ve ark. [10] ise ters esnek matrisler üzerinde yeni sütun işlemleri tanımlayarak ters esnek kümeler üzerinde multi-kriterli grup karar verme metodu geliştirdi.

Bu çalışmada Atagün ve Kamacı'nın [6] çalışmasındaki α -kümeler yardımıyla verilen probleme uygun olarak ters esnek kümeler üzerindeki sınırlandırma tanımları üzerinde çalışılmıştır. Ayrıca ters esnek kümeler için türetilen

bazı işlemler yardımıyla elde edilen ters esnek karar verme sistemi oluşturulması amaçlanmıştır. Bu sayede, elde edilen yeni yöntemle literatüre katkı sağlanması amaçlanmıştır. Aynı zamanda çalışmada çözülecek karar verme yöntemi finans, sağlık, çevre, şehircilik, üretim vb. alanlara uyarlanabilir olduğundan ülkemiz menfaatlerine katkı sağlayacaktır.

2. ESNEK KÜMELER

Bu bölümde temel bilgi niteliğinde olan ve çalışmanın diğer bölümlerinde sıkça kullanılan esnek küme, esnek matris, ters esnek küme ve ters esnek matris kavramları verilecektir. Ayrıca bu kavramların bazı işlemleri ve özellikleri incelenecektir.

2.1. Esnek Küme

Esnek küme kavramı ilk kez 1999 yılında Molodtsov tarafından tanımlanmıştır. Molodtsov [1], tanım kümesi parametreler ve değer kümesi seçeneklerin kuvvet kümesi olan bir fonksiyon ile oluşturduğu bu küme yapısının belirsizlik içeren birçok alana katkı sağlayacağını ileri sürmüştür.

U başlangıç evrensel kümesi, E parametrelerin kümesi, $P(U)$ ise U başlangıç evrensel kümesinin kuvvet kümesi ve $A \subseteq E$ olsun.

Tanım 2.1.1. ([1]) U evrensel kümesi üzerinde bir $F_A = (F, A)$ esnek kümesi, $F: E \rightarrow P(U)$, $e \notin X \Rightarrow F(e) = \emptyset$ olmak üzere; $F_A = \{(e, F(e)): e \in E, F(e) \in P(U)\}$ sıralı ikililerin kümesidir. Burada F fonksiyonu F_A esnek kümesinin yaklaşım fonksiyonu olarak adlandırılır. U üzerinde tüm esnek kümelerin kümesi $S(U)$ ile temsil edilir.

Örnek 2.1.2. $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}$ evrensel alternatiflerin kümesi, $E = \{e_1, e_2, e_3, e_4\}$ parametrelerin kümesi ve $A = \{e_2, e_4\} \subseteq E$ olsun. $(F, A) = \{(e_2, \{u_2, u_3, u_5\}), (e_4, \{u_1, u_4, u_5\})\}$ ikilisi U üzerinde bir esnek küme ifade eder.

Tanım 2.1.3. ([2]) $F_A = (F, A) \in S(U)$ olsun. Eğer $\forall e \in E$ için $F(e) = \emptyset$ ise F_A esnek kümesine *relatif boş* (relative null) esnek küme denir ve Φ_A ile gösterilir. Eğer $E = A$ ise esnek kümesine *boş (null) esnek küme* denir ve Φ ile gösterilir.

Tanım 2.1.4. ([2]) $F_A = (F, A) \in S(U)$ olsun. Eğer $\forall e \in E$ için $F(e) = U$ ise F_A esnek kümesine *relatif tam* (relative whole) esnek küme denir ve Π_A şeklinde gösterilir. Eğer $E = A$ ise F_A esnek kümesine *mutlak (absolute) esnek küme* denir ve Π ile gösterilir.

Örnek 2.1.5. $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}$ bir evrensel küme ve $E = \{e_1, e_2, e_3, e_4\}$ tüm parametrelerin kümesi olsun.

Eğer $A = \{e_1, e_3\}$ ve $F(e_1) = \emptyset$, $F(e_3) = \emptyset$ ise bu takdirde F_A esnek kümesi bir *relatif boş esnek kümedir*, yani $F_A = \Phi_A$ şeklinde temsil edilir.

Eğer $B = E$ ve $i = 1, 2, 3, 4$ için $F(e_i) = \emptyset$ ise bu takdirde F_B esnek kümesi bir *boş esnek kümedir*, yani $F_B = \Phi$ şeklinde temsil edilir.

Eğer $C = \{e_1, e_2\}$ ve $F(e_1) = U$, $F(e_2) = U$ ise bu takdirde F_C esnek kümesi bir *relatif tam esnek kümedir*, yani $F_C = \Pi_C$ şeklinde temsil edilir.

Eğer $D = E$ ve $i = 1, 2, 3, 4$ için $F(e) = U$ ise bu takdirde F_D esnek kümesi bir *mutlak esnek kümedir*, yani $F_D = \Pi$ şeklinde temsil edilir.

Tanım 2.1.6. ([2]) $F_A, G_B \in S(U)$ olsun.

a) Eğer $(F, A) = (\emptyset, \emptyset)$ veya $A \subseteq B$ ve $\forall e \in A$ için $F(e) \subseteq G(e)$ ise F_A esnek kümesine G_B esnek kümesinin *esnek alt kümesi* denir ve $F_A \subseteq G_B$ ile gösterilir.

b) Eğer $F_A \subseteq G_B$ ve $G_B \subseteq F_A$ ise bu esnek kümelere eşit esnek küme denir ve $F_A = G_B$ ile gösterilir.

2.2. Esnek Küme İşlemleri

Klasik küme teorisindeki birçok işlem esnek küme teorisine aktarılmıştır. Fakat bu esnek işlemlerin klasik küme işlemlerinden farklı özellikleri mevcuttur. Bu bölümde çeşitli esnek küme işlemleri hatırlatılacaktır.

Tanım 2.2.1. ([3]) $F_A \in S(U)$ olsun. F_A esnek kümesinin *tümleyeni (komplement)* $(F, A)^c = (F^c, A)$ şeklinde tanımlanır, $F^c: A \rightarrow P(U)$ burada öyle ki $\forall \varrho \in A$ için $F^c(\varrho) = U \setminus F(\varrho)$ şeklinde temsil edilir.

Tanım 2.2.2. ([4]) $F_A, G_B \in S(U)$ olsun. $F_A \tilde{\cup} G_B = H_E$ tarafından tanımlanan esnek kümeye F_A ve G_B nin *esnek birleşimi* denir ve $\forall \varrho \in E$ için $H(\varrho) = F(\varrho) \cup G(\varrho)$ şeklinde temsil edilir.

Tanım 2.2.3. ([4]) $F_A, G_B \in S(U)$ olsun. $F_A \tilde{\cap} G_B = H_E$ tarafından tanımlanan esnek kümeye F_A ve G_B nin *esnek kesişimi* denir ve $\forall \varrho \in E$ için $H(\varrho) = F(\varrho) \cap G(\varrho)$ şeklinde temsil edilir.

Tanım 2.2.4. ([5]) $F_A, G_B \in S(U)$ olsun. $F_A \wedge G_B = H_{A \times B}$ tarafından tanımlanan esnek kümeye F_A ve G_B nin *esnek ve işlemi* denir. Burada $(\forall (x, y) \in A \times B)$ için $H(x, y) = F(x) \cap G(y)$ şeklinde ifade edilir.

Tanım 2.2.5. ([5]) $F_A, G_B \in S(U)$ olsun. $F_A \vee G_B = H_{A \times B}$ tarafından tanımlanan esnek kümeye F_A ve G_B nin *esnek veya işlemi* denir. Burada $(\forall (x, y) \in A \times B)$ için $H(x, y) = F(x) \cup G(y)$ şeklinde ifade edilir.

Örnek 2.2.6. $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}$ bir evrensel küme ve $E = \{e_1, e_2, e_3, e_4\}$ tüm parametrelerin kümesi olsun. $A = \{e_2, e_4\}, B = \{e_1, e_3, e_4\} \subseteq E$ parametre kümeleri için;

$$F_A = \{(e_2, \{u_2, u_3, u_5\}), (e_4, \{u_1, u_4, u_5\})\}$$

$$F_B = \{(e_1, \{u_1, u_3, u_4, u_5\}), (e_3, \{u_3, u_5\}), (e_4, \{u_5\})\} U \text{ üzerinde tanımlı esnek küme olsunlar.}$$

$$(F, A)^c = (F^c, A) = \{(e_2, \{u_1, u_4, \}), (e_4, \{u_2, u_3, \})\}$$

$$(F, B)^c = (F^c, B) = \{(e_1, \{u_2\}), (e_3, \{u_1, u_2, u_4\}), (e_4, \{u_1, u_2, u_3, u_4\})\} \text{ tanımlı esnek kümelerinin tümleyenleridir.}$$

$$F_A \tilde{\cup} F_B = F_C = \{(e_1, \{u_1, u_3, u_4, u_5\}), (e_2, \{u_2, u_3, u_5\}), (e_3, \{u_3, u_5\}), (e_4, \{u_1, u_4, u_5\})\}$$

$$F_A \tilde{\cap} F_B = F_C = \{(e_4, \{u_5\})\}$$

$$F_A \wedge F_B = H_{A \times B} =$$

$$\left\{ \left((e_2, e_1), \{u_3, u_4\} \right), \left((e_2, e_3), \{u_3, u_5\} \right), \left((e_2, e_4), \{u_5\} \right), \left((e_4, e_1), \{u_1, u_4, u_5\} \right), \left((e_4, e_3), \{u_5\} \right), \left((e_4, e_4), \{u_5\} \right) \right\}$$

$$F_A \vee F_B = H_{A \times B}$$

$$= \left\{ \left((e_2, e_1), U \right), \left((e_2, e_3), \{u_2, u_3, u_5\} \right), \left((e_2, e_4), \{u_2, u_3, u_5\} \right), \left((e_4, e_1), U \right), \left((e_4, e_3), \{u_1, u_3, u_4, u_5\} \right), \left((e_4, e_4), \{u_1, u_4, u_5\} \right) \right\}$$

Tanım 2.2.7. ([6]) $F_A \in S(U)$ ve $\alpha \subseteq U$ olsun.

a) (F, A) 'nın alt α - kapsamı; $(F, A)^{\supseteq \alpha} = \{x \in A: f_A(x) \supseteq \alpha\}$

b) (F, A) 'nın üst α - kapsamı; $(F, A)^{\subseteq \alpha} = \{x \in A: f_A(x) \subseteq \alpha\}$ şeklinde tanımlanır.

Tanım 2.2.8. ([6]) $F_A \in S(U)$ ve $\emptyset \neq \alpha \subseteq U$ olsun.

a) (F, A) 'nın α -kesişimi; $(F, A)^{\cap \alpha} = \{x \in A: f_A(x) \cap \alpha \neq \emptyset\}$

a) (F, A) 'nın α -birleşimi; $(F, A)^{\cup \alpha} = \{x \in A: f_A(x) \cup \alpha = U\}$ şeklinde tanımlanır.

Örnek 2.2.9. $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}$ bir evrensel küme ve $E = \{e_1, e_2, e_3, e_4\}$ tüm parametrelerin kümesi olsun. $A = \{e_2, e_4\}$, parametre kümesi için;

$$F_A = \{(e_2, \{u_2, u_3, u_5\}), (e_4, \{u_1, u_4, u_5\})\}$$

$$\alpha = \{u_2, u_3, u_5\} \subseteq U \text{ ve } \beta = \{u_2, u_3, u_4\} \subseteq U \text{ için;}$$

$$(F, A)^{\supseteq \alpha} = \{e_2\}, (F, A)^{\subseteq \alpha} = \{e_2\}, (F, A)^{\cap \beta} = \{e_2, e_4\}, (F, A)^{\cup \beta} = \{e_4\} \text{ eşitleri elde edilir.}$$

2.3. ESNEK MATRİS

Esnek matrisler, esnek kümeleri ifade etmenin farklı yöntemlerinden birisidir. Özellikle karmaşık yapıları anlamlandırmak için çok kullanışlı bir metottür. Bu bölümde esnek matrisler ve bu matrislerin bazı işlemleri verilecektir.

Tanım 2.3.1 ([7]) $F_A = (F, A) \in S(U)$ olsun. Bu durumda

$$R_A = \{(h_i, e_j) : e_j \in A, h_i \in F(e_j)\} \subseteq U \times E$$

kümesine $F_A = (F, A)$ esnek kümesinin bağıntı formu denir. R_A bağıntı formunun karakteristik fonksiyonu

$$\chi_{R_A} : U \times E \rightarrow \{0,1\}, \chi_{R_A}(h_i, e_j) = \begin{cases} 1, & (h_i, e_j) \in R_A \\ 0, & (h_i, e_j) \notin R_A \end{cases}$$

şeklinde tanımlanır. $U = \{h_1, h_2, \dots, h_m\}$ bir evrensel küme (seçeneklerin kümesi), $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ parametrelerin kümesi ve $A \subseteq E$ olmak üzere R_A aşağıdaki tablo ile ifade edilebilir:

R_A	e_1	e_2	...	e_n
h_1	$\chi_{R_A}(h_1, e_1)$	$\chi_{R_A}(h_1, e_2)$...	$\chi_{R_A}(h_1, e_n)$
h_2	$\chi_{R_A}(h_2, e_1)$	$\chi_{R_A}(h_2, e_2)$...	$\chi_{R_A}(h_2, e_n)$
\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots
h_m	$\chi_{R_A}(h_m, e_1)$	$\chi_{R_A}(h_m, e_2)$...	$\chi_{R_A}(h_m, e_n)$

Bu durumda, $a_{ij} = \chi_{R_A}(h_i, e_j)$ alınarak tanımlanan

$$[a_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

matrisine $F_A = (F, A)$ esnek kümesinin U üzerinde $m \times n$ esnek matrisi denir. Bu tanımla, bir esnek küme bir esnek matrise ve bir esnek matris de bir esnek kümeye dönüştürülebilir. U üzerindeki tüm $m \times n$ esnek matrislerinin kümesi $SM_{m \times n}$ ile gösterilecektir.

Tanım 2.3.2. ([7]) $[a_{ij}] \in SM_{m \times n}$ olsun.

- $\forall i, j$ için $a_{ij} = 0$ ise $[a_{ij}]$ esnek matrisine *sıfır esnek matrisi* denir ve $[0]$ ile gösterilir.
- $\forall i, j$ için $a_{ij} = 1$ ise $[a_{ij}]$ esnek matrisine *evrensel esnek matrisi* denir ve $[1]$ ile gösterilir
- $\forall i$ için ve $j \in I_A = \{j : e_j \in A\}$ için $a_{ij} = 1$ ise $[a_{ij}]$ esnek matrisine *A-evrensel esnek matrisi* denir ve $[1_A]$ ile gösterilir.

Tanım 2.3.3. ([7]) $[a_{ij}], [b_{ij}] \in SM_{m \times n}$ olsun.

$\forall i, j$ için $a_{ij} \leq b_{ij}$ ise $[a_{ij}]$ ye $[b_{ij}]$ nin *esnek alt matrisi* denir ve $[a_{ij}] \subseteq [b_{ij}]$ şeklinde gösterilir.

2.4. ESNEK MATRİS İŞLEMLERİ

Tanım 2.4.1. ([7]) $[a_{ij}], [b_{ij}] \in SM_{m \times n}$ olsun. Bu durumda $[c_{ij}]$ esnek matrisine $\forall i, j$ için $c_{ij} = \max\{a_{ij}, b_{ij}\}$ ise $[c_{ij}] \in SM_{m \times n}$ matrisine $[a_{ij}]$ ve $[b_{ij}]$ matrislerinin *esnek birleşimi* denir ve $[a_{ij}] \cup [b_{ij}]$ ile gösterilir.

Tanım 2.4.2. ([7]) $[a_{ij}], [b_{ij}] \in SM_{m \times n}$ olsun. Bu durumda $[c_{ij}]$ esnek matrisine $\forall i, j$ için $c_{ij} = \min\{a_{ij}, b_{ij}\}$ ise $[c_{ij}] \in SM_{m \times n}$ matrisine $[a_{ij}]$ ve $[b_{ij}]$ matrislerinin *esnek kesişimi* denir ve $[a_{ij}] \cap [b_{ij}]$ ile gösterilir.

Tanım 2.4.3. ([4]) $[a_{ij}] \in SM_{m \times n}$ olsun. $\forall i, j$ için $c_{ij} = 1 - a_{ij}$ ise bu durumda $[c_{ij}]$ esnek matrisi $[a_{ij}]$ esnek matrisinin *tümleyeni (komplement)* olarak isimlendirilir ve $[c_{ij}] = [a_{ij}]^c$ şeklinde gösterilir.

Örnek 2.4.4. $U = \{h_1, h_2, h_3\}$ bir evrensel küme ve $E = \{e_1, e_2, e_3, e_4\}$ parametrelerin kümesi olmak üzere $A = \{e_1, e_2\}$ ve $B = \{e_1, e_2, e_4\}$ alalım. Bu cümleler göre oluşturulan F_A ve F_B esnek kümelerinin esnek matrisleri sırasıyla

$$[a_{ij}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ ve } [b_{ij}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

olsun. Bu durumda

$$[a_{ij}] \tilde{\cup} [b_{ij}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, [a_{ij}] \tilde{\cap} [b_{ij}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ ve ayrıca}$$

$$[a_{ij}]^c = 1 - [a_{ij}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}, [b_{ij}]^c = 1 - [b_{ij}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \text{ şeklinde elde edilir.}$$

Tanım 2.4.5. ([8]) $[a_{ij}], [b_{ik}] \in SM_{m \times n}$ iki esnek matris olsun. Bu durumda,

$$[a_{ij}] \text{ ve } [b_{ik}] \text{ esnek matrislerinin } \textit{ve-çarpımı} \wedge : SM_{m \times n} \times SM_{m \times n} \rightarrow SM_{m \times n^2}, [a_{ij}] \wedge [b_{ik}] = [c_{ip}]$$

şeklinde tanımlanır, burada $c_{ip} = \min\{a_{ij}, b_{ik}\} \ni p = n(j-1) + k$ dır.

Tanım 2.4.6. ([8]) $[a_{ij}], [b_{ik}] \in SM_{m \times n}$ iki esnek matris olsun. Bu durumda

$$[a_{ij}] \text{ ve } [b_{ik}] \text{ esnek matrislerinin } \textit{veya-çarpımı} \vee : SM_{m \times n} \times SM_{m \times n} \rightarrow SM_{m \times n^2}, [a_{ij}] \vee [b_{ik}] = [c_{ip}]$$

şeklinde tanımlanır, burada $c_{ip} = \max\{a_{ij}, b_{ik}\} \ni p = n(j-1) + k$ dır.

Tanım 2.4.7. ([8]) $[a_{ij}], [b_{ik}] \in SM_{m \times n}$ iki esnek matris olsun. Bu durumda

$$[a_{ij}] \text{ ve } [b_{ik}] \text{ esnek matrislerinin } \textit{ve-değil çarpımı} \bar{\wedge} : SM_{m \times n} \times SM_{m \times n} \rightarrow SM_{m \times n^2}, [a_{ij}] \bar{\wedge} [b_{ik}] = [c_{ip}]$$

şeklinde tanımlanır, burada $c_{ip} = \min\{a_{ij}, 1 - b_{ik}\} \ni p = n(j-1) + k$ dır.

Tanım 2.4.8. ([8]) $[a_{ij}], [b_{ik}] \in SM_{m \times n}$ iki esnek matris olsun. Bu durumda

$$[a_{ij}] \text{ ve } [b_{ik}] \text{ esnek matrislerinin } \textit{veya- değil çarpımı} \bar{\vee} : SM_{m \times n} \times SM_{m \times n} \rightarrow SM_{m \times n^2}, [a_{ij}] \bar{\vee} [b_{ik}] = [c_{ip}]$$

şeklinde tanımlanır, burada $c_{ip} = \max\{a_{ij}, 1 - b_{ik}\} \ni p = n(j-1) + k$ dır.

$$\textbf{Örnek 2.4.9.} [a_{ij}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \text{ ve } [b_{ik}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ olsun. Bu durumda}$$

$$[c_{ip}] = [a_{ij}] \wedge [b_{ik}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[c_{ip}] = [a_{ij}] \vee [b_{ik}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[c_{ip}] = [a_{ij}] \bar{\wedge} [b_{ik}] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[c_{ip}] = [a_{ij}] \bar{\vee} [b_{ik}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Tanım 2.4.10. ([6]) $[a_{ij}] \in SM_{m \times n}$ ve $\alpha = \{u_i : i \in I\} \subseteq U$, $I \subseteq \{1, 2, \dots, m\}$ olsun.

$$a) [a_{ij}]^\alpha = \prod_{j=1}^n \begin{cases} |a_{ij}|_j, & \forall i \in a_{ij} \\ |0|_j, & \text{diğer durumlar} \end{cases}$$

$[a_{ij}]^\alpha$, $[a_{ij}]$ nin α -üst esnek matrisi olarak tanımlanır.

$$b) [a_{ij}]_\alpha = \prod_{j=1}^n \begin{cases} |0|_j, & \exists i \in \{1,2, \dots, m\} \setminus I, a_{ij} = 1 \\ |a_{ij}|_j, & \text{diğer durum} \end{cases}$$

$[a_{ij}]_\alpha$, $[a_{ij}]$ nin α -alt esnek matrisi olarak tanımlanır.

Burada açıkça görüldüğü üzere $[a_{ij}]^\alpha$ ve $[a_{ij}]_\alpha$ esnek matrisler $m \times n$ tipindedir.

Tanım 2.4.11. ([6]) $[a_{ij}] \in SM_{m \times n}$ ve $\alpha = \{u_i: i \in I\} \subseteq U$, $I \subseteq \{1,2, \dots, m\}$ olsun.

$$a) [a_{ij}]^{\cap \alpha} = \prod_{j=1}^n \begin{cases} |a_{ij}|_j, & \exists i \in I, a_{ij} = 1 \\ |0|_j, & \text{diğer durumlar} \end{cases}$$

$[a_{ij}]^{\cap \alpha}$, $[a_{ij}]$ 'nin α -kesişim esnek matrisi olarak tanımlanır.

$$b) [a_{ij}]^{\cup \alpha} = \prod_{j=1}^n \begin{cases} |a_{ij}|_j, & \forall i \in \{1,2, \dots, m\} \setminus I, a_{ij} = 1 \\ |0|_j, & \text{diğer durumlar} \end{cases}$$

$[a_{ij}]^{\cup \alpha}$, $[a_{ij}]$ 'nin α -birleşim esnek matrisi olarak tanımlanır.

Burada açıkça görüldüğü üzere $[a_{ij}]^{\cap \alpha}$ ve $[a_{ij}]^{\cup \alpha}$ esnek matrisleri $m \times n$ tipindedir.

3. TERS ESNEK KÜME VE MATRİS

Tanım 3.1.1. ([9]) U alternatif nesnelere kümesi ve E_t parametrelerin kümesi olsun. E_t 'nin kuvvet kümesi $P(E_t)$ ile tanımlansın. $\bar{F}_{E_t}^U = \{(u_j, \bar{f}(u_j)): u_j \in U, \bar{f}(u_j) \in P(E_t)\}$ sıralı ikilisine U 'nun ters esnek kümesi denir. $\bar{f}: U \rightarrow P(E_t)$ eşleyen bir değer kümesidir.

Örnek 3.1.2. $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4\}$ nesnelere kümesi olsun. $E = \{e_1, e_2, e_3\}$ parametrelerin kümesi olsun.

$$\bar{F}_{E_t}^U = \{(u_1, \{e_1, e_2\}), (u_2, \{e_2, e_3\}), (u_3, E), (u_4, \emptyset)\}$$
 U üzerindeki ters esnek kümeyi ifade eder.

Tanım 3.1.3. ([9]) $U = \{h_1, h_2, \dots, h_n\}$ alternatif nesnelere kümesi ve $E_t = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ parametrelerin kümesi ve $A \subseteq E_t$ olsun. E_t 'nin kuvvet kümesi $P(E_t)$ ile tanımlansın.

$$[\bar{a}_{ij}] = \begin{cases} 1, & e_i \in \bar{f}(u_j) \\ 0, & e_i \notin \bar{f}(u_j) \end{cases} \text{ olmak üzere } [\bar{a}_{ij}]_{m \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \text{ matrisine}$$

$\bar{F}_A = (\bar{F}, A)$ esnek kümesinin U üzerinde $m \times n$ ters esnek matris denir.

Bu tanımla, bir ters esnek küme bir ters esnek matrise ve bir ters esnek matris de bir ters esnek küme ye dönüştürülebilir. U üzerinde tüm $m \times n$ ters esnek matrislerinin kümesi $ISM_{m \times n}$ ile gösterilecektir.

Örnek 3.1.4. $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4\}$ nesnelere kümesi olsun. $E_t = \{e_1, e_2, e_3\}$ parametrelerin kümesi olsun.

$\bar{F}_{E_t}^U = \{(u_1, \{e_1, e_2\}), (u_2, \{e_2, e_3\}), (u_3, E), (u_4, \emptyset)\}$ U üzerinde ki ters esnek kümeyi ifade eder. Ters esnek kümesinin $[\bar{a}_{ij}]$ ters esnek matrisi

$$[\bar{a}_{ij}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \text{ şeklinde ifade edilir.}$$

Tanım 3.1.5. ([10]) $[\bar{a}_{ij}] \in ISM_{m \times n}$ olsun. $\forall i, j$ için $\bar{c}_{ij} = 1 - \bar{a}_{ij}$ ise bu durumda $[\bar{c}_{ij}]$ ters esnek matrisi $[\bar{a}_{ij}]$ ters esnek matrisinin tümleyeni (komplement) olarak isimlendirilir ve $[\bar{a}_{ij}]^c$ şeklinde temsil edilir.

Tanım 3.1.6. $(\bar{F}, U) \in IS(U)$ ve $\emptyset \neq \bar{\alpha} \subseteq E_t$ olsun.

a) \bar{F} nin U da $\bar{\alpha}$ -ters kesişim kümesi

$(\bar{F}, U)^{\cap \bar{\alpha}} = \{u \in U: \bar{F}(x) \cap \bar{\alpha} \neq \emptyset\}$ şeklinde tanımlanır.

b) \bar{F} nin U da $\bar{\alpha}$ -ters birleşim kümesi

$(\bar{F}, U)^{\cup \bar{\alpha}} = \{u \in U: \bar{F}(x) \cup \bar{\alpha} = E\}$ şeklinde tanımlanır.

Tanım 3.1.7. $(\bar{F}, U) \in IS(U)$ ve $\bar{\alpha} \subseteq E$ olsun.

a) \bar{F} nin U da üst $\bar{\alpha}$ -ters kapsam kümesi

$(\bar{F}, U)^{\subseteq \bar{\alpha}} = \{u \in U: \bar{F}(x) \subseteq \bar{\alpha}\}$ şeklinde tanımlanır.

b) \bar{F} nin U da alt $\bar{\alpha}$ -ters kapsam kümesi

$(\bar{F}, U)^{\supseteq \bar{\alpha}} = \{u \in U: \bar{F}(x) \supseteq \bar{\alpha}\}$ şeklinde tanımlanır.

Tanım 3.1.8. $[\bar{a}_{ij}] \in ISM_{m \times n}$ ve $\bar{\alpha} = \{e_i: i \in I\} \subseteq E$, $I \subseteq \{1, 2, \dots, m\}$ olsun.

$$[\bar{a}_{ij}]^{\cap \bar{\alpha}} = \prod_{j=1}^n \begin{cases} |\bar{a}_{ij}|_j & , \quad \exists i \in I, \bar{a}_{ij} = 1 \\ |\bar{0}|_j & , \quad \text{diğer durumlar} \end{cases}$$

$[\bar{a}_{ij}]^{\cap \bar{\alpha}}$, $[\bar{a}_{ij}]$ 'nin $\bar{\alpha}$ -ters kesişim esnek matrisi olarak tanımlanır.

Tanım 3.1.9. \bar{F}_A, \bar{F}_B ters esnek kümeler ve bu kümelere karşılık gelen ters esnek matrisler sırasıyla $[\bar{a}_{ip}]$ ve $[\bar{b}_{jp}]$ olsun.

a) $[\bar{a}_{ip}]$ ve $[\bar{b}_{jp}]$ ters esnek matrislerinin *Ve-satır çarpımı* $\lambda_{\bar{F}}$;

$$\lambda_{\bar{F}} : ISM_{m_1 \times n} \times ISM_{m_2 \times n} \rightarrow ISM_{m_1 m_2 \times n}, [\bar{a}_{ip}] \lambda_{\bar{F}} [\bar{b}_{jp}] = [\bar{c}_{vp}]$$

şeklinde tanımlanır, burada $\bar{c}_{vp} = \min\{\bar{a}_{ip}, \bar{b}_{jp}\}$ öyle ki $i = \beta, v = (\beta - 1)m_2 + j$ şartını sağlayan en küçük pozitif tam sayı olmak üzere $v \leq \beta m_2$ dir.

b) $[\bar{a}_{ip}]$ ve $[\bar{b}_{jp}]$ ters esnek matrislerinin *Veya-satır çarpımı* $\vee_{\bar{F}}$;

$$\vee_{\bar{F}} : ISM_{m_1 \times n} \times ISM_{m_2 \times n} \rightarrow ISM_{m_1 m_2 \times n}, [\bar{a}_{ip}] \vee_{\bar{F}} [\bar{b}_{jp}] = [\bar{c}_{vp}]$$

şeklinde tanımlanır, burada $\bar{c}_{vp} = \max\{\bar{a}_{ip}, \bar{b}_{jp}\}$ öyle ki $i = \beta, v = (\beta - 1)m_2 + j$ şartını sağlayan en küçük pozitif tam sayı olmak üzere $v \leq \beta m_2$ dir.

c) $[\bar{a}_{ip}]$ ve $[\bar{b}_{jp}]$ ters esnek matrislerinin *Ve değil-satır çarpımı* $\bar{\lambda}_{\bar{F}}$;

$$\bar{\lambda}_{\bar{F}} : ISM_{m_1 \times n} \times ISM_{m_2 \times n} \rightarrow ISM_{m_1 m_2 \times n}, [\bar{a}_{ip}] \bar{\lambda}_{\bar{F}} [\bar{b}_{jp}] = [\bar{c}_{vp}]$$

şeklinde tanımlanır, burada $\bar{c}_{vp} = \min\{\bar{a}_{ip}, 1 - \bar{b}_{jp}\}$ öyle ki $i = \beta, v = (\beta - 1)m_2 + j$ şartını sağlayan en küçük pozitif tam sayı olmak üzere $v \leq \beta m_2$ dir.

d) $[\bar{a}_{ip}]$ ve $[\bar{b}_{jp}]$ ters esnek matrislerinin *Veya değil-satır çarpımı* $\bar{\vee}_{\bar{F}}$;

$$\bar{\vee}_{\bar{F}} : ISM_{m_1 \times n} \times ISM_{m_2 \times n} \rightarrow ISM_{m_1 m_2 \times n}, [\bar{a}_{ip}] \bar{\vee}_{\bar{F}} [\bar{b}_{jp}] = [\bar{c}_{vp}]$$

şeklinde tanımlanır, burada $\bar{c}_{vp} = \max\{\bar{a}_{ip}, 1 - \bar{b}_{jp}\}$ öyle ki $i = \beta, v = (\beta - 1)m_2 + j$ şartını sağlayan en küçük pozitif tam sayı olmak üzere $v \leq \beta m_2$ dir.

Teorem 3.1.10.

i. $[1]_{1 \times n} \lambda_{\bar{F}}$ Ve-satır işlemine göre $ISM(U)$ nun birim elemanıdır.

ii. $[0]_{1 \times n} \vee_{\bar{F}}$ Veya-satır işlemine göre $ISM(U)$ nun birim elemanıdır.

İspat :

- i. $[\bar{a}_{ip}] \bar{\wedge}_{\bar{r}} [1]_{1 \times n} = [\bar{b}_{jp}]$ olsun. Tanım 3.1.9. a) dan $\forall i \in |E|$ için $\bar{b}_{jp} = \min\{\bar{a}_{ip}, 1\}$ olduğundan $[\bar{a}_{ip}] = [\bar{b}_{jp}]$ eşitliği elde edilir.
- ii. Yukardaki ispata benzer olarak ispata ulaşılabilir.

Önerme 3.1.11. $[\bar{a}_{ip}] \in ISM_{m_1 \times n}$, $[\bar{b}_{kj}] \in ISM_{m_2 \times n}$, $[\bar{c}_{lj}] \in ISM_{m_3 \times n}$ olsun.

- i. $([\bar{a}_{ip}] \wedge_{\bar{r}} [\bar{b}_{kj}]) \wedge_{\bar{r}} [\bar{c}_{lj}] = [\bar{a}_{ip}] \wedge_{\bar{r}} ([\bar{b}_{kj}] \wedge_{\bar{r}} [\bar{c}_{lj}])$ eşitliği sağlandığından ve- satır işlemi *birleşmelidir*.
- ii. $([\bar{a}_{ip}] \vee_{\bar{r}} [\bar{b}_{kj}]) \vee_{\bar{r}} [\bar{c}_{lj}] = [\bar{a}_{ip}] \vee_{\bar{r}} ([\bar{b}_{kj}] \vee_{\bar{r}} [\bar{c}_{lj}])$ eşitliği sağlandığından veya- satır işlemi *birleşmelidir*.

Teorem 3.1.10 ve Önerme 3.1.11 den aşağıdaki sonuç elde edilir.

Sonuç 3.1.12.

- i. $ISM(U)$ $\wedge_{\bar{r}}$ Ve-satır işlemine göre bir *monoidtir*.
- ii. $ISM(U)$ $\vee_{\bar{r}}$ Veya-satır işlemine göre bir *monoidtir*.

4. TERS ESNEK MATRİSLERDE TOPLAM MAKSİMUM İLE KARAR VERME METODU

Bu bölümde ilk olarak Çağman ve Enginoğlu [7] çalışmasındaki karar algoritması uygulanarak bir karar verme probleminin çözümü elde edilmiştir. Daha sonrasında ise aynı problemin ters esnek küme ve matris kullanılarak sonucuna gidilmiştir.

Örnek 4.1.1. $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}$ evrensel alternatiflerin kümesi ve $E = \{e_1, e_2, e_3, e_4\}$ parametrelerin kümesi olsun.

1. Adım:

A kişinin seçtiği parametreler; $A = \{e_2, e_4\} \subset E$, B kişinin seçtiği parametreler; $B = \{e_1, e_3, e_4\} \subset E$ ve

$(F, A) = \{(e_2, \{u_2, u_3, u_5\}), (e_4, \{u_1, u_4, u_5\})\}$, $(F, B) = \{(e_1, \{u_1, u_3, u_4, u_5\}), (e_3, \{u_3, u_5\}), (e_4, \{u_5\})\}$ karar vericilerin esnek kümeleri olsun.

2. Adım:

$$(F, A) \text{ esnek kümesine ait esnek matris; } [a_{ij}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$(F, B) \text{ esnek kümesine ait esnek matris; } [b_{ij}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

3. Adım: $[a_{ij}] \wedge [b_{ij}] = [c_{ip}]$

$$[c_{ip}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \text{ esnek matrisi elde edilir.}$$

4. Adım: $[c_{ip}] \in SM_{5 \times 16}$, $I_k = \{p: \exists i, c_{ip} \neq 0, (k-1)n < p \leq kn\} \forall k \in I = \{1, 2, 3, 4\}$

5. Adım: $I_1 = \emptyset$ olup $t_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$, $I_2 = \{5, 7, 8\}$ olup $t_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$, $I_3 = \emptyset$ olup $t_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$, $I_4 = \{13, 15, 16\}$ olup $t_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$

dir.

$$Mm[c_{ip}] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \text{max-min karar matrisi bulunur.}$$

Karar vericiler için ortak seçim yapılabilecek en uygun nesne $\{u_5\}$ dir.

Örnek 4.1.1. $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}$ evrensel alternatiflerin kümesi ve $E = \{e_1, e_2, e_3, e_4\}$ parametrelerin kümesi olsun.

1. Adım:

A kişisinin seçtiği parametreler; $A = \{e_2, e_4\} \subset E$, B kişisinin seçtiği parametreler; $B = \{e_1, e_3, e_4\} \subset E$ ve

$$(\bar{F}, A) = \{(u_1, \{e_4\}), (u_2, \{e_2\}), (u_3, \{e_2\}), (u_4, \{e_4\}), (u_5, \{e_2, e_4\})\}$$

$$(\bar{F}, B) = \{(u_1, \{e_1\}), (u_2, \emptyset), (u_3, \{e_1, e_3\}), (u_4, \{e_1\}), (u_5, \{e_1, e_3, e_4\})\} \text{ karar vericilerin ters esnek kümeleri olsun.}$$

2. Adım:

$$(\bar{F}, A) \text{ ters esnek kümesine ait ters esnek matrisi; } [\bar{a}_{ij}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$(\bar{F}, B) \text{ ters esnek kümesine ait ters esnek matrisi; } [\bar{b}_{ij}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ olur.}$$

3. Adım: $[\bar{a}_{ip}] \wedge_{\bar{r}} [\bar{b}_{jp}] = [\bar{c}_{vp}]$

$$[\bar{c}_{vp}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4. Adım: $[\bar{c}_{vp}] \in SM_{16 \times 5}$, $I_k = \{v: \exists j, c_{jp} \neq 0, (k-1)n < v \leq kn\} \forall k \in I = \{1,2,3,4\}$

5. Adım: $I_1 = \emptyset$ olup $t_1 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$, $I_2 = \{5,7,8\}$ olup $t_2 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]$, $I_3 = \emptyset$ olup $t_3 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$, $I_4 = \{13,15,16\}$ olup $t_4 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]$ dir. Dolayısıyla

$$Mm[\bar{c}_{vp}] = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1] \text{max-min karar satır matrisi bulunur.}$$

Karar vericiler için ortak seçim yapılabilecek en uygun nesne $\{u_5\}$ dir.

Tanım 4.1.3. $U = \{h_1, h_2, \dots, h_n\}$ alternatif nesnelerin kümesi ve $E_t = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ parametrelerin kümesi ve (\bar{F}, A) ters esnek kümesi ve $[\bar{a}_{ip}]$ matrisinde kümeye karşılık gelen ters esnek matrisi olsun.

$$\hat{S}_k = \sum_{j=1}^{m_1 m_2} a_{jk} \text{ şeklinde tanımlı değere seçim değeri denir.}$$

Tanım 4.1.4. $U = \{h_1, h_2, \dots, h_n\}$. alternatif nesnelere kümesi olsun. Nesnelere sıralarken seçim değeri \hat{S}_k kullanılır. Eğer $\hat{S}_{k_1} > \hat{S}_{k_2} > \dots > \hat{S}_{k_n}$ ise $h_{k_1} > h_{k_2} > \dots > h_{k_n}$ şeklinde alternatifler sıralanır ve optimum olan nesne seçilir.

Karar Algoritması

1. Adım: Karar vericiler $E_1 \cap E_2 \cap \dots \cap E_r \neq \emptyset$ olacak şekilde parametre kümesi seçilir, ters esnek kümeleri ve ters esnek matrisleri oluşturulur.
2. Adım: $\bar{\alpha}_t$ - kümeleri tanımlanır. ($t = (1, 2, \dots, r)$)
3. Adım: $\bar{\alpha}_t$ - kümelerine göre uygun olan $\bar{\alpha}_t$ - kesişim ters esnek matrisleri oluşturulur.
4. Adım: Probleme uygun olarak matrisler arasında satır işlemi uygulanır.
5. Adım: Her bir nesne için \hat{S}_k seçim değeri hesaplanır ve nesnelere arası sıralama yapılarak U kümesine ait optimum nesne seçilir.

Örnek 4.1.5. Bir anne-baba velisi olduğu çocuğu için okul araştırması yapacaklardır. Anne okulun iyi(olumlu) yönlerini, baba ise okulun olumsuz yönlerini araştırır. $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}$ 5 farklı okul seçeneğinden parametrelerine göre en uygun okulu belirleyecekler.

1. Adım:

Olumlu parametre;

$$E_1 = \{e_1^1 = \text{öğretmen kadrosu iyi}, e_2^1 = \text{eve yakın mesafe}, e_3^1 = \text{sınıf mevcudu az}, e_4^1 = \text{başarılı}\}$$

Olumsuz parametre;

$$E_2 = \{e_1^2 = \text{yemekhanesi yok}, e_2^2 = \text{servis ile ulaşım imkanı yok}, e_3^2 = \text{labaratuvarı yok}\}$$

$$(\bar{F}, E_1) = \{(u_1, \{e_1^1, e_3^1\}), (u_2, \{e_1^1, e_2^1, e_4^1\}), (u_3, \{e_3^1\}), (u_4, \{e_2^1\}), (u_5, \{e_1^1, e_3^1, e_4^1\})\}$$

$$(\bar{F}, E_2) = \{(u_1, \{e_1^2, e_3^2\}), (u_2, \{e_1^2, e_2^2\}), (u_3, \{e_3^2, e_2^2\}), (u_4, \{e_1^2, e_2^2\}), (u_5, \{e_2^2, e_3^2\})\}$$

$$[\bar{F}, E_1] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \rightarrow \text{olumlu parametre kümesine ait ters esnek matris}$$

$$[\bar{F}, E_2] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \text{olumsuz parametre kümesine ait ters esnek matris}$$

2. Adım:

$$\bar{\alpha}_1 \subseteq E_1 \text{ ise } \bar{\alpha}_1 = \{e_1^1, e_4^1\} (I = \{1, 4\})$$

$\bar{\alpha}_2 \subseteq E_2$ ise $\bar{\alpha}_2 = \{e_2^2, e_3^2\} (I = \{2, 3\})$ buradaki $\bar{\alpha}_2$ seçimi karar vericinin okul seçiminde kesinlikle taviz veremeyeceği parametreleri göstermektedir.

3. Adım:

$$[\bar{F}, E_1]^{\bar{\alpha}_1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{olumlu ters esnek matrisin } \bar{\alpha}_1 \text{ -kesişim ters esnek matrisi,}$$

$[\bar{F}, E_2]$ ters esnek matrisi için ilk olarak $\bar{\alpha}_2$ -kesişim ters esnek matrisi

$$[\bar{F}, E_2]^{\bar{\alpha}_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{matrisi elde edilir.}$$

4. Adım:

Olumlu ve olumsuz parametreler arası ortak bir seçim yapılacağı için ve değil işlemi bu problem için idealdir. O halde E_2 olumsuz parametre sunduğu için $[\bar{F}, E_2]^{\bar{\alpha}_2}$ ters esnek matrisinin tümleyeni bulunur.

$$([\bar{F}, E_2]^{\bar{\alpha}_2})^c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \text{matrisi bulunur.}$$

$$[\bar{F}, E_1]^{\cap \bar{\alpha}_1} \bar{\lambda}_F [\bar{F}, E_2]^{\cap \bar{\alpha}_2} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ sonucu elde edilir.}$$

5. Adım:

$\hat{S}_1 = 1, \hat{S}_2 = 6, \hat{S}_3 = 0, \hat{S}_4 = 0, \hat{S}_5 = 4$ seçim değerleri elde edilen alternatif nesnelere;

$\hat{S}_2 > \hat{S}_5 > \hat{S}_1 > \hat{S}_3 = \hat{S}_4$ ile $u_2 > u_5 > u_1 > u_3 = u_4$

sıralamasına sahip olup optimum seçim $\{u_2\}$ okulu olarak belirlenmiş olur.

Kaynakça

- [1] Molodtsov, D. 1999. Soft Set Theory-First Results, Computers and Mathematics with Applications, 37 (1) (1999), 19-31.
- [2] Maji, P. K., Bismas, R., Roy, A.R. 2003. Soft Set Theory, Computers and Mathematics with Applications, 45(1) (2003), 550-562
- [3] Ali, M.I., Feng, F., Liu, X., Min, W.K., Shabir, M. 2009. On Some New Operations in Soft Set Theory, Comput. Math Appl. 57(9) (2009), 1547-1553
- [4] Çağman, N. and Enginoğlu, S. 2010. Soft Set Theory and Uni-Int Decision Making, Eur. J. Oper 207(2) (2010)848-855.
- [5] Sezgin A., Atagün A.O. 2011. On Operations of Soft Sets Comput. Math. Appl. , 61(5) (2011) 1457-1467.
- [6] Atagün, A.O. ve Kamacı, H., Decomposition of soft sets and soft matrices with applications in group decision making, (submitted.)
- [7] Çağman, N. and Enginoğlu, S. 2010. Soft Matrix Theory and Its Decision Making, Comput. Math. Appl., 59(10) (2010), 3308-3314.
- [8] Atagün, A.O. ve Kamacı, H., Oktay O. (2018) Reduced soft matrices and generalized products with applications in decision making. Neural. Comput. Applic. 29,(2018) 445-456
- [9] Çetkin, V., Aygünoğlu A., and Aygün, H., A new approach in handling soft decision making problems, J Nonlinear Sci Appl 9(2016), 231-239
- [10] Kamacı, H., and Petchimuthu, S. The row-products of inverse soft matrices in multicriteria decision making, Jour of Intel and Fuzzy Sys. , 36(6), (2019), 6425-6441.

NanoTAX: Nanogözenek DNA Dizileme Verisi Üzerinden Hızlı Patojen Tanıma

Özkan Ufuk Nalbantoğlu^{*1}, Aycan Gündoğdu²

^{*1} Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği, KAYSERİ

² Erciyes Üniversitesi Tıp Fakültesi Tıbbi Mikrobiyoloji, KAYSERİ

(Alınış / Received: 23.02.2021, Kabul / Accepted: 19.05.2021, Online Yayınlanma / Published Online: 31.08.2021)

Anahtar Kelimeler

Biyoinformatik,
Hızlı patojen tanıma,
Makine öğrenme,
Yeni nesil dizileme,
Nanogözenek dizileme

Öz: Bu çalışmada gerçek zamanlı DNA dizilemesi sağlayan, düşük maliyetli ve taşınabilir bir yeni nesil dizileme teknolojisi olan nanogözenek dizileme teknolojisini kullanarak gerçek zamanlı ve düşük maliyetli patojen/etken tespit algoritmaları sunulmaktadır. Çalışma kapsamında Oxford Nanopore MinION DNA dizileyicisi ile sekanslanan bakterileri gerçek zamanlı tanıyabilecek bilgi kuramı temelli biyoinformatik teşhis algoritmaları geliştirilmiş ve performansları gerçek veri üzerinde test edilmiştir. Taksona özgü oligomer karakterizasyonunu sağlayan Bağlı Bolluk Endeksleri (ing: Relative Abundance Index-RAI) ve nükleotid dizileri içindeki korelasyonları ortaya seren Ortalama Karşılıklı Bilgi (OKB) yöntemi ile DNA karakterizasyonu yapılarak patojen tanıma algoritmaları geliştirilmiştir. Tasarlanan simülasyonlar ile ortalama teşhis koyma süreleri ve doğrulukları hakkındaki istatistikler elde edilerek bu yönde oluşturulacak sistemlerin rutin kullanım için fizibilitesi ortaya konmuştur. Önerilen OKB profili ve RAI tabanlı algoritmaların hızlı patojen tanıma konusunda yeterli doğruluk seviyesinde ve kısa sürede tanıma yapabilecek hızda olduğu ve mevcut programlarla rekabet edebilen performansta olduğu nanogözenek dizilemesi yapılan patojen paneli üzerinde gösterilmiştir. Geliştirilen yöntem kısıtlı bir patojen paneli üzerinde etkinlik göstermektedir; bu sebeple geniş çaplı kullanım için daha ileri çalışmaların yürütülmesi gerekmektedir.

Rapid Pathogen Detection Algorithms for Nanopore DNA Sequencing

Keywords

Bioinformatics,
Rapid pathogen detection,
Machine learning,
Next-Generation sequencing,
Nanopore sequencing

Abstract: In this work, real-time and cost effective pathogen detection algorithms for low-cost, real-time nanopore DNA sequencing technology are proposed. Information theory-based bioinformatics detection algorithms that can recognize the bacterial species in DNA data generated by the current nanopore sequencing technology, Oxford Nanopore MinION sequencer, were developed and tested on real-data. Novel pathogen recognition algorithms were developed based on Relative Abundance Index (RAI), which characterizes taxon-specific oligomer preferences, and also based on Average Mutual Information (AMI), which reveals the correlations within nucleotide sequences. The simulations were designed to reveal the statistics on mean detection durations and accuracies of the detection algorithms. This provided know-how on the feasibility of routine usage of the systems developed on these principles. The proposed algorithms those are based AMI and RAI based detection systems were observed to be sufficiently accurate and rapid for pathogen detection on the selected pathogen panel being competitive with state-of-the-art. While the method operates on a limited panel, further studies are needed to broaden the use cases.

*İlgili Yazar, email: nalbantoglu@erciyes.edu.tr

1. Giriş

Enfeksiyon hastalıkları, dünya ölçeğinde yetişkin ölüm sebeplerinde birinci, çocuk ölümlerinde ise ikinci sırada gelmektedir. Bir yılda dünya çapında ölen 50 milyon insanın %40'ının enfeksiyon hastalıklarından öldüğü tahmin edilmektedir [1,2]. Enfeksiyon hastalıklarında tanı ve antimikrobiyal tedavinin uygun şekilde yönlendirilebilmesi için etkenin doğrulanması ve patojenin hızlı bir şekilde identifikasyonu oldukça önemlidir. Bu amaç için kullanılan standart mikrobiyolojik yöntemler kültür, konvansiyonel identifikasyon/duyarlılık testlerini içermektedir. Her ne kadar kültür altın standart olarak tanımlansa da standart yöntemlerle sonuç alınması için en 72 saate varan sürelerle ihtiyaç duyulmakta ve etken organizma her zaman identifiye edilememektedir. Özellikle sepsis gibi kritik

vakaların tanısında ya da etken mikroorganizmanın hızlı ve doğru bir şekilde tanımlanmasının kritik öneme sahip olduğu biyogüvenlik/biyoterörizm durumlarında konvensiyonel yöntemler yetersiz kalmaktadır. Kültürde hız sorununa ek olarak kan, idrar, ETA, BOS gibi vücut sıvısı örneklerinin toplanmasından başlayarak son aşamaya kadar patojen tanımlamanın doğru sonuçlandırılmasını etkileyen çok sayıda faktör bulunmaktadır. Örneğin, fastidiyöz ve yavaş üreyen patojenlerin sebep olduğu enfeksiyonlarda etken izolasyonu için kültürün duyarlılığı oldukça düşüktür. Kültürün ortaya koyduğu teknik ve diğer sınırlamaların üstesinden gelmek için, birçok ülkede 1960'lı yıllardan bu yana etken/patojen hızlı tanı yöntemleri üzerine yapılan araştırmalar devam etmektedir [3]. Bu araştırmalar başlıca, minyatürize biyokimyasal teknikler, immünolojik testler, biyosensörler ve nükleik asit temeline dayanan yöntemleri içermektedir. Fakat, hızlı sonuç vermesi için tasarlanan söz konusu yöntemlerin duyarlılıkları, hedef mikroorganizma çeşitlilikleri ve rutinde kullanımı için maliyet etkinliklerinin değerlendirilmesi önemlidir [4]. Örneğin, etken tanısında DNA temelli yöntemler henüz rutin laboratuvar kullanımına girmemiş olmakla birlikte birçok hasta grubundaki hızlı tanı ihtiyacından dolayı çok sayıda araştırmada değerlendirilmiştir. Fakat, patojen spesifik yaklaşımla -tür ya da cins düzeyinde tasarlanan-primerlerin kullanıldığı DNA temelli metotlarda hedeflenen mikroorganizma çeşitliliği oldukça sınırlıdır. Bu sebeple, gerek klinik gerekse gıda ve çevresel örneklerinde bulunan patojen mikroorganizmaların erken tespiti/identifikasyonu için mikrobiyolojik tanıya katkı sağlamak üzere ucuz ve duyarlılığı yüksek hızlı tanı sistemlerinin geliştirilmesine ihtiyaç vardır.

Geçtiğimiz on beş yıl, yeni nesil dizileme teknolojilerinde (YNDT) gerçekleşen gelişmeler ve bunun yansıması olarak sağlık bilimleri, gıda biyoteknolojisi, endüstriyel mikrobiyoloji vb. alanlarda önemli buluşların yapıldığı bir ilerleme dönemi olmuştur. YNDT, ticari olarak kullanıma girmeye başladığı 2004 yılından bugüne değin 1 milyon nükleotidin dizileme maliyetini 1000 Amerikan dolarından 5 Amerikan senti seviyesine indirirken, tek bir seferde dizileme hacmini de Mbp (milyon nükleotid~bakteri genomu) düzeyinden Tbp (trilyon nükleotid~1000 insan genomu) düzeyine taşımıştır [5]. Günümüzde küçük ölçekli moleküler biyoloji laboratuvarlarında dahi yeni nesil dizileme ile genom düzeyinde çalışma yapılabilen, fenotip-genotip ilişkileri ortaya konarak hastalık teşhisi/prognozu/tedavi araştırmaları moleküler düzeyde yürütülebilmektedir.

Geçtiğimiz birkaç yılda, DNA dizileme paradigmasında devrimsel bir gelişmeye sebep olabilecek yeni bir yaklaşım bilimsel kullanıma sunulmuştur. DNA sentezinin optik (Illumina, Roche 454, PacBio teknolojileri) veya elektrokimyasal (Ion Torrent teknolojisi) tespitine dayalı teknolojiler yerine herhangi bir DNA sentezlemeye dayanmayan, nanogözenekler [6] içerisinden geçen DNA iplikçiklerinin doğrudan elektronik tespitine dayalı Oxford Nanopore MinION teknolojisi inovatif bir DNA dizileme yöntemi olarak kullanılmaya başlanmıştır. Nanogözenek dizilemesi, tarihi 25 yıl öncesine dayanan bir fikir olsa da [7], DNA dizileyen ulaşılabilir bir cihaz teknolojisine dönüşmesi ancak 2014 yılında mümkün olmuştur. Herhangi bir DNA amplifikasyonu, sentezleme veya optik tarama gerektirmeyen bu teknik, ucuz ve küçük cihazlarla gerçek zamanlı, hızlı ve uzun DNA okumaları sağlayan dizilemeyi olanaklı kılmaktadır. Nanogözenek dizileme yöntemini uygulayan ilk ticari DNA dizileycisi olarak ortaya çıkan Oxford Nanopore MinION, bu teknoloji ile kısa sürede önemli bulguların elde edilebilmesini sağlamıştır. Örneğin, nanogözenek dizileme ile elde edilen uzun okumalar bakteri tüm genomlarının büyük bir başarıyla dizilenebilmesini sağlamaktadır. *Escherichia coli* K-12 MG1655 suşunun tüm genomu 48 saatlik MinION dizilemesi sonucunda elde edilmiş ve yaklaşık %87'sinin referans genomla örtüştüğü raporlanmıştır [8]. Aynı genomun daha gelişmiş biyoinformatik teknikleriyle birleştirilmesi sonucu %99.5 referans gen benzerliği ile birleştirilmesi mümkün olmuştur [9]. Patojen türlerin antibiyotik direncinden sorumlu antibiyotik direnç geni adalarının yapı ve genom pozisyonlarının bu dizileme teknolojisi ile tespit edilebildiği *Salmonella Typhi* genomu üzerinde gösterilirken [8], *Staphylococcus aureus* ve *Mycobacterium tuberculosis* genomlarının antibiyotik direnç tahminleri sırasıyla 12 antibiyotik için ortalama % 99.4 ve % 90.55 doğrulukla yapılabildiği rapor edilmiştir. Bu örnekler dışında bir diğer başarılı gelişme, ilk ortaya çıktığı süreçte MinION verisi düşük kaliteli okumalar üretiyorken [8,10] kimyası değiştirilmiş yeni akış hücreleri sayesinde bugün neredeyse 2. nesil dizileme cihazları kadar kaliteli okumalar elde edilebilmesi olmuştur.

Bütün bu gelişmeler ışığında MinION nanogözenek dizilemesinin gerçek zamanlı tüm genom dizilemesi yapabilme yetisi, bu teknolojinin patojen tespiti konusundaki potansiyelini ortaya dökmüştür. Bu doğrultuda başlayan öncü çalışmalarda başarılı sonuçlar elde edilmiştir [8]. İngiltere'de bir hastanede başgösteren Salmonella salgını 100 dakika süren nanogözenek dizilemesi ile tespit etmeyi başarmışlardır. 2014 Ebola salgını izolatları ile yapılan çalışmalarda bir saatten kısa sürede Ebola virusunun tespit edilebildiği, aynı teknikle chikungunya ve hepatit C viruslarının da kısa sürede MinION dizilemesiyle tespit edilebildiği görülmüştür. İnfluenza genomunun dizilendiği bir diğer çalışmada 4 saatlik bir nanogözenek dizilemesi ile tüm virus genlerinin %99 doğrulukla ortaya çıkarılabildiği ve bu sayede virus tiplemesinin yapılabildiği belirtilmiştir [11]. 2020 yılında başgösteren COVID-19 pandemisinde SARS-CoV-2 genomlarının dizilenmesinde başlıca yöntem olarak nanogözenek dizilemesi salgın boyunca öne çıkmıştır [12,13].

Bugüne değin yürütülmüş çalışmalar göz önüne alındığında, patojen tanıma yöntemlerinin üretilen DNA okumalarının referans genomlar üzerine bilinen DNA hizalama programlarıyla hizalamaya dayandığı görülmektedir. Buna göre ortamdan okunan DNA dizilerinin önemli bir bölümünün, hedef bir patojenin genomuna hizalanabiliyor olması, o patojenin ortamda bulunduğuna işaret etmekte ve böylece patojen tespiti yapılabilmektedir. Uzun DNA parçalarını hizalamada kullanılan yöntemlerinden olan LAST [14] şu an nanogözenek dizilemesinde kullanılan en popüler yöntem olarak göze çarpmaktadır [8,15,16]. Bunun yanında BLAST [10,11,17] ve BWA-MEM [9,18,19] programları da hizalamada kullanıldığı rapor edilen benzer yaklaşımlardır. Bahsi geçen DNA hizalayıcıları aslen baz başına ortalama okuma hata oranı düşük olan (<< %1) Sanger ve Illumina dizileme teknolojileri için geliştirilmiş yöntemlerdir. Nanogözenek dizilemesinin mevcut teknoloji ile %15-%30 arasında değişen yüksek okuma hatası oranlarına sahip olduğu bildirilmektedir [10,20]. Hizalama algoritmalarının MinION gibi yüksek okuma hatası oranına sahip veriler üzerinde ise düşük başarıya sahip olması beklenmektedir. Nitekim rapor edilen nanogözenek dizilemesi deneylerinde üretilen veri ancak %10-%20 oranları arasında hizalanabilmiştir [20,15]. Bu oranda güncellenen yeni kimyasal prosedürlerle ufak iyileşmeler olsa da henüz ortalama olarak üretilen okumaların en fazla dörtte bire yakın bir bölümü [9] referans genomlar üzerine hizalanarak tespit için kullanılabilir. Bu durum üretilen verinin büyük çoğunluğunun ortamdaki patojenlere ait önemli genom bilgileri içermesine rağmen bunların doğrudan kullanılamaması anlamına gelmektedir. Ebola, Chikungunya ve hepatit C virüslerinin tespiti için yapılan bir çalışmada MinION dizileme verisinin DNA hizalaması ile Illumina platformuna göre yaklaşık 3 kat daha az oranda hizalandığı gözlemlenmiştir [11]. Bu ise saatler olarak rapor edilen patojen tanıma süresinin üretilen verinin verimli kullanılabilmesi halinde dakikalarla ifade edilebilecek performansa erişebileceğini işaret etmektedir. Dolayısıyla patojen tanıma yöntemi olarak nanogözenek okumalarını referans genomlara hizalama yaklaşımından çok DNA kompozisyonuna dayalı örüntü tanıma ve makine öğrenimi gibi teknolojilerin kullanıldığı yeni yaklaşımlara ihtiyaç vardır. Bu tip yaklaşımlar, DNA okumalarını matematiksel modellerle karakterize ederek bilinmeyen bir DNA parçasının hangi genoma ait modelle örtüştüğünü bularak tespit yapmaya yönelik olması bakımından önemlidir. Patojen tanıma için gerekli taksonomik sınıflandırmayı hesaplamalı genom imzaları (HGI) [21] tabanlı örüntü tanıma yöntemleriyle gerçekleştiren Phymm [22] ve RAiPhy [23] gibi yaklaşımların gürültülü veriye dayanıklı olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte Ortalama Karşılıklı Bilgi (ing: Average Mutual Information-AMI) karakterizasyonun da yüksek hatalı dizilerde başarılı modelleme yapabildiği bilinmektedir [24, 25]. Bu sebeple bu yaklaşımların, MinION verisi üzerinde başarılı modelleme yapma ve dolayısıyla verimli patojen tanıma yöntemleri ortaya koyma potansiyeli bulunmaktadır.

Yürütülen çalışma ile gerçek zamanlı DNA dizilemesi sağlayan, düşük maliyetli ve taşınabilir bir yeni nesil dizileme teknolojisi olan nanogözenek dizileme teknolojisini kullanarak gerçek zamanlı ve ucuz patojen/etken tespit sistemlerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, Oxford Nanopore MinION DNA dizileyicisi ile sekanslanan bakterileri gerçek zamanlı tanıyabilecek bilgi kuramı temelli biyoinformatik teşhis algoritmaları geliştirilmiş ve performansları gerçek veri üzerinde test edilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Çalışmada izlenen metodoloji, önerilen yöntemin geliştirilmesi ve test edilmesi için gerekli (i) veri üretimi, (ii) üretilen DNA dizileme verisi üzerinden biyoinformatik yöntemler geliştirilmesi ve (iii) geliştirilen yöntemlerin tasarlanan simülasyonlarla performansının ölçülerek önerilen teknolojinin başarısının ve uygulanabilirliğinin kestirilmesi aşamalarını içermektedir.

2.1 Islak Laboratuvar Yöntemleri

Biyoinformatik tanıma algoritmalarının geliştirilmesinde gerekli eğitim verisinin üretilmesi için bu aşamada *E. coli*, *Klebsiella pneumoniae*, *Acinetobacter baumannii*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Citrobacter freundii* ve *Enterobacter spp.* türlerine ait suşların genomik DNA izolasyonu, çift iplikli DNA (dsDNA) kalite ölçümleri, dizileme kütüphanesinin hazırlanması ve MinION ile dizilemesi yapılmıştır.

2.1.1 Mikrobiyal DNA izolasyonu ve dsDNA Kalite Ölçümleri

E. coli, *K. pneumoniae*, *A. baumannii*, *P. aeruginosa*, *C. freundii* ve *Enterobacter spp.* suşlar uygun besi yerlerinde saf olarak kültürlenmiştir. Suşlara ait total bakteriyel DNA izolasyonu Mobio DNA İzolasyon Kiti (Mobio-PowerLyzer UltraClean Microbial DNA Isolation Kit) kullanılarak üretici firmanın prosedüründe belirtildiği şekliyle gerçekleştirilmiştir. İzolasyon sonrası elde edilen total bakteriyel DNA içerisindeki çift iplikli DNA (dsDNA) konsantrasyonu ve kalitesi Qubit dsDNA BR assay kit kullanılarak Qubit fluorometer (Life Technology) ile belirlenmiştir. Uygun kalite ve miktarda elde edilemeyen suşlar için izolasyon aşaması tekrarlanmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre uygun kalitedeki (OD 260/280 = 1.8, OD 260/230 = 2.02.2) dsDNA örnekleri nanogözenek dizilemede kullanılmış ve saf dsDNA kullanılıncaya kadar -20 °C'de muhafaza edilmiştir.

2.1.2 Nanogözenek Tüm Genom Dizileme

Nanogözenek dizilemesi için Oxford Nanopore Technologies, MinION dizileme cihazı ve cihaza ait kontrol yazılımları kullanılmıştır. İzole edilen dsDNA, Oxford Nanopore SQK-LSK308 kiti ile firmanın önerdiği prosedüre uygun şekilde sekanslamaya hazırlanmıştır. Kit prosedürüne uygun olarak dsDNA'ları yaklaşık 8Kb'lik parçalara ayırmak için Covaris g-TUBE teknolojisi kullanılmıştır. DNA hasar ve kırıklarının onarılmasında NEBNext Ultra II End Repair/dA-Tailing, NEBNext FFPE DNA Repair Mix kitleri kullanılmıştır. Kütüphane hazırlık işlemleri sırasında DNA saflaştırılması Dynabeads MyOne Streptavidin C1 manyetik boncuklar ile gerçekleştirilmiştir. Alternatif bir kütüphane hazırlık aşaması olarak, DNA parçalanması, hasar onarımı gibi işlemlere ihtiyaç duyulmayan kütüphane hazırlanmasına olanak sağlayan Oxford Nanopore SQK-RAD003 kiti kullanılmıştır. Her bir örnek için, MinION cihazına takılan MK-I FLO-MIN107 akış hücresi (flow cell) kullanılarak 48 saat boyunca nanogözenek sekanslaması yapılmıştır. Dizileme cihazının kontrol yazılımı olan MinKNOW programı üzerinden DNA okumaları FASTA formatında metin dosyalarına çevrilerek biyoinformatik analizler için hazır hale getirilmiştir.

2.2. Kuru Laboratuvar Süreçleri

Nanogözenek dizilemesi ile elde edilen DNA okumalarının ait olduğu mikorganizmayı veya taksonomik sınıfı hassas düzeyde tahmin ederek patojen tespiti yapan biyoinformatik yöntemler iki farklı yaklaşım üzerinden geliştirilmiştir. Bunlar Bağlı Bolluk Endeksi (ing: Relative Abundance Index-RAI) ve Ortalama Karşılıklı Bilgi (OKB) karakterizasyonlarına dayalı algoritmalarından oluşmaktadır.

2.2.1 Bağlı Bolluk Endeksi (RAI) Temelli Patojen Tanıma Algoritmaları

RAI, genomlar içerisindeki kısa oligonükleotidlerin organizmaya özgü bollukta buldukları ve rastgele bir DNA fragmanın hangi türe (veya taksonomik birime) ait olduğunu bu karakteristiğe göre oluşturulmuş endeksler kullanılarak tespit edilebileceği gözlemine dayanan bir DNA karakterizasyon yöntemidir [23]. Bu yöntem kullanılarak geliştirilmiş olan RAIphy metagenom analiz programının mikroorganizmaların tespitinde oldukça hassas ve özgül olduğu raporlanmıştır [26,27].

RAI, bir oligonükleotidin bir genom veya taksonomik grup içindeki bağlı bolluğunu aşağıdaki şekilde hesaplar. $x_1x_2x_3...x_k$ k bazdan oluşan bir oligonükleotid ve $p(x_1x_2...x_k)$ bu oligonükleotidin genom içinde görülme olasılığı ise i . dereceden bağlı bolluk endeksi

$$rai_i(x_1x_2...x_k)_2 = \frac{p(x_1x_2...x_k)p(x_{k-1}x_{k-2}...x_{k-i})}{p(x_kx_{k-1}...x_{k-i})p(x_1x_2...x_{k-1})} \quad (1)$$

ve toplu bağlı bolluk endeksi

$$rai(x_1x_2...x_k) = \sum_{i=0}^{k-2} rai_i(x_1x_2...x_k) \quad (2)$$

şeklinde gözlenen oligonükleotid frekanslarının farklı dereceden Markov modellerine dayanan beklenen değerlere oranları toplamı o genom (veya taksonomik ünite) içindeki her bir oligonükleotidin bağlı bolluk endeksini vermektedir. Orijini bilinmeyen bir DNA parçasının içerdiği oligonükleotidlerin bir genoma göre toplam endeks skoru, o DNA parçasının sözkonusu genoma göre RAI skorunu belirtir. Bilinmeyen fragman, RAIphy tarafından en yüksek RAI skorunu oluşturan genoma ait olarak sınıflandırılmaktadır.

RAI endeksleme algoritmasına dayanarak nanogözenek dizileri üzerinden patojen tanınması yapabilecek bir yöntem geliştirmek için öncelikle optimal modelleme yapabilen oligonükleotid uzunluklarının tespit edilmesi sağlanmıştır. Bunun için ıslak laboratuvar sürecinde elde edilen izolat genomları ve NCBI RefSeq veritabanından bugüne kadar dizilenmiş olan seçili patojen suşlarına ait genomlar indirilerek RAI veritabanlarının yapılandırılması gerçekleştirilmiştir. 7-13 arasındaki her oligonükleotid uzunluğu için farklı bir RAI veritabanı oluşturmuştur. Patojen suşların MinION dizilemesi ile üretilen DNA okumaları bu değerler için test edilerek en doğru tanımların yapıldığı oligonükleotid uzunlukları tespit edilmiştir.

MinION dizilemesi DNA dizisinin nanogözenekler içerisinde geçerken anında görüntülenebilmesi imkanı sunmaktadır. Dizileme sırasında okunan DNA parçasının uzunluğu arttıkça çevrimiçi olarak RAI endeks skorları güncellenebilir. Gerçek profile yakınsayan (veya yanlış profillerden iraksayan) bu türevsel skorların tanıma da kullanılması ile dizileme sırasında tespit sürelerinin elde edilmesi sağlanmıştır. Buna göre her okuma için her saniye örneklenen RAI skorlarının birinci derece farkları da sınıflandırma yöntemine entegre edilerek sınıflandırma performansına olan olumlu etkisi gözlemlenmiştir.

2.2.2 Ortalama Karşılıklı Bilgi (OKB) Temelli Patojen Tanıma Algoritmaları

OKB, bir DNA parçasındaki nükleotidlerin birbirleriyle olan korelasyon ilişkilerini ölçen bir bilgi kuramı yöntemidir. Buna göre bir DNA dizisinde birbirinden k nükleotid uzaklıkta bulunan iki nükleotidin (x,y) birbirleri hakkında içerdikleri bilgi

$$I_k = \sum_{x \in A} \sum_{y \in A} p_k(x,y) \log_2 \frac{p_k(x,y)}{p(x)p(y)}, A=\{A,C,G,T\} \quad (3)$$

şeklinde k nükleotid uzakdaki x ve y 'nin empirik olarak kestirilmiş bileşik ve marjinal olasılık dağılımları üzerinden hesaplanabilmektedir.

OKB temelli patojen tanıma algoritmalarının geliştirilmesi için RAI temelli algoritma geliştirme aşamasına benzer adımlar atılmıştır. Öncelikle üretilen MinION verisi üzerinden farklı profil uzunluklarında patojen tanıma performansları araştırılmıştır. OKB profillerinin tüm genom profillerine yakınsama verilerinin sınıflandırmaya olumlu etkisinin olup olmadığı yine RAI skorlarında kullanılan yöntemle araştırılmıştır. OKB profillerinin uzaklıklarının ölçümünde Öklid, L1 normu ve Pearson korelasyonu metrikleri kullanılmıştır.

2.2.2.1 OKB Profillerini Kullanan Makine Öğrenme Temelli Patojen Tanıma Yöntemleri

Farklı patojenlere ait OKB profillerinin sınıflandırılabilmesi için üretilen okumalara ait OKB profillerinden rastgele örnekleme ile altkümeler seçilmiş ve belirlenen makine öğrenme programlarında eğitilerek çapraz geçerlilik testleriyle performansları sınanmıştır. Kullanılan makine öğrenme teknikleri sırası şu şekildedir: Naif Bayes algoritması [28], Destek vektör makineleri [29], en yakın komşu algoritması [30], Karar ağaçları [31] ve Rastgele orman algoritması [32].

2.3 Hızlı Patojen Tanıma Yöntemlerinin Performansının Ölçülmesi

Bu aşamada geliştirilen patojen tanıma algoritmalarının eldeki patojenleri hangi sürede ne ölçüde tanıyabilecekleri üretilen veriler üzerinde simülasyon yapılarak test edilmiştir.

Patojen dizileme verisinin üretilmesi sırasında, DNA okumalarının okunma zamanları ve okunma sıraları MinKNOW yazılımı ile kayıt altına alınmıştır. Bir dizileme sürecin başlamasından bitişine kadar süren her saniye için o anki kümülatif veri geliştirilen yazılımla analiz edilerek her bir okumanın taksonomik tespitleri kayıt altına alınmıştır. Yapılan simülasyonlar ile profil yakınsama karakteri ve RAI skorlarının evrimi gözlenerek her bir patojen için kritik değerler belirlenmiştir. Bu değerlere erişim süreleri yine dizileme süreleri ve okuma sıraları kayıtları kullanılarak ortaya çıkarılmış, böylece yaklaşık tanıma süreleri hesaplanmıştır.

2.4 Uygulama

Geliştirilen yaklaşımla nanogözenek dizileme verisinden taksonomik analiz yapabilen yöntemler bir yazılım paketi haline getirilmiş, "nanoTAX" isimli yazılım <https://github.com/nalbant/nanoTAX> adresli github versiyon platformunda dağıtımına sunulmuştur.

3. Bulgular

Yürütülen altı farklı nanogözenek dizilemesi deneyi belirtilen üretici firma tarafından sağlanan MinKnow DNA dizileyici sürücü yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Her bir izolat için MinKnow prosedürleri içerisinde akış hücrelerini (flowcell) tam kapasite ile kullanan 48 saatlik dizileme prosedürü seçilmiş ve dizilemelerin her biri 48 saat boyunca yürütülmüştür. Deneylerde kullanılan MinION akış hücrelerinin her biri 4'erli setler halinde 512 dizileme kanalından oluşmaktadır. Verili bir dizileme anında her kanaldaki 4 nanogözenek o anda en sağlıklı olanı sürücü yazılım tarafından tespit edilerek kullanılmaktadır. Yürütülen 6 dizileme deneyinin tamamında başlangıç değeri olarak 300 kanaldan fazlasının sağlıklı olarak çalıştığı görülmüştür. Dizileme deneleri sonucunda deney başına yaklaşık 40.000 (ortalama 39.329 +/- 9.743) DNA okuması elde edildiği, bu okumaların ortalama olarak 10.522 baz çifti (bç) uzunluğunda olduğu görülmüştür. Okuma sayıları *E. coli* için 49.675 bç, *K. pneumoniae* için 27.975bç, *A. baumannii* için 50.062bç, *P. aeruginosa* için 41.315bç, *C. freundii* için 29.669bç ve *Enterobacter spp* için 35.476bç olarak kayıt edilmiştir.

Elde edilen okuma uzunlukları göz önüne alındığında 1000 bç'den daha uzun okumaların tüm okumaların %99,27'sini, 5000 bç'den daha uzun okumaların tüm okumaların %83,86'sını, 10.000 bç'den daha uzun okumaların tüm okumaların %49,01'ini oluşturduğu görülmektedir (Ek A). En uzun okuma ise 37.455 bç olarak kaydedilmiştir. Buna göre okumaların yaklaşık yarısının 10 Kbp'den uzun olduğu görülmektedir. Elde edilmiş olan bu DNA dizileme uzunlukları nanogözenek dizilemesi hakkında son yıllarda elde edilen raporlarla tutarlı olmakla

birlikte bir genom parçasına ait göreceli olarak uzun parçaların okunabiliyor olması biyoinformatik uygulamaların önündeki belli kısıtları ortadan kaldırılmasının önünü açabilecektir.

Çalışmada yürütülen deneylerdeki hata oranını tahmin edebilmek amacıyla dizilenen suşlar NCBI veri tabanındaki dizilenmiş genomlarla Blastn algoritması kullanılarak karşılaştırılmıştır. Tamamı hizalanabilen okumaların nükleotid varyasyonlarına bakılarak kestirilen hata oranı ortalama olarak %8,71 +/- 2.35 olarak elde edilmiştir.

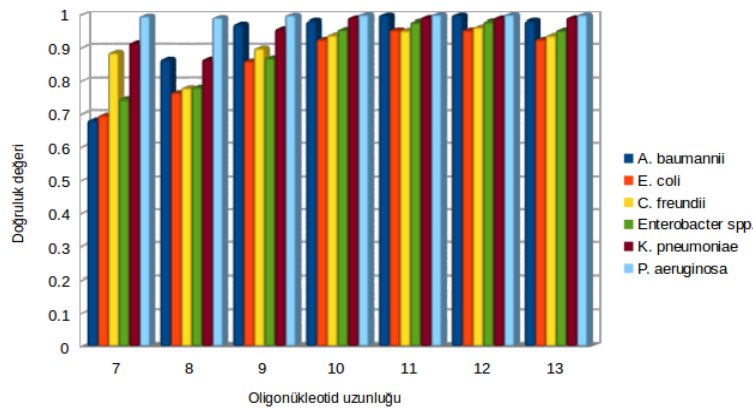
4.2 Bağlı Bolluk Endeksi (RAI) Temelli Patojen Tanıma Algoritmasının Geliştirilmesi

RAI endeksi kullanılarak bir patojen tanıma programı oluşturulmuş ve söz konusu algoritma belirlenen 6 patojen için test edilmiştir. Geliştirilen program farklı RAI uzunluğu parametreleriyle (oligonükleotid uzunluğu 7'den 13'e kadar) farklı veri tabanları oluşturmuş ve patojen tanıma deneyleri DNA okumasının ortalama doğru sınıflandırılma sayısı kriteri üzerinden test edilmiştir. Çalışma kapsamında yürütülen testlerde oligonükleotid uzunluğu 12'yi aştıktan sonra doğruluk payının doyuma ulaşmış ve daha da gerilemeye başladığı tespit edilmiştir (Tablo 1).

Tablo 1: Oligonükleotid uzunluğuna bağlı olarak RAI endeksi tabanlı sınıflandırma algoritmasının sınıflandırma doğruluk değerleri.

	Oligonükleotid uzunluğu						
	7	8	9	10	11	12	13
<i>A. baumannii</i>	0.682	0.866	0.972	0.981	0.999	0.999	0.982
<i>E. coli</i>	0.696	0.763	0.861	0.926	0.955	0.954	0.926
<i>C. freundii</i>	0.886	0.778	0.899	0.939	0.953	0.963	0.938
<i>Enterobacter spp.</i>	0.744	0.78	0.87	0.956	0.978	0.979	0.954
<i>K. pneumoniae</i>	0.916	0.866	0.958	0.99	0.991	0.99	0.99
<i>P. aeruginosa</i>	0.995	0.99	0.998	1	1	1	0.999

RAI endeksi 12 bazdan oluşan oligonükleotid veri tabanıyla yürütülen deneyde test edilen 6 patojenin ortalama %98 doğrulukla tespit edilebildiği gözlenmiştir. Elde edilen tüm nanogözenek okumaları üzerinde yürütülen blastn hizalaması deneylerinde ortalama okuma hata oranı %8.71 olarak bulunmuştur. Bu ise yine ortalama 11.48 bazdan birinin hatalı olacağı anlamına gelmektedir. Bu hata oranı 11 ve 12 bazlık RAI profillerinde doğruluk artışını büyük oranda etkilemezken 13 bazlık oligonükleotid profilinden itibaren sonuçlara etki ettiği ve doğruluğu bir miktar düşürdüğü görülmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Oligonükleotid uzunluğuna bağlı olarak RAI endeksi tabanlı sınıflandırma algoritmasının sınıflandırma doğruluk değerleri.

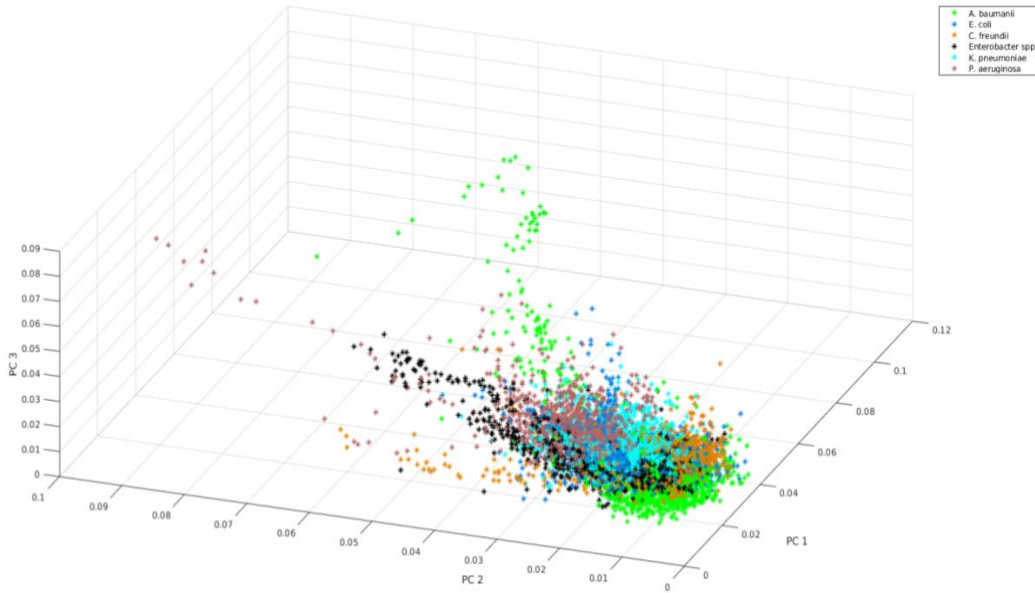
Nanogözenek DNA dizileme teknolojisi için son zamanlarda ortaya çıkarılmış olan okuma tanıma algoritmalarının en yaygın ikisi olan Minimap [33] ve WIMP (Kraken) [34] programları çalışma kapsamında üretilen 6 patojene ait deney verisi kullanılarak sınıflandırılmış ve doğruluk değerleri elde edilmiştir (Tablo 2). Elde edilen sonuçlara göre RAI endeksi tabanlı yaklaşımın WIMP programından daha başarılı Minimap'ten ise marjinal bir fark ile rekabet edebilir düzeyde daha başarılı olduğu gözlenmiştir.

Tablo 2: RAI endeksi tabanlı sınıflandırma algoritmalarının performansının WIMP ve Minimap sınıflandırma programları ile karşılaştırılması.

	<i>A. baumannii</i>	<i>E. coli</i>	<i>C. freundii</i>	<i>Enterobacter spp.</i>	<i>K. pneumoniae</i>	<i>P. aeruginosa</i>
RAI	0.999	0.954	0.963	0.979	0.99	1
WIMP	0.888	0.718	0.675	0.807	0.956	1
Minimap	0.944	0.897	0.911	0.9	0.923	1

3.1 OKB Temelli Patojen Tanıma Algoritmalarının Uzaklık/Benzerlik Metrikleri ile Patojen Tanımda Kullanılması

Tanıma için belirlenmiş altı patojene ait nanogözenek dizilemesi sonucunda elde edilen DNA okumaları ayrı ayrı OKB profillemesine tabii tutulmuş ve bu profillerin patojen tanıma algoritmalarındaki performansları test edilmiştir. Gözlenen DNA okumaları arası varyasyona rağmen genel OKB formunun korunuyor olması belli bir ölçekte patojen tanıma yapılabileceği görüşünü ortaya atmaktadır. Bu potansiyeli görsel olarak gözönüne sermek amacıyla elde edilen tüm OKB profilleri temel bileşenler analizi ile incelenmiş ve ilk 3 temel bileşen 3 boyutlu uzayda görüntülenmiştir. Şekil 2’de temel bileşenler analizi farklı perspektiflerden görselleştirilmektedir.

**Şekil 2.** Dizilenen OKB profillerinin temel bileşenler analizi ile görselleştirilmesi

İlk üç temel bileşenin görüntüsü okumaların belli bir kümeleşme gösterdiğini, ancak ayrı ayrı okumaların belli oranda iç içe geçtiklerini dolayısıyla bir patojen tanıma algoritmasında yanlış tespit sebebi olabileceklerini göstermektedir. Bununla birlikte profilleri uzayın farklı bölgelerine en çok dağılan türün *A. baumannii* olduğu ve iki ayrı öbek halinde profiller oluşturduğu görülmektedir.

Veri görselleştirme yolu ile elde edilen bu sonucun OKB temelli bir patojen tanıma algoritmasına nasıl yansıtacağını tespit etmek amacıyla farklı metrikler üzerinden patojen tanıma programları oluşturulmuş ve elde edilen DNA okumaları ile test edilmiştir. Sözkonusu programlar öncelikle 6 farklı patojen için ortalama OKB profillerini her bir patojenin imzası olarak kabul etmiş ve bu şekilde bir veri tabanı oluşturmuştur. Nanogözenek dizilemesi ile elde edilen bir DNA okumasının OKB profili bu veri tabanıyla karşılaştırılarak bilinmeyen bu DNA dizisinin hangi patojene ait olduğu tespit edilmeye çalışılmıştır.

İlk aşamada elde edilen ortalama genom imzaları ile her bir okuma OKB profilini Öklid vektör uzaklığı metriğiyle karşılaştırmaktadır. Tablo 3’de farklı parametreler kullanılarak Öklid metriği ile elde edilen duyarlılık ve kesinlik performansları sunulmaktadır.

Tablo 3. OKB profillerinin Öklid, L1 ve Pearson korelasyonu metrikleri kullanılarak sınıflandırılmasına ait sınıflandırma performansları.

Öklid Metriği (Duyarlılık % /Kesinlik %)						
	<i>A. baumannii</i>	<i>E. coli</i>	<i>C. freundii</i>	<i>Enterobacter spp.</i>	<i>K. pneumoniae</i>	<i>P. aeruginosa</i>
1-100 bç	55,6/71,6	25,7/33,1	62,3/55,6	52,4/47,1	48/60,3	98,9/69,7
1-50 bç	57,9/69,8	23,6/31,9	63,4/54,6	50/49,6	50,9/57,4	98,6/71,7
1-10 bç	41,1/59,1	18,1/27,5	64/46,7	44,1/48,2	50,4/48,7	97,5/74,3
L1 Metriği (Duyarlılık % /Kesinlik %)						
	<i>A. baumannii</i>	<i>E. coli</i>	<i>C. freundii</i>	<i>Enterobacter spp.</i>	<i>K. pneumoniae</i>	<i>P. aeruginosa</i>
1-100 bç	52,2/67,5	34,3/41	63,3/55,9	50,4/46,6	46,9/57,8	85,4/62,6
1-50 bç	61,4/72,8	23/32,1	64,6/55,1	49,4/45,9	51,2/58,2	93,9/71,6
1-10 bç	44,3/60,4	17,5/26,5	64,7/47,5	43/47	54/49,8	96,8/77,4
Pearson korelasyonu (Duyarlılık % /Kesinlik %)						
	<i>A. baumannii</i>	<i>E. coli</i>	<i>C. freundii</i>	<i>Enterobacter spp.</i>	<i>K. pneumoniae</i>	<i>P. aeruginosa</i>
1-100 bç	31,2/89,9	7,4/40	89,6/28,2	15,1/84,4	37,1/46,5	98,1/74,5
1-50 bç	22,1/80,4	6,3/38,4	90,8/26	16/79,2	31/44	94,5/81,3
1-10 bç	4,9/45,8	0,4/5,6	90,6/23,5	21/56,9	23/31,9	76/87,5

Tablo 3'te sırasıyla 100 bç, 50 bç ve 10 bç uzaklığa kadar olan OKB profilleri test edilmiştir. Buna göre Öklid metriğine ait ölçümlerde il 100 ve 50 bç uzaklığa ait OKB profillerinin önemli ölçüde benzer sonuçlar verdiği, profilin ilk 10 elemanı göz önüne alındığında ise bu performansın bir miktar düştüğü görülmektedir. Öklid metriğine göre en başarılı patojen tanınmanın *P. aeruginosa* genomu ile gerçekleştirildiği görülmektedir. *P. aeruginosa* izolatının sekanslanmasından elde edilen DNA okumalarının önemli kısmı (%98 civarı) doğru şekilde sınıflandırılmıştır, ancak bu oranın öbür türlerde oldukça azaldığı, hatta *E. coli* okumalarında *C. freundii* sınıflandırılması yapıma oranının *E. coli* oranından yüksek olduğu görülmüştür. Bunun dışında teste tabii tutulan diğer 5 patojenin de çoğunlukla doğru sınıflandırıldığı ve en yüksek tanıma oranına gözönünde bulundurularak patojen tanıma gerçekleştiren bir nanogözenek yazılımının *E. coli* dışındaki tüm patojenleri doğru tanıyabileceği gözlenmiştir.

OKB profillerinin en baskın elemanı olan profilin ilk elemanı (ardışık nükleotidlerin birbiri ile olan birlikteliğini ölçen OKB parametresi) gözardı edildiğinde elde edilecek sonuçlar incelendiğinde yani ilk 100 bç, 50 bç ve 10bç uzaklıklara kadar olan 99, 49 ve 9 OKB ölçümü profilleri test edildiğinde ortalama tanıma oranlarında bir önceki yaklaşıma oranla belirgin bir düşüş olmakla birlikte bu kez *E. coli* patojeninin çoğunlukla doğru tahmin edildiği ancak bu kez *Enterobacter spp.* okumalarının *C. freundii* ile karıştırıldığı görülmektedir. Bu trend maksimum ölçüm uzaklığı 10 bç uzaklığa indirildiğinde değişmekte ve yanlış tanımlanan patojen tekrar *E. coli* olarak ortaya çıkmaktadır (Ek A).

Aynı deneylerin L1 metriği ile tekrar edilmesi ile en başarılı tanıma yapılan patojenin *P. aeruginosa* olduğu görülmektedir. Öklid metriğinde gözlemlenen trende benzer şekilde *E. coli* okumalarında *C. freundii* sınıflandırılması yapıma oranının *E. coli* oranından yüksek olduğu görülmüştür. Bunun dışında teste tabii tutulan diğer 5 patojenin de çoğunlukla doğru sınıflandırıldığı ve en yüksek tanıma oranına gözönünde bulundurularak patojen tanıma gerçekleştiren bir nanogözenek yazılımının *E. coli* dışındaki tüm patojenleri doğru tanıyabileceği gözlenmiştir.

Ardışık baz çifti birlikteliğini ölçen ilk OKB elemanı elendiğinde ise (Ek A) 100 bç uzaklığa kadar elde edilen 99 bileşenli patojen tanıma metriğinin, ortalama tanıma başarısı düşmüş olsa da, tüm patojenleri en çok doğru patojen sınıflandırılacak şekilde doğru tanıyabildiği görülmektedir. Bu doğruluk trendi 50 bç profil uzaklığında hafifçe kaysa da 10 bç uzaklıktaki elemanların bulunduğu ölçümlerde de aynı şekilde gözlemlenmektedir. Bu yönüyle L1 metriği okumalar tek tek ele alındığında Öklid metriğinden daha başarısız olarak ortaya çıksa da, izolatlardan elde edilecek kolektif sonuçlarda tespiti daha doğru yapabileceği görülmektedir.

Son olarak her bir okumaya ait OKB profilinin veri tabanındaki patojen OKB imzalarına olan benzerlikleri Pearson korelasyon ölçümü ile belirlenmiş ve okumaların hangi patojene ait oldukları en büyük korelasyon ölçüsüne dayanılarak tespit edilmiştir. Ortalama tanıma başarılarının Pearson korelasyonu ile diğer iki metriğe göre daha düşük olduğu gözlenmektedir. Bununla birlikte diğer metriklerle bezer şekilde *P. aeruginosa* başarılı bir şekilde

tespit edilebilmekteyken yapılan altı farklı parametrelili deneylerde de toplu tespitlerin bu metrik ile yanlış bir şekilde yapılacağı görülmektedir. Tüm bu sonuçlar göz önüne alındığında Öklid ve L1 metriklerinin belli ölçüde başarılı olduğu ancak Pearson korelasyonunun başarılı bir patojen tanıma yeteneğinde olmadığı sonucuna erişilmektedir.

Bir hızlı patojen tanıma senaryosunda enfeksiyon unsuru/çevresel patojen ortamında izole edilebiliyor veya önemli oranda zenginleştirilebiliyor/kültürlenebiliyor ise önerilen sistem başarılı olarak kullanılabilir. Ancak birçok hızlı patojen tanıma senaryosunda kültür/zenginleştirme için zaman kısıtı olduğu ve doğrudan ortamdaki (örn. Hasta dokusu, serumu, çevresel örnek vb.) izole edilen DNA içeriğinin patojen tanıma kullanılabilirliği öngörülmekte ve bu yetiye sahip hızlı patojen tanıma sistemlerinin geliştirilmesi ihtiyacı duyulmaktadır. Bu durumda izole edilen DNA'nın yalnızca patojene ait olmaması, kommensal türlere ait DNA içeriğinin de dizileme sistemi ile elde edilmiş olması beklenmektedir. Böyle bir DNA karışımı /metagenom içeriği senaryosunda ise her bir okumanın önemli doğrulukla sınıflandırılabilirliği önem taşıyor hale gelmektedir. OKB profillerinin proje önerisinde belirtildiği ve test edildiği gibi oluşturulan veri tabanlarından belli uzaklık/benzerlik metrikleri kullanarak patojenlere sınıflandırılması dışında alternatif bir yaklaşım olarak makine öğrenme/yapay zeka teknikleri ile söz konusu DNA okumalarını daha yüksek doğrulukla tespit edebilecek zeki yazılımların üretilmesinin mümkün olup olmadığı da proje içerisinde irdelenmiştir.

3.2 OKB Profillerinin Makine Öğrenme Teknikleri ile Patojen Tanıma Kullanılması

Yürütülen 6 farklı patojene ait DNA okumalarının OKB profillerinden bir veri tabanı oluşturularak seçilen 8 farklı makine öğrenme algoritması ile bu profilleri birbirinden ayırabilecek yazılım modelleri oluşturulmuş ve ortaya çıkarılan programların performansları DNA okuması başına başarılı tespit ölçütüyle test edilmiştir.

OKB profillerinin sınıflandırması için kullanılan algoritmalar sırasıyla Naif Bayes sınıflandırıcısı (ing. Naive Bayesian), Doğrusal destek vektör makineleri (ing. Linear Support vector machines), Karesel destek vektör makineleri (ing. Polynomial -order2- Support vector machines), en yakın komşu sınıflandırıcısı (ing. 1NN algorithm), en yakın 3 komşu sınıflandırıcısı (ing. 3NN algorithm), en yakın 5 komşu sınıflandırıcısı (ing. 5NN algorithm), karar ağaçları (ing. J48 algorithm) ve rastgele orman sınıflandırıcısı (ing. Random forest classifier) olarak belirlenmiştir. Test amacıyla her bir DNA dizileme veri seti rastgele 10 parçaya ayrılarak 10 katlı çapraz geçerlilik testleri yürütülmüştür. Bu amaçla geliştirilen yazılım her model için toplam başarımlarını ROC eğrisi altında kalan alan ile ölçülmüştür. Yapılan her deneyden bir patojene 1000 DNA dizisi gelecek şekilde rastgele seçilen 6000 okuma ile yapılan ve bir önceki bölümde gerçekleştirilen testlerde yürütülen parametre seçimlerine paralel şekilde 100 bç uzaklığa kadar belirlenen OKB profilleri alınmış, profilin tamamı 50bç uzaklığa kadar olan kısmı, 10 bç uzaklığa kadar olan kısmı ve aynı profillerin ardışık baz çiftleri göz önünde bulundurulmadan elde edilen profilleri ayrı ayrı tüm sınıflandırma algoritmaları ile eğitilerek elde edilen programlar test edilmiştir (Tablo 4).

Tablo 4. OKB profillerinin makine öğrenme teknikleriyle sınıflandırılmasına ait ROC eğrisi altında kalan alan ölçümleri.

	Ardışık baz çiftleri ile			Ardışık baz çiftleri olmadan		
	1-10 bç	1-50 bç	1-100 bç	2-10 bç	2-50 bç	2-100 bç
Naif Bayes	0.822	0.818	0.81	0.805	0.812	0.806
Destek vektör makinesi (doğrusal)	0.865	0.911	0.918	0.857	0.908	0.914
Destek vektör makinesi (karesel)	0.854	0.918	0.927	0.838	0.913	0.923
En yakın komşu	0.871	0.922	0.929	0.858	0.921	0.926
En yakın 3 komşu	0.924	0.952	0.952	0.914	0.951	0.951
En yakın 5 komşu	0.939	0.96	0.959	0.933	0.959	0.958
Karar ağacı	0.84	0.833	0.832	0.835	0.836	0.832
Rastgele orman	0.96	0.974	0.974	0.955	0.973	0.974

Yürütülen testlere göre OKB profillerinin oluşturulduğu maksimum uzaklık arttıkça patojen tanıma performansında da belirgin bir artış trendi olmakta ve genel olarak ardışık baz çiftlerinin birliktelik bilgisinin de profil içerisinde bulundurulması daha başarılı karakterizasyona yol açmaktadır. Rastgele orman algoritması ile oluşturulan patojen tanıma programı deneyleri yapılan bakteri paneli içerisinde nanogözenek dizilemesi ile

okunmuş herhangi bir rastgele DNA parçasının ortalama %97,4 başarıyla hangi patojene ait olduğunun tespit edilebilmektedir. Bu sonuçlar ile, kültür olmaksızın ortamdan izole edilen DNA'dan enfeksiyon etkeni bir patojenin veya çevresel bir örnek içerisinde bulunan bir patojenin doğrulukla tespit edilebilmesinin mümkün olduğu, nanogözenek dizilemesi ve oluşturulan OKB profili temelli biyoinformatik yöntemin bu tespit için önemli potansiyel taşıdığı yargısına varılabilir.

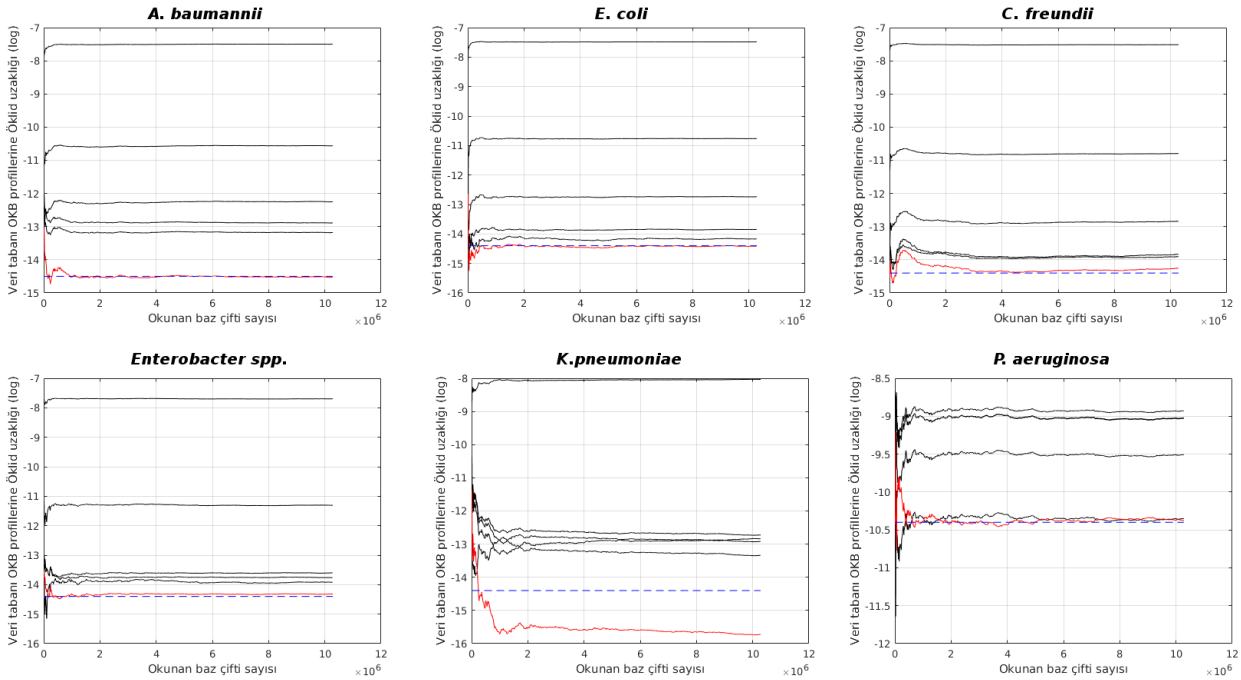
DNA içerisindeki uzak korelasyonlar ve türe özgünlük

Yapılan testlerde elde edilen ilginç yan bulgulardan biri OKB profillerinde uzak nükleotid çiftlerinin birliktelik bilgisinin de patojen tanıma başarımını arttırdığı gözlemdir. Yukarıda sunular sonuçlar ele alındığında belli durumlarda genom içerisindeki 50 nükleotidden daha uzakta bulunan baz çiftlerinin arasındaki uzak korelasyonlar da tanıma başarısına katkıda bulunabilmektedir. Buradan hareketle bakteriyel genomlar içerisindeki belli uzaklıktaki nükleotid çiftlerinin arasında dahi türe özgü korelasyonlar olduğu öne sürülebilir. Bu durumu gözlemlemek amacıyla orta-uzak korelasyonları ele alan, yani ilk 20 OKB bileşenini kullanmayan, yalnızca 20 bç uzaklıktan 100bç uzaklığa kadar uzak nükleotid çiftlerinin birlikteliğini ölçen OKB profilleri kullanılarak rastgele orman algoritması ile patojen tanıma programı daha önceki prosedüre benzer şekilde tekrarlanmıştır. Elde edilen 0.958 değere sahip ROC alanı, orta-uzak nükleotid çiftlerinin benzerliğinin de türe özgü olup genom içerisinde korunduğunu işaret etmektedir.

Aynı deney uzak nükleotid çiftlerinin benzerliği için tekrarlandığında, yani birbirinden 90 nükleotidden daha uzak baz çiftleri kullanılarak tanıma deneyi yapıldığında yine 0.9 ROC alanı üzerinde bir başarımla sınıflandırma elde edildiği görülmektedir. Dolayısıyla orta-uzak nükleotid korelasyonları için elde edilen yargıya uzak nükleotidler için de varmak mümkün görünmektedir.

3.3 Hızlı Patojen Tanıma Performansı

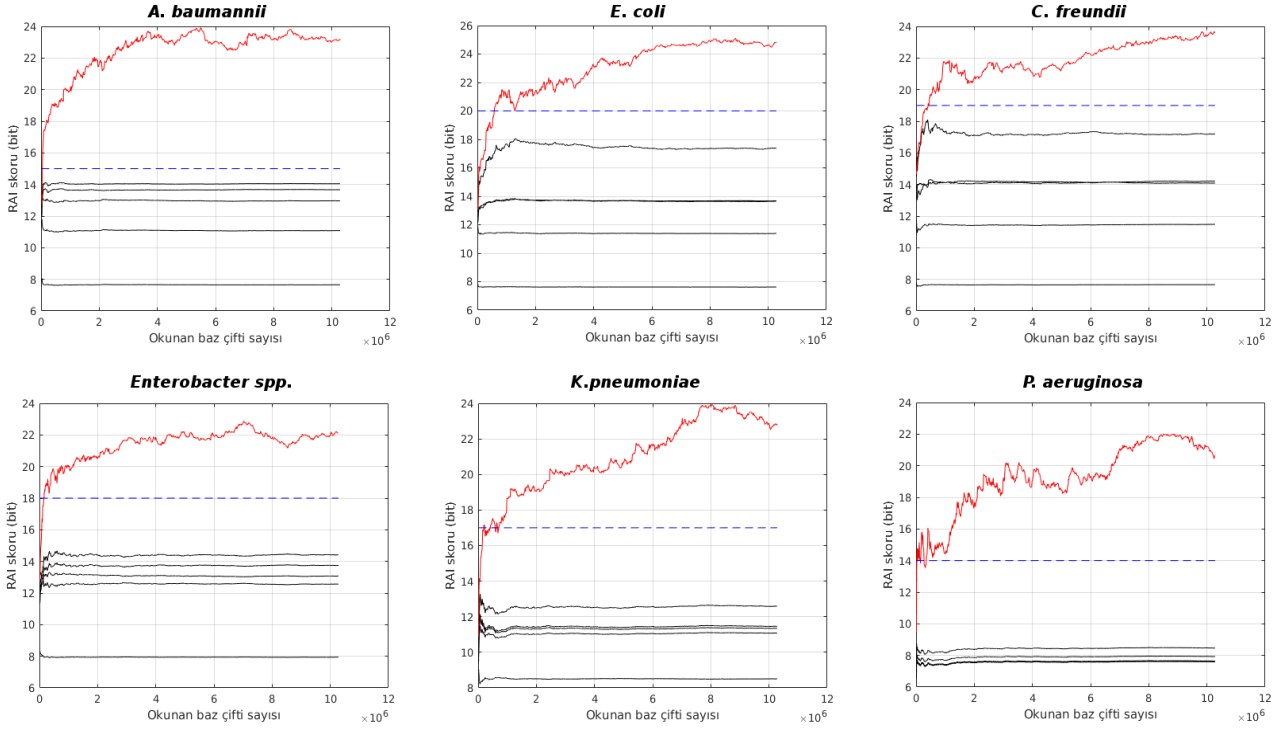
Geliştirilen OKB ve RAI temelli patojen tanıma yöntemlerinin DNA okuma tanınması performansı göz önünde bulundurularak yapılan deneylerde yeterli çoklukta dizileme verisinin bulunması halinde patojenlerin başarılı bir şekilde tespit edilebileceği yapılan deneylerle tespit edilmiştir. Proje kapsamında elde edilen patojen dizilerinin üretilme kaydı MinION cihazının sürücü yazılımı olan MinKNOW sistemi ile kayıt altına alınmış ve her saniye okunan DNA dizileri zaman imzaları (saniye:dakika:saat:gün:ay:yıl) şeklinde arşivlenmiştir. Bu sayede retrospektif simülasyon mümkün olmuş ve dizilenen patojenlerin güvenli olarak tespit edilebilme süreleri elde edilmiştir. OKB ve RAI skorlarının dizileme süreci boyunca değişimine ait grafikler şekil 3-4'te görülmektedir. Buna göre dizilenen her bir patojenin eldeki veri tabanındaki patojen modellerine OKB profili uzaklıklarının (veya RAI skorlarının) değişimi toplan okunan baz çifti cinsinden verilmiş ve her patojen için yaklaşık güvenli tespit eşik değeri belirlenmiştir. Bu değer seçilirken yanlış modellerin erişemediği ve doğru modelin erişimden sonra en az 1 saat dizileme süresi boyunca güvenli bölgede kaldığı sınır değerler kriter olarak belirlenmiştir. Daha sonra doğru modelin bu kritik değere erişim süresi patojen tanıma süresi olarak belirlenmiştir.



Şekil 3. OKB profillerinin dizileme süreci boyunca veri tabanındaki ortalama profillere yakınsama grafiği. Kırmızı: hedef organizma, kesikli mavi: belirlenen kritik değer.

OKB profilleri göz önüne alındığında *A.baumannii*'nin yaklaşık 1.2 Mbç okuma sonucunda (8.64 dakika), *E. coli*'nin 2.6 Mbç okuma sonucunda (17.72 dakika), *C. freundii*'nin 4.3 Mbç okuma sonucunda (32.9 dakika), *Enterobacter spp.*'in 1.9 Mbç okuma sonucunda (13.7 dakika), *K. pneumoniae*'nin 5.1 Mbç okuma sonucunda (37.4 dakika), *P. aeruginosa*'nın 270 Kbç okuma sonucunda (1.9 dakika) güvenli olarak tespit edildiği görülmüştür.

Aynı simülasyon RAI tabanlı algoritma üzerinde yürütüldüğünde ise RAI skorlarının OKB profillerine oranla daha hızlı bir şekilde yakınsadığı ve test edilen patojeni güvenli olarak tespit ettiği görülmüştür (Şekil 4).



Şekil 4. RAI skorlarının dizileme süreci boyunca veri tabanındaki ortalama profillere yakınsama grafiği. Kırmızı: hedef organizma, kesikli mavi: belirlenen kritik değer.

RAI tabanlı hızlı patojen tanıma sonuçlarına göre *A.baumannii*, *Enterobacter spp.* 1 dakikanın altı sürelerde tespit edilebilirken *E. coli*'nin 1.2 Mbç okuma sonucunda (8.24 dakika), *C. freundii*'nin 320 Kbç okuma sonucunda (2.3 dakika), *K. pneumoniae*'nin 410 Kbç okuma sonucunda (2.85 dakika), *P. aeruginosa*'nın 240 Kbç okuma sonucunda (1.72 dakika) güvenli olarak tespit edildiği görülmüştür.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma ile henüz yeni bir teknoloji olarak kullanılmaya başlayan ve yeni nesil DNA dizileme teknolojilerinin 3. nesili olarak kabul edilen nanogözenek dizilemesinin bir hızlı patojen tanıma aracı olarak kullanılma potansiyelini ortaya çıkarma ve bu potansiyeli işler hale getirebilecek biyoinformatik yaklaşımlarının ve algoritmaların geliştirilmesi amaçlanmıştır. Enfeksiyon etkeni veya çevresel patojen olan mikrobiyal organizmaların moleküler tekniklerle tespiti geçtiğimiz on yıllarda klinik mikrobiyolojinin ilgi odağı haline gelen konulardan biri olmuştur [8-10]. Moleküler teknikleri cazip kılan özelliklerden biri birçok uygulamada kültürlemeyi ortadan kaldırabiliyor olmasıdır. Kültür aşaması azımsanamayacak bir sıklıkta hedeflenen bakterilerin ürememesi gibi sorunlar doğurduğu gibi, başarılı olduğu durumlarda dahi uzun süren kuluçka süreçleri ile hızlı patojen tespitini imkansız kılmaktadır. Günümüzde kabul gören moleküler patojen tespiti tekniklerinin önemli kısmı hedeflenmiş bölgelerin polimeraz zincir reaksiyonları ile çoğaltılması ve/veya bu bölgelerin dizilenerek karakterize edilmesine dayanmaktadır. Bu yaklaşım çeşitli hassasiyet ve özgüllük problemleri taşıdığı gibi önceden rastlanmamış susların primer dizileri tasarlanmamış olduğundan sözkonusu patojen tespitlerini sağlayamamaktadır. Öte yandan yeni nesil dizileme teknolojileri ulaşılabilir maliyet ile tüm genom dizilemelerini olanaklı kılmakta ve diğer moleküler tekniklerinin dezavantajlarından bu yönüyle sıyrılabilir. Ancak mevcut 2. nesil DNA dizileme teknolojileri, temelinde bulunan teknik gereği dizilemenin (kimyasal reaksiyonların) tamamı bitirilmeden okunan dizileri çıktı olarak verememektedir. Bu çevrimdışı prosedür çoğunlukla 2-3 gün arası bir süreç aldığından yine mevcut 2. nesil teknolojiler ile hızlı patojen tanıma teknikleri ve prosedürleri geliştirmek teknolojinin şu anki evresinde mümkün görünmemektedir. Bununla beraber şu an yeni yaygınlaşmaya başlayan 3. nesil nanogözenek

dizilemesi ve günümüzdeki tek teknolojik uygulaması olan Oxford Nanopore sistemleri gerçek zamanlı dizilemeyi ve DNA'nın okunduğu anda işlenebilmesini olanaklı kılmaktadır [35,36]. Bu özellik sayesinde gerçek zamanlı hızlı patojen tanıma tekniklerinin geliştirilmesi bu teknoloji ile olanaklı olmuştur.

Nanogözenek dizilemesi okuma ve hata yapma karakteri açısından mevcut 2. nesil DNA dizileme teknolojilerinden önemli ölçüde ayrılmaktadır. 2. nesil teknolojilere göre daha uzun DNA parçalarından oluşan okumalar üretilebilirken hata oranı mevcut teknolojilere göre oldukça yüksek olabilmektedir [8, 10]. Dolayısıyla 2. nesil dizileme teknolojileri için geliştirilen patojen tanıma amaçlı biyoinformatik teknikler nanogözenek dizilemesinde etkisiz kalabilmektedir. Bu sebeple uzun okuma dizilerinden faydalanabilen, aynı zamanda yüksek okuma hata oranlarına dayanıklı yeni nesil tekniklere ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylerde tamamı hizalanabilen okumaların nükleotid varyasyonlarına göre hata oranı ortalama olarak %8,71 +/- 2.35 olarak bulunmuştur. Bu oran şu an literatürde rapor edilen hata oranına benzer olmakla beraber şu an için ikinci nesil DNA dizileme teknolojileri için tasarlanmış olan taksonomik analiz ve tanıma programlarının ve benzeri biyoinformatik yöntemlerin patojen tanıma gibi görevler için yetersiz kalabileceğine işaret etmektedir. Çalışma kapsamında geliştirilen ve test edilen biyoinformatik yöntemler hatalı okuma oranının nispeten yüksek olduğu senaryolarda da başarılı tanıma gerçekleştirebilecek dayanıklı örüntü tanıma yaklaşımları olarak tasarlanmıştır.

Yapılan çalışmada uzun okuma dizilerinin avantajı yanında yüksek okuma hata oranlarına dayanıklılık potansiyeli taşıyan iki farklı teknik olarak OKB profilleri ve RAI endeksleri tabanlı algoritmalar geliştirilip hızlı patojen tanıma deneylerinde test edilmişlerdir. Deney amacıyla klinikte yüksek sıklıkla gözlenen 6 farklı patojen izolatı MinION sisteminde dizilerek elde edilen iki farklı program varyasyonunda bu patojenlerin tanınabilme performansları ölçülmüştür. OKB profilleri üzerinden gerçekleştirilen standart metrik ölçümleri ile toplu dizileme seviyesinde başarılı patojen tanıma sağlanırken her bir dizilenen DNA parçasının başarılı olarak sınıflandırılması gereken senaryolarda yüksek bir tespit doğruluğu gözlenmemiştir. Bunun başlıca sebebinin OKB profillerindeki varyasyon olduğu ve bu varyasyonun nanogözenek dizileme teknolojisine özgü okuma hatalarının yanısıra her bir türün içsel dinamikleri ve genom dizi yapısından kaynaklandığı öngörülmüştür. Dizileme deneyleri sonucunda elde edilen ortalama OKB profilleri gözönüne alındığında oluşan profillerin farklı bit düzeylerinde ortaya çıktığı ve genom içerisindeki varyasyonların genişliği hesapta bulundurulmuş başarılı tanıma yapabileceği potansiyeli olduğu öne sürülmüştür. Dolayısıyla, elde edilen sonuçlar itibarı ile RAI endeksi tabanlı patojen tanıma sisteminin OKB tabanlı sisteme göre belirgin ölçüde daha başarılı olduğu çıkarımına varılmaktadır. OKB tabanlı sistem tek bir patojen organizmadan oluşan izolatlar üzerinde etkili olabilirken, tanıma yeteneği kültür bağımsız metagenom örnekleri içerisindeki patojenleri tanımak için yeterli olmamaktadır. Bununla beraber RAI endeksleri tabanlı programın bir organizma karışımı içerisindeki DNA dizilerinin hangi organizmalara ait olduğunu teker teker belirleme yeteneği, dolayısıyla kültür bağımsız örnekler üzerinde kullanılma olanağı daha fazladır.

Test edilen patojen örnekleri içerisinde *P. aeruginosa* ve *A. baumannii*'nin genellikle yüksek doğrulukla tespit edilebildiği görülmektedir. Bu durum geri kalan patojenlerin aynı aileden olması (*Enterobacteriaceae*) ve filogenetik benzerliklerinin genom üzerinden oluşturulan OKB ve RAI profillerinde de benzerliğe sebep olması dolayısıyla diğer türlerin birbirlerinden daha zor ayrıştırılması ile açıklanabilir.

OKB tabanlı yaklaşım her ne kadar profil benzerliği/uzaklığı metrikleri ile kullanıldığında yüksek başarımlarına ulaşmasa da OKB profillerinin içsel özelliklerini verilen örneklerden çıkarımsayarak otomatik modeller oluşturan makine öğrenme teknikleri kullanıldığında OKB tabanlı patojen tanıma algoritmalarının ortaya atılabildiği gözlenmiştir. Bu duruma karşılık aslında bu profillerin patojene özgü öznelikleri yeterince temsil ettiği, ancak tanıma algoritmalarının yeterince karmaşık olmadığı savı ortaya atılabilir. RAI endeksine dayanan algoritma herhangi bir temsil profili oluşturmadığından ve doğrudan bir endeks skoru kullandığından bu algoritma ile makine öğrenmesine tabi tutulacak bir geliştirilme sağlanamamıştır. Ancak makine öğrenme tekniklerinin patojen tanıma doğruluğu açısından getirmiş olduğu dramatik artış, bu yaklaşımlara dayanan yeni nesil hızlı patojen tanıma teknikleri açısından büyük bir potansiyel olabileceğine işaret etmektedir.

Patojen tanıma sürelerinin ölçüldüğü simülasyonlarda test edilen 6 patojen türünün de bir saatten kısa sürede, hatta çoğunlukla dizileme prosedürü başladıktan sonra dakikalar içerisinde doğrulukla tespit edilebildiği görülmüştür. Bu gözlem sonucunda nanogözenek dizilemesinin kullanılarak hayati önem taşıyan kısa sürelerde klinik suşların tanınması, çevresel patojenlerin ve salgınların tespit edilmesinde etkili ve geçerli bir teknoloji olabileceği öne sürülebilir. Bununla birlikte kısa sürede tanımanın yapılması, MinION cihazının akış hücrelerinin tekrar kullanılabilir olduğu da göz önüne alındığında örnek başına maliyeti düşük olan fizibilitesi yüksek sistemlerin oluşturulabileceğini göstermektedir.

Çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar hızlı patojen tanıma konusunda olumlu sinyaller vermekle birlikte, bu sonuçların deneyler kapsamında incelemeye tabi tutulan 6 patojen suş için geçerli olduğunu unutmamak

gerekmektedir. Daha genel yargıların ortaya atılabilmesi için daha geniş patojen panelleri kullanılarak geniş çaplı çalışmaların yürütülmesi gerekmektedir. Geniş patojen panellerinin göz önünde bulundurulmasıyla birlikte elde edilen doğruluk sonuçlarında azalma görülmesi olasılık dahilinde bulunmakla beraber bunun ne ölçüde olacağını kestirilmesi oldukça güçtür. Yine de bu olasılık, nanogözenek dizilemesinin hızlı ve yüksek doğrulukla patojen tanıma platformu olma potansiyelini gölgelemektedir.

Çalışma kapsamında önerilen OKB profili ve RAI tabanlı algoritmaların hızlı patojen tanıma konusunda yeterli doğruluk seviyesinde ve kısa sürede tanıma yapabilecek hızda olduğu nanogözenek dizilemesi yapılan patojen paneli üzerinde gösterilmiştir. Önerilen yaklaşımların mevcut programlarla rekabet edebilen performansta olduğu yapılan testlerle görülmektedir. Gelişmekte olan nanogözenek DNA dizileme teknolojileri sahaya taşınabilen küçük portatif cihazlar olarak geliştirilmektedir. Dolayısıyla sahada örnek toplayıp sekanslamasının yapılması mümkün kılınmıştır. Ancak biyoinformatik analiz genellikle yüksek performanslı bilgisayarlar ve genel ağ bağlantısı gerektiren sistemlerden oluşmaktadır. Önerilen biyoinformatik algoritmalar yüksek profilli sistem gereksinimi olmayan ve çevrimiçi veri tabanları ile bağlantı kurularak gerektirmeyen hafif sistemler olarak tasarlanmıştır. Bu sayede mobil hesaplayıcılar (örn. Tablet bilgisayar, akıllı telefon, gömülü sistemler vb.) sistemler kullanılarak sahada patojen tanıma yapılması bu projede geliştirilen ve benzer doğrultuda tasarlanan sistemler için mümkün görünmektedir.

Hızlı patojen tanımanın kısıtlı sürede, en az donanımla ve laboratuvar dışında da yapılabilmesi için dizileme ve biyoinformatik aşamaları dışında örnek hazırlama sürecinin de hızlı ve minimum kaynak gereksinimli bir hale gelmesi gerekmektedir. Mevcut koşullarda örnek hazırlama süreçleri (örn. Kültür, DNA izolasyonu, sekanslama prosedürleri) laboratuvar dışında yapılamamaktadır. Ancak geliştirilmekte olan yeni nesil sistemlerle mobil veya hızlı örnek hazırlama cihazlarının yakın bir gelecekte ulaşılabilir olacağı düşünülmektedir. Bu doğrultuda söz konusu yeni nesil teknolojilerin kısa bir süre sonra rutin analizlere de yansması beklenmektedir.

Mevcut algoritmalar yalnızca bir patojenin taksonomik olarak kısa bir sürede tanımlanması için tasarlanmıştır. Öte yandan bu görevi üstlenen nanogözenek dizilemesinin aslında bir tüm genom dizileme tekniği olması, taksonomik tanıma ötesinde patojen karakterizasyonunun tasarlanan başka biyoinformatik süreçlerle mümkün olabileceğine işaret etmektedir. Örneğin incelenen patojenin içerdiği antibiyotik direnç genlerinin tespit edilmesi ve bunun gerçek zamanlı bir şekilde yapılması kısa sürede tedavi tercihlerinin şekillendirilmesi gereken vakalarda oldukça yararlı olabilir. Bu amaca yönelik yeni nesil biyoinformatik algoritmalarının geliştirilmesinin çalışma kapsamında ele alınan alan için önemli bir genişleme olacağı düşünülmektedir.

Teşekkür

Sunulan makale TÜBİTAK ARDEB 1002 programı kapsamında 116S083 numaralı "Nanogözenek DNA Dizilemesi ile Hızlı Patojen Tanıma Yapabilen Algoritmaların Geliştirilmesi" başlıklı projeden üretilmiştir. Desteğinden dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] Spížek J., Novotná J., Rezanka T., Demain A. L. 2010. Do we need new antibiotics? The search for new targets and new compounds. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.*, 37, 1241–1248.
- [2] Fauci A. S., Touchette N. A., Folkers G. K. 2005. Emerging infectious diseases: a 10-year perspective from the National institute of allergy and infectious diseases. *Emerging Infect. Dis.* 11, 519–525.
- [3] Maurer, J. J. 2011. Rapid detection and limitations of molecular techniques. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2, 259-279.
- [4] Lazcka, O., Del Campo, F. J., Munoz, F. X. 2007. Pathogen detection: A perspective of traditional methods and biosensors. *Biosensors and bioelectronics*, 22(7), 1205-1217.
- [5] Erlich Y. 2015. A vision for ubiquitous sequencing. *Genome Res.*, 25, 1411-1416.
- [6] Stoddart D., Heron A. J., Mikhailova E. vd. 2009. Single-Nucleotide Discrimination in Immobilized DNA Oligonucleotides with a Biological Nanopore. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106, 7702–7707.
- [7] Kasianowicz J. J., Brandin E., Branton D., Deamer D. W. 1996. Characterization of individual polynucleotide molecules using a membrane channel. *Proc Natl Acad Sci*, 93(24), 13770–13773.

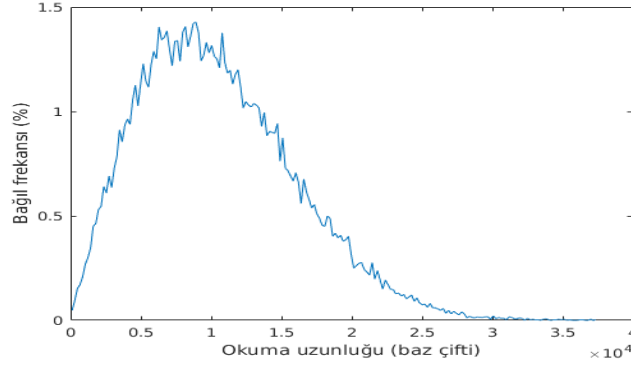
- [8] Quick J., Quinlan A., Loman N. 2014. A reference bacterial genome dataset generated on the MinION(TM) portable single-molecule nanopore sequencer. *GigaScience*, 3:22.
- [9] Loman N. J., Quick J., Simpson J. T. 2015. A complete bacterial genome assembled de novo using only nanopore sequencing data. *Nat. Methods*, 12, 733–735.
- [10] Mikheyev A. S., Tin M. M. 2014. A first look at the Oxford Nanopore MinION sequencer. *Mol. Ecol. Resour.*, 14, 1097–1102.
- [11] Greninger A. L., vd. 2015. Rapid metagenomic identification of viral pathogens in clinical samples by real-time nanopore sequencing analysis. *Genome Medicine*, 7 (1), 99.
- [12] Bull, R. A., Adikari, T. N., Ferguson, J. M., Hammond, J. M., Stevanovski, I., Beukers, A. G., Deveson, I. W. 2020. Analytical validity of nanopore sequencing for rapid SARS-CoV-2 genome analysis. *Nature communications*, 11(1), 1-8.
- [13] Li, J., Wang, H., Mao, L., Yu, H., Yu, X., Sun, Z., Wang, X. 2020. Rapid genomic characterization of SARS-CoV-2 viruses from clinical specimens using nanopore sequencing. *Scientific Reports*, 10(1), 1-10.
- [14] Kielbasa S. M, Wan R., Sato K., Horton P., Frith M. C. 2011. Adaptive seeds tame genomic sequence comparison. *Genome Res.*, 21(3), 487–93.
- [15] Madoui M. A., Engelen S., Cruaud C., Belser C., Bertrand L., Alberti A., vd. 2015. Genome assembly using Nanopore-guided long and error-free DNA reads. *BMC Genom.*, 16:327.
- [16] Wang J., Moore N., Deng Y., Eccles D., Hall R. 2015. MinION nanopore sequencing of an influenza genome. *Front Microbiol*, 6: 766.
- [17] Karlsson E., Lärkeryd A., Sjödin A., vd. 2015. Scaffolding of a bacterial genome using MinION nanopore sequencing. *Sci Rep.*, 5: 11996.
- [18] Judge K., Harris S. R., Reuter S., Parkhill J., Peacock S. J. 2015. Early insights into the potential of the Oxford Nanopore MinION for the detection of antimicrobial resistance genes. *J. Antimicrob. Chemother.*, 70, 2775–2778.
- [19] Risse J., Thomson M., Blakely G., Koutsovoulos G., Blaxter M., Watson M. 2015. A single chromosome assembly of *Bacteroides fragilis* strain BE1 from illumina and MinION nanopore sequencing data. *BioRxiv*, 024323.
- [20] Jain M. vd., 2015. Improved data analysis for the MinION nanopore sequencer. *Nat. Methods*, 12, 351–356.
- [21] Nalbantoglu O. U., Sayood K. 2011. Computational Genomics Signatures. *Synthesis Lectures on Biomedical Engineering*, 6(2), 1-129. Morgan-Claypool Publishers, 129 sayfa.
- [22] Brady S. S. vd. 2009. Phymm and PhymmBL: metagenomic phylogenetic classification with interpolated markov models. *Nat Methods*, 6, 673–676.
- [23] Nalbantoglu O. U., 2011. Computational Genomic Signatures and Metagenomics. Ph.D. Dissertation, University of Nebraska-Lincoln, 201 s, Lincoln, Nebraska, ABD.
- [24] Otu H., Sayood K. 2003. A divide and conquer approach to sequence assembly. *Bioinformatics*, 19, 22–29.
- [25] Bauer M., Schuster S. M., Sayood K. 2008. The average mutual information profile as a genomic signature. *BMC Bioinformatics*, 9, p. 48.
- [26] Nalbantoglu O. U., Way S., Hinrichs S., Sayood K. 2011. “RAIphy: Phylogenetic classification of metagenomics samples using iterative refinement of relative abundance index profiles. *BMC Bioinformatics*, 12(41).
- [27] Bazinet A. L., Cummings M. P. 2012. A comparative evaluation of sequence classification programs. *BMC Bioinformatics* 13: 92.
- [28] Rish I. 2001. An empirical study of the naive Bayes classifier”, *IJCAI Workshop on Empirical Methods in AI*. 4-6 Ağustos 2001, Seattle, ABD. Vol. 3, No. 22, pp. 41-46.
- [29] Vapnik, V. 1995. Support-vector networks. *Machine Learning*. 20 (3): 273–297
- [30] Altman, N. S. 1992. An introduction to kernel and nearest-neighbor nonparametric regression. *The American Statistician*. 46 (3): 175–185.
- [31] Utgoff, P. E., 1989. Incremental induction of decision trees. *Machine learning*, 4(2), 161-186.
- [32] Leo B., 2001. Random Forests. *Machine Learning*. 45 (1): 5–32.

- [33] Li, H., 2016. Minimap and miniasm: fast mapping and de novo assembly for noisy long sequences. *Bioinformatics*, 32(14), 2103-2110.
- [34] Wood, D. E., Salzberg, S. L., 2014. Kraken: ultrafast metagenomic sequence classification using exact alignments. *Genome biology*, 15(3), R46.
- [35] Hayden E. C. 2015. Pint-sized DNA sequencer impresses first users. *Nature* 521, 15-16.
- [36] Feng Y., Zhang Y., Ying C., Wang D., Du C. 2015. Nanopore-based fourth-generation DNA sequencing technology. *Genomics Proteomics Bioinformatics*, 13, 4-16.

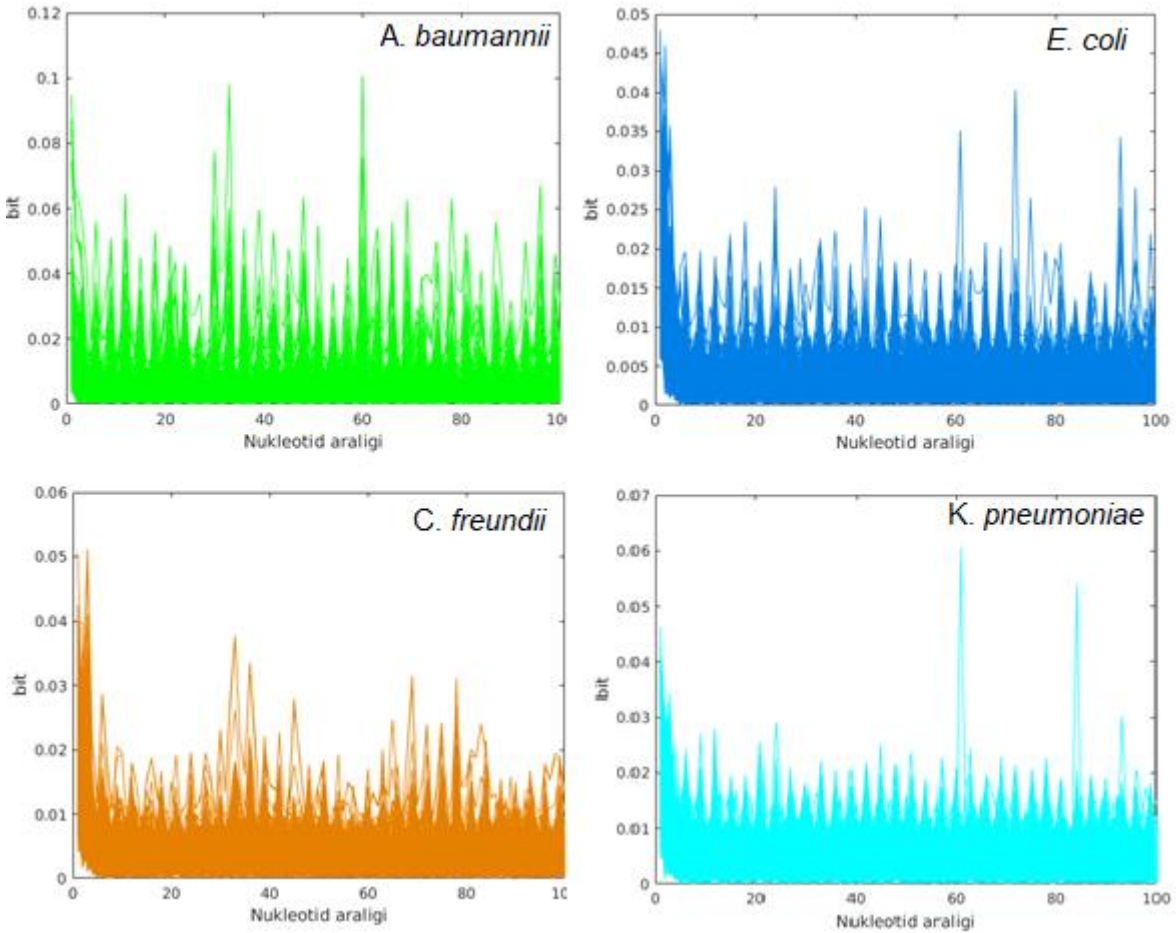
Ekler

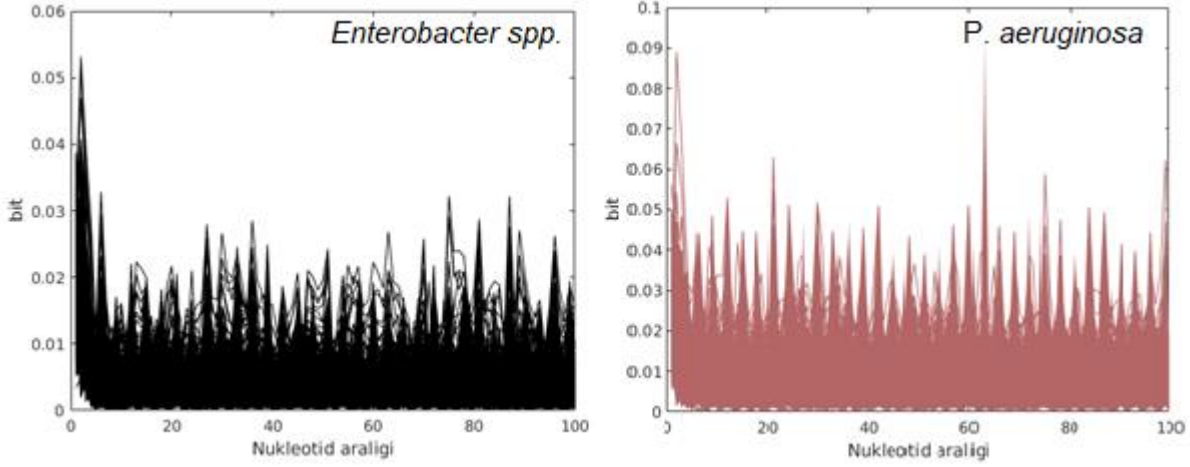
Ek A. Yardımcı sonuçlar

OKB profillerinin sınıflandırılmasına ait karışıklık matrisleri. Nanogözenek dizilemesi sonucunda elde edilen okuma uzunluğu histogramı. Dizileme sonucu ortaya çıkan okumalara ait OKB profilleri

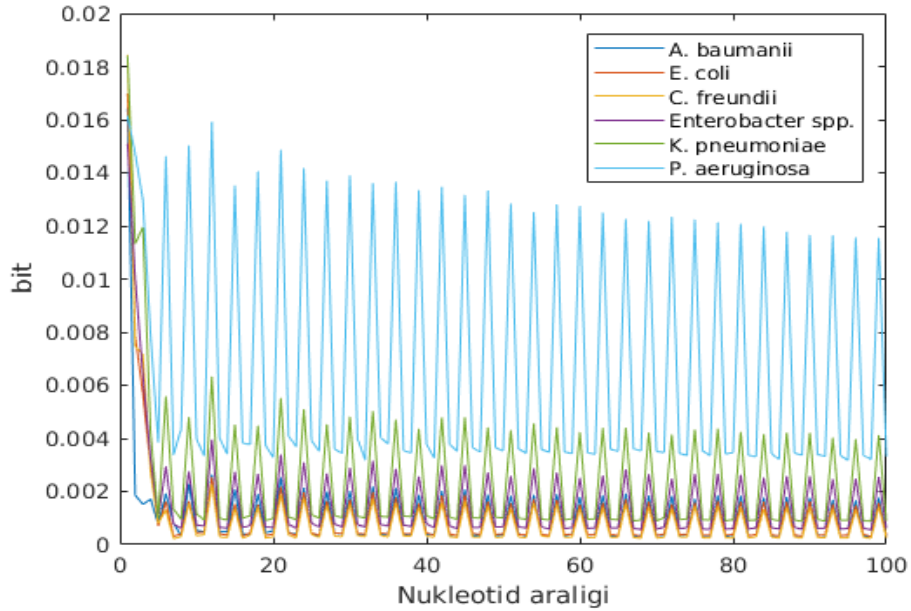


Şekil Ek 1. Nanogözenek dizilemesi sonucunda elde edilen okuma uzunluğu histogramı. Deneyler sonucunda elde edilen okuma uzunlukları histogram olarak sunulmaktadır. Buna göre okuma uzunluğu dağılımının ortalanın sağına eğimli olduğu görülmektedir.





Şekil Ek 2. Dizileme sonucu ortaya çıkan okumalara ait OKB profilleri. Tanıma için belirlenmiş altı patojene ait nanogözenek dizilemesi sonucunda elde edilen DNA okumaları ayrı ayrı OKB profillemesine tabii tutulmuş ve bu profillerin patojen tanıma algoritmalarındaki performansları test edilmiştir. Şekillerde her patojene ait elde edilen her bir DNA okuması için 1bç'den 100 bç uzaklığa kadar olan baz çiftlerinin oluşturduğu OKB profilleri görülmektedir. Profillerde OKB karakteristiği genel olarak korunsa da DNA dizileme hata oranının yüksek bir varyasyon oluşturduğu ve profilleri yerel ölçekte bozunuma uğrattığı görülmektedir.



Şekil Ek 3. Dizilenen DNA okumalarının ortalama OKB profilleri.

Tablo Ek 1. OKB profillerinin Öklid metriği kullanılarak sınıflandırılmasına ait karışıklık matrisleri.

Öklid Metriği (1-100 bç)						
	<i>A. baumannii</i>	<i>E. coli</i>	<i>C. freundii</i>	<i>Enterobacter spp.</i>	<i>K. pneumoniae</i>	<i>P. aeruginosa</i>
<i>A. baumannii</i>	55.6	6.6	7.9	5.1	0.6	24.2
<i>E. coli</i>	5	25.7	36.3	21.3	11.3	0.4
<i>C. freundii</i>	1.6	19.2	62.3	6.4	5.3	5.2
<i>Enterobacter spp.</i>	9.6	15.4	3.5	52.4	14.4	4.7
<i>K. pneumoniae</i>	5.4	10.7	2.1	25.4	48	8.4
<i>P. aeruginosa</i>	0.5	0	0	0.6	0	98.9
1-50 bç						
	<i>A. baumannii</i>	<i>E. coli</i>	<i>C. freundii</i>	<i>Enterobacter spp.</i>	<i>K. pneumoniae</i>	<i>P. aeruginosa</i>
<i>A. baumannii</i>	57.9	6	9	3.5	0.3	23.3
<i>E. coli</i>	5.5	23.6	38.5	17.4	15	0
<i>C. freundii</i>	1.3	17.4	63.4	8	5.6	4.3
<i>Enterobacter spp.</i>	11.4	16.2	3.1	50	16.8	2.5
<i>K. pneumoniae</i>	5.7	10.7	2.1	21.7	50.9	8.9
<i>P. aeruginosa</i>	1.1	0	0	0.3	0	98.6
1-10 bç						
	<i>A. baumannii</i>	<i>E. coli</i>	<i>C. freundii</i>	<i>Enterobacter spp.</i>	<i>K. pneumoniae</i>	<i>P. aeruginosa</i>
<i>A. baumannii</i>	41.1	4.1	18.5	10.8	9.1	16.4
<i>E. coli</i>	5.9	18.1	44.6	8.1	21.8	1.5
<i>C. freundii</i>	1.8	14.4	64	9.5	6.7	3.6
<i>Enterobacter spp.</i>	12.7	16.3	7	44.1	16.7	3.2
<i>K. pneumoniae</i>	5.9	12.9	2.8	18.9	50.4	9.1
<i>P. aeruginosa</i>	2.1	0	0	0.1	0.3	97.5

Tablo Ek 2. OKB profillerinin Öklid metriği kullanılarak sınıflandırılmasına ait karışıklık matrisleri (ardışık baz çiftlerinin birlikteliği olmadan).

Öklid Metriği (2-100 bç)						
	<i>A. baumannii</i>	<i>E. coli</i>	<i>C. freundii</i>	<i>Enterobacter spp.</i>	<i>K. pneumoniae</i>	<i>P. aeruginosa</i>
<i>A. baumannii</i>	57.2	6.1	0	4.8	1.5	30.4
<i>E. coli</i>	5.2	40.5	26.8	9.2	12.7	5.6
<i>C. freundii</i>	2.1	19.7	55.6	6.1	10.1	6.4
<i>Enterobacter spp.</i>	6.4	31.3	8.6	28.6	15.4	9.7
<i>K. pneumoniae</i>	4.6	13.6	11.5	12.4	48.5	9.4
<i>P. aeruginosa</i>	22	0.8	0	2.4	0.1	74.7
2-50 bç						
	<i>A. baumannii</i>	<i>E. coli</i>	<i>C. freundii</i>	<i>Enterobacter spp.</i>	<i>K. pneumoniae</i>	<i>P. aeruginosa</i>
<i>A. baumannii</i>	64	2.4	0	5.1	1.1	27.4
<i>E. coli</i>	6.6	36.4	26.8	13	12.2	5
<i>C. freundii</i>	3.6	18	54	9.2	9.8	5.4
<i>Enterobacter spp.</i>	7.9	29	9.4	27.4	17.5	8.8
<i>K. pneumoniae</i>	4.8	9.1	11.6	14.9	51.6	8
<i>P. aeruginosa</i>	21.4	0.4	0	2.3	0	75.9
2-10 bç						
	<i>A. baumannii</i>	<i>E. coli</i>	<i>C. freundii</i>	<i>Enterobacter spp.</i>	<i>K. pneumoniae</i>	<i>P. aeruginosa</i>
<i>A. baumannii</i>	53.4	2.8	0.5	10.2	6.2	26.9
<i>E. coli</i>	10.6	16.1	27.7	18.3	24.3	3
<i>C. freundii</i>	4.1	15.3	47	11.6	17.2	4.8
<i>Enterobacter spp.</i>	9.8	22.3	13.3	30.3	17.1	7.2
<i>K. pneumoniae</i>	7.5	5.8	12.2	14.8	53.8	5.9
<i>P. aeruginosa</i>	17.7	0.1	0	3.3	0.8	78.1

Tablo Ek 3. OKB profillerinin L1 metriği kullanılarak sınıflandırılmasına ait karışıklık matrisleri.

L1 Metriği (1-100 bç)						
	<i>A. baumannii</i>	<i>E. coli</i>	<i>C. freundii</i>	<i>Enterobacter spp.</i>	<i>K. pneumoniae</i>	<i>P. aeruginosa</i>
<i>A. baumannii</i>	52.2	6.7	7.9	10.3	1.7	21.2
<i>E. coli</i>	4.4	34.3	35.6	12.2	10.4	3.1
<i>C. freundii</i>	1.7	17.1	63.3	4.6	5.4	7.9
<i>Enterobacter spp.</i>	5.7	15.6	4.1	50.4	16.5	7.7
<i>K. pneumoniae</i>	4.6	10	2.3	25.1	46.9	11.1
<i>P. aeruginosa</i>	8.7	0	0	5.6	0.3	85.4
1-50 bç						
	<i>A. baumannii</i>	<i>E. coli</i>	<i>C. freundii</i>	<i>Enterobacter spp.</i>	<i>K. pneumoniae</i>	<i>P. aeruginosa</i>
<i>A. baumannii</i>	61.4	6.6	9.1	4.2	0.5	18.2
<i>E. coli</i>	5.8	23	37.8	21.4	11.1	0.9
<i>C. freundii</i>	1.5	15.7	64.6	5.9	6.9	5.4
<i>Enterobacter spp.</i>	7.8	15.6	3.8	49.4	18.2	5.2
<i>K. pneumoniae</i>	5.1	10.8	2	23.4	51.2	7.5
<i>P. aeruginosa</i>	2.7	0	0	3.3	0.1	93.9
1-10 bç						
	<i>A. baumannii</i>	<i>E. coli</i>	<i>C. freundii</i>	<i>Enterobacter spp.</i>	<i>K. pneumoniae</i>	<i>P. aeruginosa</i>
<i>A. baumannii</i>	44.3	4.5	15.8	10.6	8.8	16
<i>E. coli</i>	6.8	17.5	45.3	9.5	20	0.9
<i>C. freundii</i>	2.4	14	64.7	8.4	7.3	3.2
<i>Enterobacter spp.</i>	12	17.4	7.2	43	18	2.4
<i>K. pneumoniae</i>	6	12.7	3.2	18.9	54	5.7
<i>P. aeruginosa</i>	1.8	0	0	1	0.4	96.8

Tablo Ek 4. OKB profillerinin L1 metriği kullanılarak sınıflandırılmasına ait karışıklık matrisleri (ardışık baz çiftlerinin birlikteliği olmadan).

L1 Metriği (2-100 bç)						
	<i>A. baumannii</i>	<i>E. coli</i>	<i>C. freundii</i>	<i>Enterobacter spp.</i>	<i>K. pneumoniae</i>	<i>P. aeruginosa</i>
<i>A. baumannii</i>	45.7	15	1.3	5	2	31
<i>E. coli</i>	3.1	39.8	27.9	9.3	13	6.9
<i>C. freundii</i>	1.9	18.5	53.9	5.6	9.4	10.7
<i>Enterobacter spp.</i>	4.1	25.2	12.9	30.4	14.3	13.1
<i>K. pneumoniae</i>	3.9	14.6	12.9	9.5	41.5	17.6
<i>P. aeruginosa</i>	18.2	1.5	0.2	4.2	1.4	74.5
2-50 bç						
	<i>A. baumannii</i>	<i>E. coli</i>	<i>C. freundii</i>	<i>Enterobacter spp.</i>	<i>K. pneumoniae</i>	<i>P. aeruginosa</i>
<i>A. baumannii</i>	58.3	8.1	0.5	3	1	29.1
<i>E. coli</i>	5	38.2	25.5	11	14.4	5.9
<i>C. freundii</i>	2.8	18.5	51.6	8.4	10.9	7.8
<i>Enterobacter spp.</i>	5.4	28.5	10.9	27.4	16.5	11
<i>K. pneumoniae</i>	2.8	13	12.4	12.5	45.4	13.9
<i>P. aeruginosa</i>	19.6	0.8	0	3	0.2	76.4
2-10 bç						
	<i>A. baumannii</i>	<i>E. coli</i>	<i>C. freundii</i>	<i>Enterobacter spp.</i>	<i>K. pneumoniae</i>	<i>P. aeruginosa</i>
<i>A. baumannii</i>	53.5	3.2	1	10.5	3.9	27.9
<i>E. coli</i>	10.9	16.9	28.7	16.9	22.9	3.7
<i>C. freundii</i>	5.2	11	50.8	12.6	15.4	5
<i>Enterobacter spp.</i>	10.6	22.8	16	27.1	15.4	8.1
<i>K. pneumoniae</i>	7	6.1	13.2	15.1	51.6	7
<i>P. aeruginosa</i>	19.5	0.6	0	3	1	75.9

Tablo Ek 5. OKB profillerinin Pearson korelasyonu kullanılarak sınıflandırılmasına ait karışıklık matrisleri.

Pearson korelasyonu (1-100 bç)						
	<i>A. baumannii</i>	<i>E. coli</i>	<i>C. freundii</i>	<i>Enterobacter spp.</i>	<i>K. pneumoniae</i>	<i>P. aeruginosa</i>
<i>A. baumannii</i>	31.2	2.6	40.7	0.8	2.8	21.9
<i>E. coli</i>	0.2	7.4	79	0.5	12.8	0.1
<i>C. freundii</i>	0.1	0.6	89.6	0.2	4.9	4.6
<i>Enterobacter spp.</i>	2.2	5.6	53.4	15.1	21.3	2.4
<i>K. pneumoniae</i>	0.4	2.3	54.8	0.9	37.1	4.5
<i>P. aeruginosa</i>	0.6	0	0	0.4	0.9	98.1
1-50 bç						
	<i>A. baumannii</i>	<i>E. coli</i>	<i>C. freundii</i>	<i>Enterobacter spp.</i>	<i>K. pneumoniae</i>	<i>P. aeruginosa</i>
<i>A. baumannii</i>	22.1	2.5	51.5	1.1	6.2	16.6
<i>E. coli</i>	0.1	6.3	82.5	0.5	10.6	0
<i>C. freundii</i>	0.3	0.7	90.8	0.8	4.6	2.8
<i>Enterobacter spp.</i>	2.7	5.2	59.7	16	15.6	0.8
<i>K. pneumoniae</i>	0.2	1.7	64.6	0.9	31	1.6
<i>P. aeruginosa</i>	2.1	0	0.1	0.9	2.4	94.5
1-10 bç						
	<i>A. baumannii</i>	<i>E. coli</i>	<i>C. freundii</i>	<i>Enterobacter spp.</i>	<i>K. pneumoniae</i>	<i>P. aeruginosa</i>
<i>A. baumannii</i>	4.9	1.6	76.8	2	5.4	9.3
<i>E. coli</i>	0	0.4	80.6	0.8	18.2	0
<i>C. freundii</i>	0.1	0.7	90.6	4	3.4	1.2
<i>Enterobacter spp.</i>	0.4	2.7	65.8	21	9.9	0.2
<i>K. pneumoniae</i>	0.4	1.8	70.7	3.9	23	0.2
<i>P. aeruginosa</i>	4.9	0	1.7	5.2	12.2	76

Tablo Ek 6. OKB profillerinin Pearson korelasyonu kullanılarak sınıflandırılmasına ait karışıklık matrisleri (ardışık baz çiftlerinin birlikteliği olmadan).

Pearson korelasyonu (2-100 bç)						
	<i>A. baumannii</i>	<i>E. coli</i>	<i>C. freundii</i>	<i>Enterobacter spp.</i>	<i>K. pneumoniae</i>	<i>P. aeruginosa</i>
<i>A. baumannii</i>	13.8	3.4	0.4	6.6	4.8	71
<i>E. coli</i>	1	16.4	44.6	4	24.5	9.5
<i>C. freundii</i>	0.3	1.9	69.3	1.4	17.7	9.4
<i>Enterobacter spp.</i>	0.5	6.8	29.1	9.8	35.7	18.1
<i>K. pneumoniae</i>	0.3	0.7	15.4	1.1	64.3	18.2
<i>P. aeruginosa</i>	0.5	0	0.2	1.2	1.8	96.3
2-50 bç						
	<i>A. baumannii</i>	<i>E. coli</i>	<i>C. freundii</i>	<i>Enterobacter spp.</i>	<i>K. pneumoniae</i>	<i>P. aeruginosa</i>
<i>A. baumannii</i>	16	2.5	2.1	6.2	9.9	63.3
<i>E. coli</i>	1.4	8.4	60.5	4.5	19.3	5.9
<i>C. freundii</i>	0.3	1.7	76.7	2.4	13.1	5.8
<i>Enterobacter spp.</i>	0.5	4	47.2	6.2	30.8	11.3
<i>K. pneumoniae</i>	0.2	1.3	25.9	1.3	62.6	8.7
<i>P. aeruginosa</i>	0.7	0	1.2	1.3	1.7	95.1
2-10 bç						
	<i>A. baumannii</i>	<i>E. coli</i>	<i>C. freundii</i>	<i>Enterobacter spp.</i>	<i>K. pneumoniae</i>	<i>P. aeruginosa</i>
<i>A. baumannii</i>	13.8	9.3	9.9	15.6	23.5	27.9
<i>E. coli</i>	1.5	6.4	64.7	8.3	16.3	2.8
<i>C. freundii</i>	0.1	5.4	79.1	2.5	9.6	3.3
<i>Enterobacter spp.</i>	0.5	6.3	64.8	8.4	15.9	4.1
<i>K. pneumoniae</i>	0.1	2.4	47.5	5.2	41.8	3
<i>P. aeruginosa</i>	1.4	2.2	1.6	4.7	11.6	78.5

Grafen-Demir Oksit Hibrit Nanoakışkanlarının Isıl ve Hidrolik Performanslarının Sayısal Olarak İncelenmesi

Orhan KEKLİKÇİOĞLU¹, Veysel ÖZCEYHAN^{*2}

¹ Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği, KAYSERİ

^{*2} Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği, KAYSERİ

(Alınış / Received: 01.03.2021, Kabul / Accepted: 17.08.2021, Online Yayınlanma / Published Online: 31.08.2021)

Anahtar Kelimeler

Isı transferi iyileştirme,
Nanoakışkanlar,
Basınç düşümü,
Termohidrolik performans

Öz: Bu çalışmada dairesel kesite sahip düz bir ısı değiştirici borusu içerisinde %0.5-1 aralığında altı farklı hacimsel karışım oranına sahip Grafen-Demir Oksit-Su hibrit nanoakışkanının türbülanslı akım koşullarında termohidrolik performansı sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal çalışma tek fazlı akış için, sabit yüzey ısı akısı uygulanarak 10000-50000 Reynolds sayısı aralığında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlarda Grafen-Demir Oksit-Su hibrit nanoakışkan kullanımının ısı transferinde etkili bir artış sağladığı, bunun yanında, sürtünme katsayısında ise radikal bir değişikliğe sebep olmadığı tespit edilmiştir. Nanoakışkan hacimsel karışım oranının artmasıyla birlikte termohidrolik performans katsayısında ciddi bir artış elde edilirken, artan Reynolds sayısı ile birlikte termohidrolik performans katsayısının düşüş gösteren bir eğilim gösterdiği elde edilmiştir. Grafen-Demir Oksit-Su hibrit nanoakışkan kullanımıyla yalnızca taban akışkan olan su kullanımına oranla Nusselt sayısında elde edilen en yüksek artış %24 olarak gerçekleşirken, sürtünme katsayısındaki artış en yüksek % 9 olarak elde edilmiştir. Elde edilen en yüksek termohidrolik performans katsayısı, %1 Grafen-Demir Oksit-Su hibrit nanoakışkan kullanımında 10000 Reynolds sayısı için 1.20 olarak gerçekleşmiştir.

Numerical Investigation of Thermal and Hydraulic Performance of Graphene and Iron Oxide Hybrid Nanofluids

Keywords

Heat transfer enhancement,
Nanofluids,
Pressure drop,
Thermohydraulic
performance

Abstract: In this study, the thermohydraulic performance of the Graphene-Iron Oxide-Water hybrid nanofluid with six different volumetric fractions in the range of 0.5-1% in a circular-sectioned smooth heat exchanger tube under turbulent flow conditions was numerically investigated. Numerical study was carried out for single phase flow by applying constant surface heat flux in the range of 10000-50000 Reynolds number. In the results, it has been obtained that the use of Graphene-Iron Oxide-Water hybrid nanofluid provides an effective increase in heat transfer, but does not cause a radical change in the friction factor. It was found that the thermohydraulic performance increased significantly with the increase in the nanofluid volumetric fraction, while the thermohydraulic performance showed a decreasing trend with increasing Reynolds number. With the use of Graphene-Iron Oxide-Water hybrid nanofluid, the highest increase in Nusselt number was 24% compared to water, which is the base fluid, while the highest increase in friction coefficient was 9%. The highest thermohydraulic performance coefficient obtained was 1.20 for the Reynolds number of 10000 and using 1% Graphene-Iron Oxide-Water hybrid nanofluid.

*İlgili Yazar, email: ozceyhan@erciyes.edu.tr

1. Giriş

Karmaşık mühendislik sistemlerinde sıcaklık kontrolü, enerjinin verimli kullanılabilirliğini artırmasının yanında bu sistemlerin bütünü ya da sistemde yer alan elemanların tekil olarak kullanım ömürlerini uzatmakla birlikte, çalışma stabilizasyonu da sağlamaktadır. Sıcaklık kontrolünün sağlanmasında en sık kullanılan mühendislik sistemlerinden bir tanesi olan ısı değiştiricilerinin performanslarının artırılması, bağlı bulunduğu sistemin verimini doğrudan etkilemektedir. Bu kapsamda araştırmacılar ısı değiştiricilerinin ısı transferi kabiliyetlerini

arttırmak amacıyla çeşitli çalışmalar yapmaktadırlar. Bu çalışmalar, yoğunlukla pasif metot olarak bilinen ve kolay kuruluma sahip, bakım masrafı gerektirmeyen, dışarıdan herhangi bir enerji girişine ihtiyaç duymayan ve daha yüksek verimli ısı değiştiricisi tasarlanmasında kullanılan teknikler üzerinedir. Pasif yöntemler kullanılarak ısı değiştiricilerinin termal verimlerinin artırılması çalışmalarına ek olarak, son yıllarda nanoteknolojik mühendislik uygulamalarının karmaşık sistemlere adaptasyonu ile birlikte, ısı değiştiricilerinde nanoakışkanların kullanımı hızla yaygınlaşmakta, temel ısı transfer akışkanı olan su, mono etilen glikol, propilen glikol, yağ vb. akışkanların yerine nanopartikül içeren akışkanların kullanılması dikkat çekmektedir.

Nanopartiküllerin temel akışkan tiplerinde uygulanmasında ki birincil hedef, akışkanın içerisine ısı iletim katsayısı yüksek katı faz yapısına sahip tanecikler eklenerek akışkan tipinin ortalama ısı transfer katsayısını artırmak ve bu hedef doğrultusunda sistemlerden ısı yükü çekmek ya da ısı yükün geri dönüşümünü sağlayarak ısı kaybını azalmaktadır. Aynı zamanda akışkan içerisine eklenen katı partiküller, akışkanın ısı iletim katsayısını artırmakla birlikte akış içerisinde çalkantı oluşumuna, yüzey alanının artmasına, partiküllerin birbiri ile çarpışarak mikro-taşınım karakteristiğini geliştirmesine ve dolayısıyla ısı transfer hızının artmasına katkı sağlamaktadır [1]. Nanopartiküllerin temel akışkanlara karıştırılması ile elde edilen nanoakışkanların, termodinamik özelliklerinin su, yağ, etilen glikol gibi geleneksel akışkanlara oranla gelişmiş olması ısı transferi iyileştirmesi konusu üzerine yapılan çalışmalarda nanoakışkan kullanımını artırmıştır. Bu çalışmalara bakıldığında çok çeşitli nanopartikül tipleri (Al_2O_3 , TiO_2 , CuO , SiO_2 , ZnO , GO , Fe_3O_4 , GnP vd.) olan metaller, oksitler ve nanokarbon tüpler kullanıldığı görülmektedir [2].

Nanoakışkan kullanımı üzerine yapılan ısı ve hidrolik performans araştırma çalışmaları 2017 yılı ile birlikte çeşitlenmeye başlamış ve Grafen nanopartikülü ile birlikte farklı bir partikülün hibrit olarak kullanılmasına yönelik çalışmaların tamamı 2017 yılından sonra yapılan çalışmalardan oluşmaktadır. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda Ghosatloo vd. [3] iç içe borulu bir ısı değiştiricisinde üç farklı ağırlık oranına sahip % 0.05, 0.075, 0.1 grafen-su nanoakışkanı kullanarak hem ısı iletkenlik katsayısındaki artışı hem de taşınım gerçekleşen ısı transferi miktarındaki artışı incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlarda, ısı transfer katsayısında artan grafen nanopartikül ağırlık oranı ile arttığı % 0.1 ağırlık oranında ısı transfer katsayısında % 23.9 artış elde edildiği ifade edilmiştir. Sadeghinezhad vd. [4] %0.025 – 0.1 aralığında değişen ağırlık oranlarına sahip grafen-su nanoakışkanı üzerine yaptıkları çalışmada, 5000-22,000 Reynolds sayısı aralığında bir boru içerisinde termal performans analizi gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlarda grafen nanopartikülü kullanımıyla ısı transfer katsayısı ve Nusselt sayısında önemli artış sağladığı belirtilmiştir. Selvam vd. [5] bir otomobil radyatöründe su-etilen glikol baz akışkanı içerisine, hacimsel konsantrasyon oranı %0.1–0.5 aralığında değişen grafen nanopartikülleri ekleyerek, ısı transfer katsayısındaki iyileşme miktarına olan etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda ısı transfer katsayısında yaklaşık % 104 oranında iyileşme sağlandığı belirtilmiştir. Sarafraz vd. [6] (%0.025–0.1) aralığında ağırlık oranı kullanarak grafen-su nanoakışkanının bir mikrokanal içerisinde ısı transferine olan etkisini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre ısı transferi iyileştirme değeri 1.89, Reynolds sayısının en düşük değeri aldığı 25039 sayısında ve kullanılan en yüksek ağırlık oranı % 0.1 değerinde elde edilmiştir. Askari vd. [7] 2017 yılında yaptığı deneysel incelemede Fe_3O_4 / Grafen nanopartiküllerini tekil ve hibrit olarak %0.1, 0.2, 1.0 ağırlık oranlarında su taban akışkanına ekleyerek, 2000-5000 Reynolds sayısı aralığında nanopartikül içermeyen akışta akışında termal özelliklerini tespit etmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre ısı iletkenlik katsayısında taban akışkana göre %14-32 aralığında iyileşme elde edilmiştir. Buna ek olarak 4248 Reynolds sayısında Demir Oksit-Su nanoakışkanı için %8.5 Demir Oksit/Grafen hibrit nanoakışkanı için ise %14.5 ısı transfer katsayısında artış tespit edilmiştir. 2017 yılında yapılan bir diğer çalışmada Yarmand vd. [8] 2017 yılında Grafen nanopartikülü ve Platin nanopartikülünü hibrit olarak kullandıkları deney sisteminde 17,500 Reynolds sayısı ve %0.1 ağırlık konsantrasyonunda yalnızca Grafen nanopartikülünün kullanıldığı nanoakışkan sonuçlarına kıyasla %28.48 Nusselt sayısında iyileşme elde edildiğini belirtmiştir. Ortaya çıkan bu iyileşmenin nanokompozit (hibrit) yapıların sinerjetik etkisinin ve termal iletkenliğin yükselmesinin bir sonucu olduğu ifade edilmiştir. Aynı konfigürasyon sonuçlarına göre ısı transfer katsayısının %49.16 oranında arttığı, bu artışta ise nanokompozit yapının nanoakışkanın termodinamik özelliklerini daha iyi duruma getirmesinin ve nanoakışkanın Brownian hareketinin etkili olduğu belirtilmiştir. 2019 yılında yapılan çalışmalarında Bahiraei vd.[9] sayısal olarak Grafen ve Platin nanopartiküllerinin kullanıldığı nanoakışkan alanı içerisinde üç farklı bükülmüş şerit eleman kullanarak ısı transferine olan etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada bir deney borusu içerisinde üç farklı büküm oranında ve bir adet tekil ve iki adet ikili (zıt ve aynı yönlü) kullanım şeklinde konfigürasyonları oluşturulan bükülmüş şerit elemanların, nanoakışkan ile kullanılmasının suya göre çok daha verimli olduğu ifade edilmiştir. Boru içerisinde birbirine zıt biçimde yerleştirilen bükülmüş şerit eleman ile hibrit nanoakışkan kullanımının akış içerisindeki çalkantıyı artırmasından dolayı ısı transferini iyileştirme konusunda diğer modellere göre daha üstün olduğu ifade edilmiş ve en yüksek konsantrasyon oranı olan %0.1 nanoakışkan kullanımında ve 2.5 büküm oranında Nusselt sayısının suyun kullanıldığı ve iç eleman içermeyen akışa göre yaklaşık 2.1 kat artırıldığı rapor edilmiştir. Bahiraei vd.[10] bir diğer çalışmalarında entropi üretim analizini, Grafen ve Platin nanopartiküllerinin kullanıldığı nanoakışkan alanı içerisinde zıt ve aynı yönlü ikili bükülmüş şerit elemanlar kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda taban akışkan yerine nanoakışkan kullanımının entropi üretimini dolayısıyla tersinmezlikleri azalttığı ifade edilmiş ve kullanılan zıt yönlü bükülmüş şerit elemanın sınır tabakayı daha iyi parçaladığından

dolayı entropi üretimini %10 oranında düşürdüğü belirtilmiştir. Bahiraei vd.[11] gerçekleştirdikleri son çalışmalarında iç içe borulu bir ısı değiştiricisi modelinde Grafen-Platin hibrit nanoakışkanı ile birlikte dikey engeller kullanarak ısı transferindeki iyileştirme miktarını analiz etmişlerdir. Bu çalışma neticesinde ısı transferini iyileştirme açısından en iyi performans gösteren modelin, engeller arası mesafenin en kısa olduğu, engel yüksekliğinin en uzun olduğu ve hibrit nanoakışkan karışım oranının en yüksek olduğu model olduğu belirtilmiştir.

Gerçekleştirilen çalışmalardan anlaşılacağı üzere ısı transferi iyileştirme üzerine gerçekleştirilen Grafen nanopartikülü ile Demir Oksit nanopartikülünün birlikte kullanıldığı çalışmalar henüz çok yeni ve sınırlı sayıdadır. Grafen ve Demir Oksit nanopartikülü genellikle hibrit olarak enerji depolama ve kompozit malzeme çalışmalarında kullanılmıştır. Bu çalışmalardan Wang ve Liu [12] tarafından derlenen makalede Grafen ve Demir Oksit hibrit kullanımının enerji depolamada etkisi incelenmiş, Demir Oksit nanopartikülünün düşük stabiliteye ve iletkenliğe sahip olmasından dolayı ortaya çıkan problemlerin, Grafen nanopartikülünün stabilitesinin ve iletkenliğinin görece çok daha yüksek olmasıyla önüne geçildiği ve aynı zamanda Grafen nanopartikülünün stabilitesi ve diğer termofiziksel özelliklerinin de Demir Oksit ile birlikte hibrit kullanımında iyileştiği ifade edilmiştir. Lu vd.[13] tarafından gerçekleştirilen bir diğer çalışma da Demir Oksit nanopartikülünün düşük maliyet, yüksek miktarda bulunurluk gibi diğer nanopartiküllere oranla belirli üstünlüklere sahip olsa da, düşük iletkenlik değeri, çökelmeye eğimli yapısı nedeniyle uygulama da zayıflıklara sahip olduğu belirtilmiştir. Bu zayıflıkları giderebilmek amacıyla 2 boyutlu yapısı ve benzersiz atom kalınlığı, yüksek yüzey alanı, yüksek stabilite ve daha iyi termofiziksel özellikleriyle dikkat çeken Grafen nanopartikülü ile hibrit kullanımının ön plana çıkması gerektiği vurgulanmış ve bu nanopartiküllerden oluşan hibrit yapıların birçok alanda kullanılmasının gerekliliği ifade edilmiştir. Tüm bunlara ek olarak bu çalışma sonucunda Demir Oksit ve Grafen nanopartiküllerin farklı geometrik yapılarla sahip olmasının ayrıca bir avantaj sağlayacağı ifade edilmiş, hibrit kullanım ile birlikte Grafen nanopartikülü plakaları arasında yer alacak olan Demir Oksit nanopartiküllerin Grafen nanopartikülünün çökmesini geciktireceği belirtilmiştir. Tekil ve hibrit nanoakışkanlar üzerine yapılan bir diğer incelemede Sylwia Wcislik [14] hibrit nanoakışkan modellerinde, düşük maliyete sahip nanopartikül ve görece daha yüksek maliyete sahip nanopartiküllerin birlikte kullanılmasıyla termofiziksel özellikler açısından değerli sonuçlar elde edilirken, yüksek maliyet problemlerinin de önüne geçildiği ifade edilmiştir.

Grafen nanopartikülü son yıllarda ısı transferi konusunda üzerine araştırma yapılan partiküller arasında yer almaktadır. Grafen nanopartikülü diğer metal oksit ve metal nanopartiküllere oranla yüksek termal iletkenliğe (yaklaşık 3000W/mK[15]) ve yine diğer nanopartiküllere oranla daha yüksek stabilizasyon yeteneğine sahip olmasından dolayı [16] bu çalışmada kullanılan ilk partikül olmuştur. Grafen nanopartikülü ile birlikte hibrit olarak kullanılacak olan Demir Oksit nanopartikülü ise ısı transferi iyileştirme çalışmasında hibrit biçimde yalnızca bir çalışmada laminer akım koşullarında kullanılmış olmasından ve manyetik özellik göstermesinden dolayı kimya, mekanik, ilaç eklentileri, elektromanyetik ve biyomedikal alanlarındaki uygulamalarda yapılan çalışmalarda Grafen nanopartikülü ile birlikte uyumlu bir biçimde kullanıldığı rapor edildiğinden[17-21], tercih edilen ikinci metal-oksit nanopartikül olmuştur.

Gerçekleştirilen çalışmada termal iletkenliğinin çok yüksek olduğu bilinen Grafen nanopartikülü ve su, etilen glikol, yağ vb. temel akışkanlara göre çok daha yüksek termal iletkenlik özelliğine sahip Demir Oksit nanopartikülünün hibrit olarak kullanılmış olması hem temel akışkanının ısı iletim katsayısını artırarak ısı transfer hızını iyileştirmekte, hem de Grafen ve Demir Oksit nanoparçacıkları Brownian hareketine bağlı olarak akışkan içerisinde rastgele dağılım gösterip birbirleri ile çarpışarak enerjinin aktarılmasını sağlamaktadır. Bunun yanında hibrit nanopartiküller ısı transfer yüzey alanını artırmalarından ve mikro taşınım karakteristiği taşınmalarından dolayı akış alanı içerisinde homojen bir sıcaklık dağılımının oluşmasında etkin rol oynamaktadır. Yukarıda incelenen çalışmalarda kullanılan nanoakışkan hacim oranlarının genellikle %0.5 ve daha düşük oranlarda olduğu tespit edilmiş ve çoğunlukla laminer akım koşullarında ısıl ve hidrolik performans incelemesi yapılmıştır. Bu çalışmalardan farklı olarak % 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 ve 1 hacim oranlarında Grafen ve Demir Oksit nanopartikülleri hibrit olarak kullanılarak, türbülanslı akım koşullarında performans analizi gerçekleştirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Sayısal yöntem

Bu çalışmada sayısal analizler için ANSYS Fluent 18'de sonlu hacimler metodu uygulanarak çözüm elde edilmiştir. Tek fazlı akış şartı tanımlanarak gerçekleştirilen analizlerde türbülans modeli olarak $k - \epsilon$ RNG(Re-Normalisation Group) modeli seçilmiş, basınç ve hız arasındaki ilişkiyi değerlendirebilmek için SIMPLE algoritma düzeni, konveksiyonun değerlendirilmesi için ise QUICK düzeni kullanılmıştır. Süreklilik, hız, enerji, k ve ϵ değerleri için yakınsama kriteri 1×10^{-5} olarak değerlendirilmiştir. Türbülans modelleri arasında hassas çözüm sağlayabilen $k - \epsilon$ RNG modeli temel olarak üç korunum eşitliği kullanılmaktadır ve bunlar sırasıyla Eşitlik 1, 2 ve 3'de verilmiştir[22].

Kütlenin korunumu:

$$\nabla(\rho\vec{V}) = 0 \quad (1)$$

Momentumun korunumu:

$$\nabla(\rho\vec{V}\vec{V}) = -\nabla P + \nabla(\mu\nabla\vec{V}) \quad (2)$$

Enerjinin korunumu:

$$\nabla(\rho c_p \vec{V}T) = \nabla(k\nabla T) \quad (3)$$

Kullanılan çözüm metodu RNG için ise taşınım eşitlikleri k ve ϵ için sırasıyla Eşitlik 4 ve 5'de verilmiştir [18].

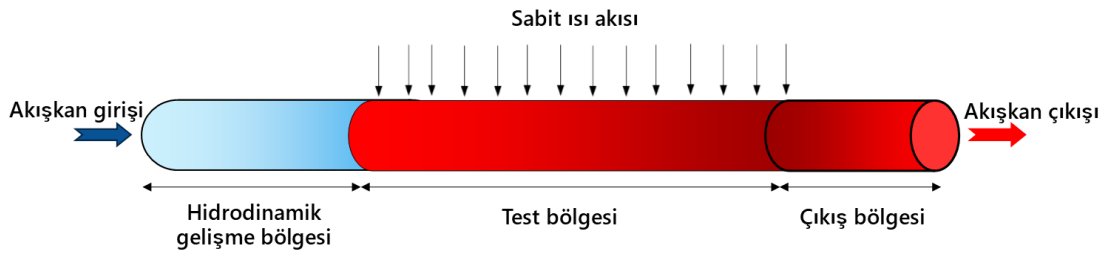
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_m + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon \quad (5)$$

Bu eşitliklerde G_k hız gradyanından kaynaklanan G_b ise kaldırma kuvvetlerinden kaynaklanan türbülans kinetik enerjinin üretim değerini simgeler. α_k ve α_ϵ sırasıyla k ve ϵ için ters etkili Prandtl sayıları olarak ifade edilirken, S_k ve S_ϵ kullanıcı tarafından girilebilen kaynak verileri olarak tanımlanmıştır. Modelde kullanılan sabitlerin değerleri ise $C_\mu = 0:0845$; $C_{1\epsilon} = 1:42$; $C_{2\epsilon} = 1:68$; $\beta = 0:012$; $\eta_0 = 4:38$ olarak verilmiştir [22].

2.2. Sayısal çalışma modeli ve sınır şartları

Gerçekleştirilen bu çalışmada Şekil 1.'de verilen 3 boyutlu boru Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği çözümü için model kabul edilerek analizler yapılmıştır. Geometrik model üç ana parçadan oluşan dairesel bir borudan oluşmakla birlikte, boru içerisinde akışın hidrodinamik olarak gelişebilmesi için hidrodinamik gelişme bölgesi, üzerine sabit ısı akısı uygulanan test bölgesi ve akışkan çıkışında oluşacak geri akımların etkilerinin engellenmesi için ise çıkış bölgesini içermektedir.



Şekil 1. Sayısal çalışma modeli

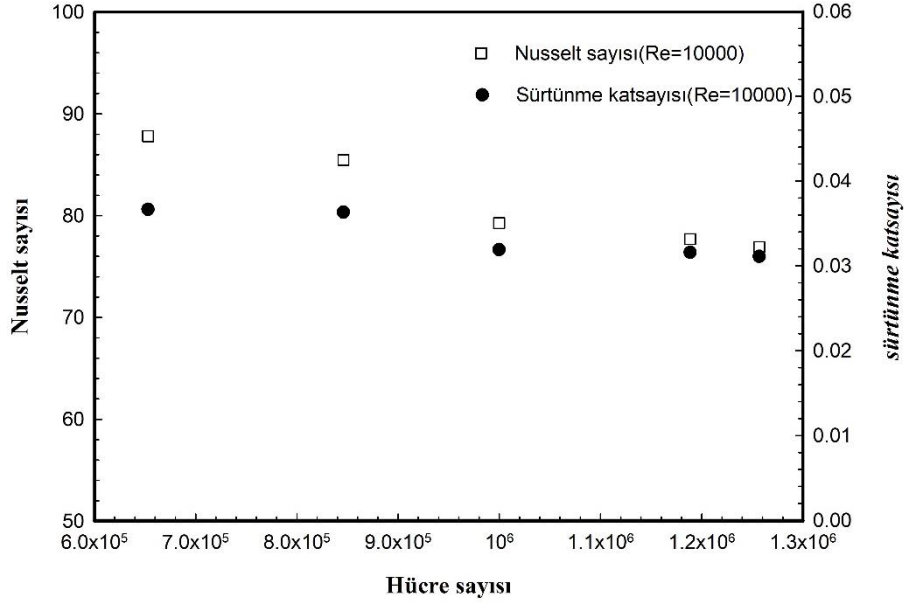
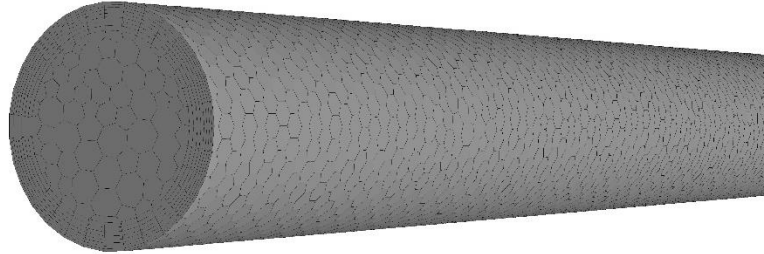
Şekil 1'de verilen sayısal alan modeli boru çapı(D) 10 mm, gelişme bölgesi, test bölgesi ve çıkış bölgesi uzunlukları sırasıyla 100mm (10D), 1000mm ve 50mm(5D) olacak şekilde tasarlanmıştır. Test bölgesi üzerinde 20 kW/m² değerinde sabit ısı akısı uygulanmış ve Reynolds sayısı çalışma aralığı türbülanslı akım koşullarının sağlanması ve uygulamalarda kullanılan akışkan hızı değerlerine de uygun olması için 10000-50000 olarak belirlenmiştir. Grafen-Demir Oksit-Su hibrit nanoakışkan hacim oranları ise, %50 Grafen ve %50 Demir Oksit olacak şekilde, literatürde görece daha düşük rastlanılan % 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 ve 1 olarak belirlenmiştir.

2.3. Ağ bağımsızlığı

Sayısal analiz içeren çalışmaların sonuçlarının doğruluğunun değerlendirilebilmesi için sayısal alan modeli için ağ bağımsızlığının irdelenmiş olması gerekmektedir. Bu çalışma da Şekil 1'de verilen akış alanı için ağ yapısı ve sayısı incelenmiştir ve bu ağ yapısına ilişkin parametreler ve değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Gerçekleştirilen incelemede hücre büyüklüğünün 0.57 değerinden daha düşük olduğu ağ yapısında Nusselt sayısının ve sürtünme katsayısının %2'den daha düşük oranda etkilendiği Şekil 2'de verilen ve 10000 Reynolds sayısı için çeşitli hücre sayılarında gerçekleştirilen ağ bağımsızlığı analizi neticesinde tespit edilmiştir. Bu nedenle, tüm analizler için Şekil 3'de gösterilen, hücre boyutu 0.57 mm ve hücre sayısı 1.18 milyon olan ağ modeli oluşturulmuştur.

Tablo 1. Ağ yapısı parametreleri.

Ağ modeli parametresi	Parametre değeri
Sınır tabaka özellikleri	Yapı: İlk katman kalınlığı Eleman boyutu:1e-0004 Maksimum katman sayısı:10
Geometri ağ yapısı	Büyütme faktörü:1.1 Biçim: Eleman boyutu Eleman boyutu:1e-0003 Boyut fonksiyonu:Uniform Büyütme faktörü:1.2
Ağ yapısı	Çok yüzlü(Polyhedra)

**Şekil 2.** Ağ bağımsızlığı analiz sonuçları**Şekil 3.** Ağ yapısı

Oluşturulan ağ yapısında daha hızlı ve hassas çözüm sağlanabilmesi amacıyla çok yüzlü(polyhedra) ağ modeli seçilmiştir. Isıl ve sınır hız tabaka içerisindeki akış etkilerinin daha kusursuz hesaplanabilmesi için sınır tabaka bölgesinde ağ yoğunluğu artırılarak, doğru çözüm geliştirilebilmesi için ağ modellerinde kontrol edilmesi gereken bir parametre olan y^+ değeri sınır tabaka bölgesinde olması gerektiği gibi $y^+ < 5$ [23] şartını sağlayarak $y^+ \approx 2$ olarak gerçekleştirilmiştir.

2.3. Nanoakışkan termofiziksel özellikleri

Nanoakışkanların ısı iletkenlik, özgül ısı, yoğunluk ve viskoziteden oluşan termofiziksel özellikleri birçok deneysel çalışmada sıcaklık, pH ve hacimsel/ağırlıksal karışım oranları gibi değişken parametrelere göre farklı teknikler ve ölçüm cihazları kullanılarak tespit edilmiştir [24-29]. Bu çalışmalar sonucunda çeşitli parametrelere bağlı olarak nanoakışkanların termofiziksel özellikleri için eşitlikler geliştirilmiştir. Bu çalışmada da geliştirilen bu eşitliklerden faydalanılarak nanoakışkanların termofiziksel özellikleri aşağıda verilen eşitliklerde olduğu gibi hesaplanmıştır.

Hibrit nanoakışkanların termofiziksel özelliklerinin hesaplanmasında Anjali ve Suriya [30] tarafından verilen yoğunluk, özgül ısı, ısı iletkenlik ve dinamik viskozite denklemleri Eşitlik 6., 7., 8. ve 9.'da sırasıyla verilmiştir.

$$\rho_{hnf} = [(1 - \phi_2)\{(1 - \phi_1)\rho_f + \phi_1\rho_{s1}\} + \phi_2\rho_{s2}] \quad (6)$$

$$(\rho Cp)_{hnf} = [(1 - \phi_2)[(1 - \phi_1)(\rho Cp)_f + \phi_1(\rho Cp)_{s1}] + \phi_2(\rho Cp)_{s2}] \quad (7)$$

$$\frac{K_{hnf}}{K_{bf}} = \frac{K_{s2} + (n - 1)K_{bf} - (n - 1)\phi_2(K_{bf} - K_{s2})}{K_{s2} + (n - 1)K_{bf} + \phi_2(K_{bf} - K_{s2})} \quad (8)$$

$$\mu_{hnf} = \frac{\mu_f}{(1 - \phi_1)^{2.5}(1 - \phi_2)^{2.5}} \quad (9)$$

Hibrit nanoakışkanların termofiziksel özelliklerinin hesaplanmasında kullanılan nanopartiküllere ve temel akışkana ilişkin termofiziksel özellikler Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Nanopartikül termofiziksel özellikleri.

Özellikler	Grafen Nanopartikül [31]	Demir Oksit Nanopartikül [32]	Su
Isı İletim Katsayısı (W/mK)	3000	17.65	0.6
Özgül Isı(J/kgK)	790	104	4182
Yoğunluk(kg/m ³)	2250	5180	998.2
Dinamik viskozite (kg/ms)	-	-	1.003E-03

2.3. Hesaplama Metodu

Hibrit nanoakışkanlara ilişkin termofiziksel özelliklerin hesaplanması ile birlikte, bu özellikler ANSYS Fluent 18 programında tanımlayarak analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler neticesinde elde edilen verilere göre Reynolds sayısı, Nusselt sayısı, sürtünme faktörü ve termohidrolik performans katsayısı aşağıdaki eşitliklere göre hesaplanmıştır. Buna göre Reynolds sayısı Eşitlik 10.’da verildiği gibi hesaplanmıştır.

$$Re = \frac{\rho DV}{\mu} \quad (10)$$

Eşitlikte ρ ve μ sırasıyla, hibrit nanoakışkan yoğunluğunu ve dinamik viskozitesini, D akış alanı ıslak çapını, V ise ortalama akışkan hızını simgelemektedir. Isı taşınım katsayısı ise Eşitlik 11.’de verildiği gibi hesaplanmıştır, q' akış alanı üzerine uygulanan ısı akısını simgelerken, ΔT akış alanı yüzey sıcaklığı ile akışkan ortalama sıcaklığının farkını simgelemektedir.

$$h = \frac{q'}{\Delta T} \quad (11)$$

Isı taşınım katsayısı hesaplandıktan sonra Nusselt sayısı Eşitlik 12.’de verildiği gibi hesaplanmıştır, k hibrit nanoakışkanın ısıl iletkenliğini simgelemektedir.

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (12)$$

Bir diğer boyutsuz parametre olan sürtünme katsayısı ise Eşitlik 13.’e göre hesaplanmıştır.

$$f = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho V^2 \frac{L}{D}} \quad (13)$$

Eşitlik 13.’de verilen ΔP test bölgesine giriş ve çıkıştaki akışkan basınç farkını, L ise test bölgesi uzunluğunu simgelemektedir.

$$\eta = (Nu_{nf}/Nu_b)(f_b/f_{nf})^{1/3} \quad (14)$$

Isı transferi iyileştirme yöntemlerinin termohidrolik performanslarının belirlenmesinde kullanılan termohidrolik performans katsayısı Eşitlik 14.’de verildiği gibi hesaplanmıştır.

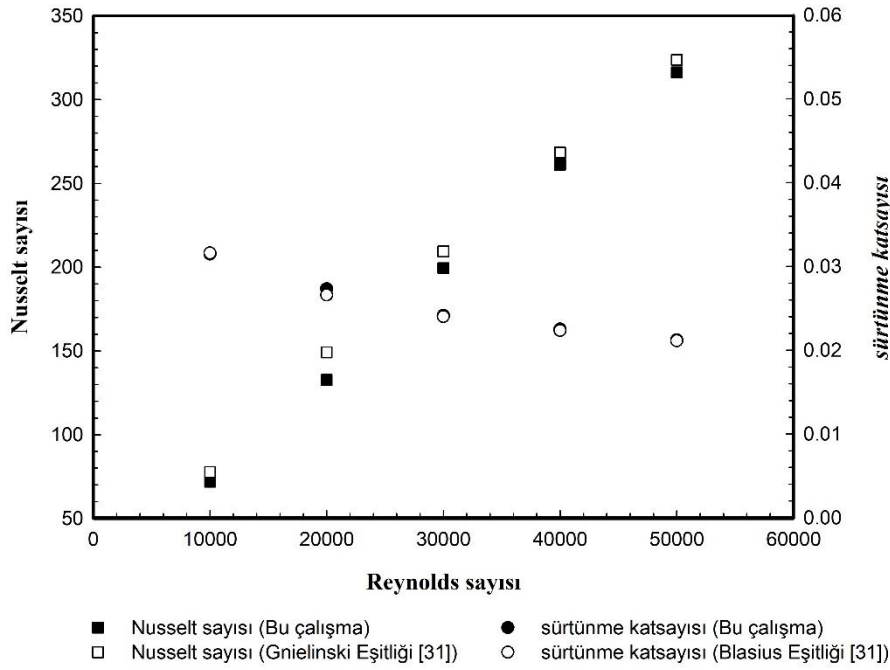
3. Bulgular

3.1. Çalışma metodunun doğrulanması

Sayısal çalışmalarda ağ yapısı, değer okuma yöntemi ve hesaplama metodu gibi parametrelere göre elde edilen sonuçlar değişebildiği gibi, bu parametrelerin değerlendirilmesinde uygulanan analojinin sonuçları daha önceden sonuçları kesin kabul gören eşitliklerle karşılaştırılarak çalışmanın doğrulama işleminin yapılması gerekir. Bu çalışmada yalnızca su akışkanı kullanılan analiz sonuçları Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü için literatürde yer alan sırasıyla Eşitlik 15. ve 16.'da verilen Gnielinski [31] ve Blasius [31] eşitlikleri ile kıyaslanmıştır.

$$Nu_D = \frac{(f/8)(Re_D - 1000)Pr}{1.07 + 12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (15)$$

$$f = 0.316Re^{-0.25} \quad (16)$$



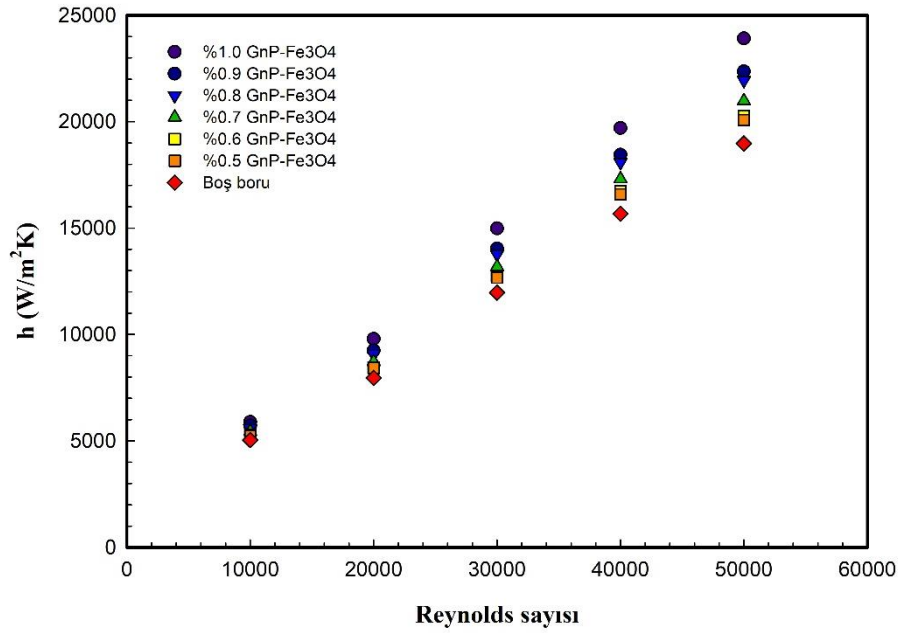
Şekil 4. Sayısal çalışma sonuçlarının doğrulanması

Şekil 4.'de görüldüğü üzere hem Nusselt sayısı hem de sürtünme faktörü literatürde sıkça kullanılan eşitlikler ile karşılaştırılmış ve bu karşılaştırma sonucunda farklı Reynolds sayılarında sayısal çalışma verileri ile eşitliklerden elde edilen değerlerin birbiri ile örtüştüğü, elde edilen grafik dağılımında yaklaşık aynı karakteristiği sağladıkları tespit edilmiştir. Bu dağılımda sayısal çalışma sonucunda elde edilen değerler ve eşitliklerden elde edilen değerler arasındaki en yüksek sapma oranı Nusselt sayısı ve sürtünme faktörü için sırasıyla %9.2 ve %5.6 olmuştur. Elde edilen sapma oranı daha önce yapılan çalışmalarda belirtildiği üzere %20'nin altında gerçekleşerek literatüre uygunluk göstermiştir[33,34].

3.2. Isı transferi ve basınç düşümü bulguları

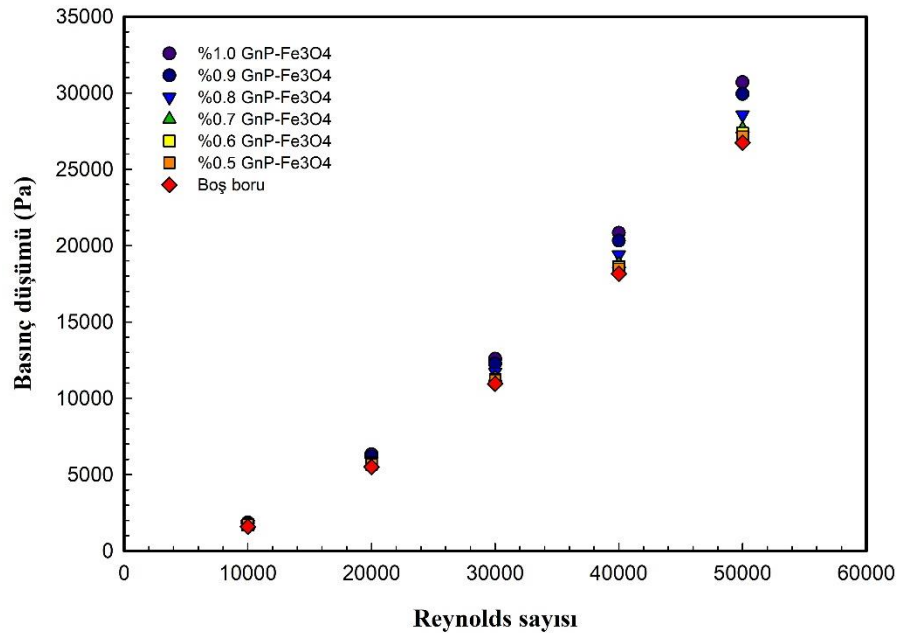
Çalışmanın bu bölümünde hibrit nanoakışkan hacimsel oranlarının ısı ve hidrolik performans üzerine etkilerini tespit etmek için taşınımla ısı transfer katsayısı, basınç düşümü, Nusselt sayısı ve sürtünme faktörünün Reynolds sayısına bağlı değişimleri incelenmiştir.

Nanoakışkanlar ile ilgili yapılan çalışmalarda ısı transferindeki artışı değerlendirebilmek için taşınımla gerçekleşen ısı transferi katsayısının değişiminin incelenmesi gerekmektedir. Isı transferi değişiminde önemli bir parametre olan Nusselt sayısı hem ısı iletkenliğe hem de taşınımla olan ısı transferi kat sayısına bağlı olarak değiştiği ve nanoakışkan kullanımı taban akışkanın ısı iletkenlik katsayısını artırma eğilimi gösterdiği için bu çalışmalarda ısı transferi katsayısının ayrıca incelenmesinin önemi ortaya çıkmaktadır.



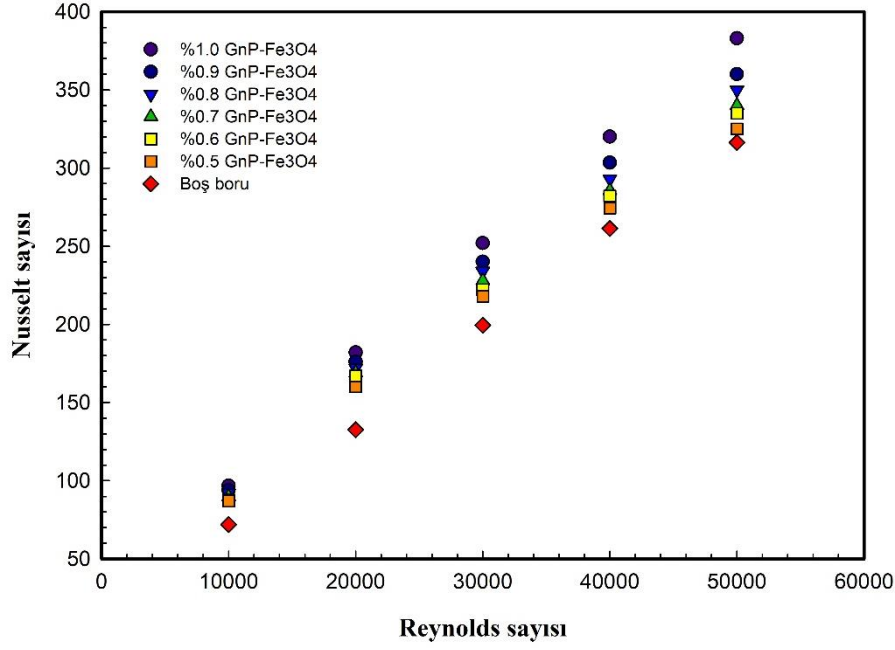
Şekil 5. Farklı hibrit nanoakışkan hacim oranlarında ısı transfer katsayısının Reynolds sayısına bağlı değişimi

Şekil 5.'de verildiği gibi taşınım ile olan ısı transfer katsayısı Reynolds sayısının artmasıyla birlikte artış gösteren bir eğilim izlemiştir. Hibrit nanoakışkan hacim oranının artması ile birlikte ısı transfer katsayısının artış gösterdiği yine Şekil 5.'den anlaşılmaktadır. Isı taşınım katsayısının en yüksek değerleri %1 hibrit nanoakışkan hacim oranında tespit edilirken, en düşük taşınım katsayısı değerleri % 0.5 hacimsel oranda gerçekleştiği elde edilmiştir. Buna göre % 1 hacimsel karışıma sahip GnP-Fe3O4-Su nanoakışkanı kullanılmasıyla elde edilen en yüksek ısı taşınım katsayısı, 50000 Reynolds sayısında su taban akışkanına oranla 1.26 kat artış göstererek gerçekleşmiştir. Bu oran aynı Reynolds sayısı değerinde % 0.5 hacim oranı için ise 1.06 kat olarak gerçekleşmiştir.



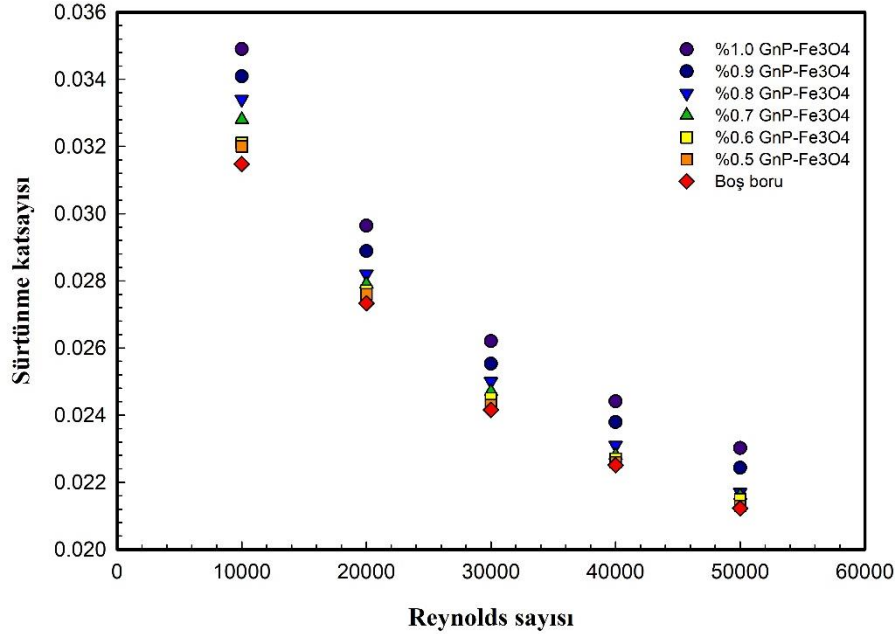
Şekil 6. Farklı hibrit nanoakışkan hacim oranlarında basınç düşümünün Reynolds sayısına bağlı değişimi

Nanoakışkan kullanımı ile birlikte hidrolik performansın ortaya konulmasında araştırılan önemli parametrelerden bir tanesi boru giriş ve çıkışında ölçülen basınçların farkından hesaplanan basınç düşümdür. Şekil 6.'de basınç düşümünün nanoakışkan hacimsel karışıma göre verilen grafikte, artan nanoakışkan hacim oranının ve Reynolds sayısının basınç düşümünü artırdığı görülmektedir. Elde edilen verilere göre basınç düşümünde taban akışkana oranla en yüksek artışın % 1 hacimsel karışıma sahip GnP-Fe3O4-Su nanoakışkanı kullanılması durumunda ortalama olarak 1.14 kat olduğu tespit edilmiştir. Bu oran % 0.9, 0.8, 0.7, 0.6 ve 0.5 hacimsel karışımlarında sırasıyla 1.11, 1.06, 1.04, 1.02 ve 1.01 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 7. Farklı hibrit nanoakışkan hacim oranlarında basınç düşümünün Reynolds sayısına bağlı değişimi

Şekil 7.'de Görüldüğü üzere Nusselt sayısı Reynolds sayısının artması ile birlikte, beklenildiği gibi artan bir eğilim izlemiştir. Hibrit nanoakışkan hacimsel karışım oranı ise yine Nusselt sayısına pozitif bir katkı sağlamış ve karışım oranı ile birlikte artış göstermesini sağlamıştır. Elde edilen sonuçlara göre en yüksek Nusselt sayısı değerleri %1 hacimsel karışım oranında tespit edilirken en düşük Nusselt sayısı değerleri ise % 0.5 hacimsel karışım oranında tespit edilmiştir. Buna göre elde edilen en yüksek ve en düşük Nusselt sayısı değeri 50000 Reynolds sayısında sırasıyla % 1 ve % 0.5 hibrit nanoakışkan hacimsel karışım oranında 392 ve 332 olarak tespit edilmiştir. Aynı Reynolds sayısı değerinde yalnızca taban akışkan olan suyun kullanıldığı analiz sonuçlarında ise en yüksek Nusselt sayısı değeri 316 olarak tespit edilmiştir. Bu veriler ışığında hibrit nanoakışkan kullanılması durumunda Nusselt sayısının taban akışkan olan su kullanılmasına oranla % 5-24 aralığında iyileşme gösterdiği ortaya konulmuştur.



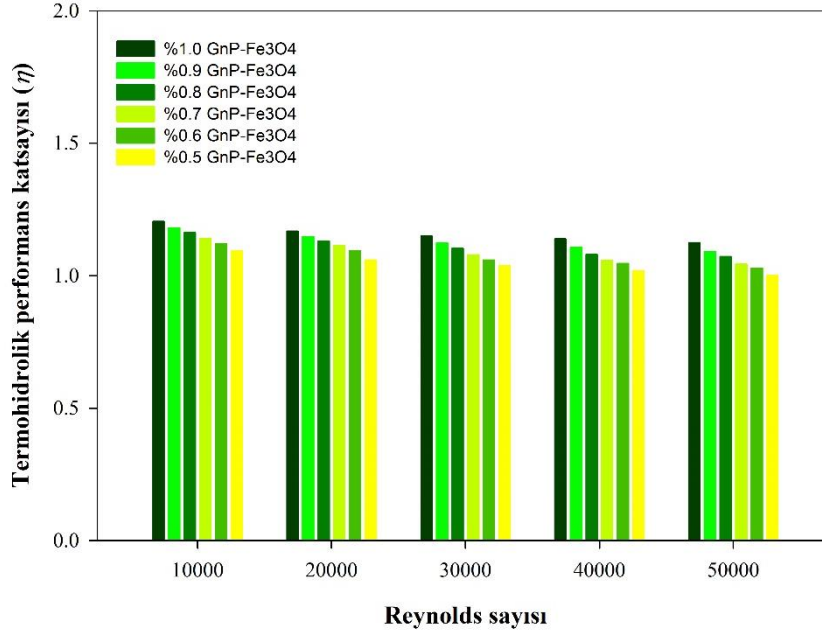
Şekil 8. Farklı hibrit nanoakışkan hacim oranlarında basınç düşümünün Reynolds sayısına bağlı değişimi

Şekil 8.'de nanoakışkan hacimsel karışım oranlarının sürtünme katsayısına üzerine etkisi Reynolds sayısına bağlı olarak verilmiştir. Sürtünme katsayısı nanoakışkan hacimsel karışım oranının artmasıyla birlikte artış gösterirken, bunun aksine Reynolds sayısının artması ile birlikte düşen bir eğilim izlemektedir. Elde edilen sonuçlara göre sürtünme katsayısı değerleri hibrit nanoakışkan kullanımıyla, taban akışkan olan su kullanımına oranla radikal bir değişiklik göstermemiştir. Buna göre en düşük Reynolds sayısı olan 10000 değerinde % 1 hibrit nanoakışkan kullanımı, su akışkanına oranla en fazla % 9 oranında sürtünme katsayısı artışına sebep olmuştur. Yüzde 0.5 hibrit

nanoakışkan kullanımında ise su taban akışkanına oranla sürtünme faktörü artış oranı tüm Reynolds sayıları için % 3'ün altında gerçekleşmiştir.

3.3. Termohidrolik performans katsayısı bulguları

Isı transferi iyileştirme teknikleri kullanılan ısı sistemlerde, uygulanan teknikler ısı transferinde iyileşme sağlarken aynı zamanda sürtünme ve hidrolik kayıplara sebep olmakta ve basınç düşümünü artırmaktadır. Basınç düşümünün artması ile birlikte daha fazla pompalama gücüne ihtiyaç duyulurken bu ihtiyacı karşılamak amacıyla tüketilen enerji, ısı transferini iyileştirme yoluyla elde edilen enerjinin daha da üzerinde gerçekleşebilmektedir. Bu nedenle ısı transferi iyileştirme tekniklerinin uygulandığı sistemlerde net enerji kazancını ifade etmek için termohidrolik performans katsayısı Webb R.L. [35] tarafından geliştirilmiştir.



Şekil 9. Farklı hibrit nanoakışkan hacim oranlarında termohidrolik performans katsayısının Reynolds sayısına bağlı değişimi

Termohidrolik performans katsayısının 1 değerinin üzerinde gerçekleşmesi durumunda uygulanan iyileştirme metodunun avantajlı olduğu ifade edilmektedir [35]. Buna göre Şekil 9.'de görüldüğü üzere gerçekleştirilen kullanılan tüm Grafen-Demir Oksit-Su hibrit nanoakışkan modelleri için termohidrolik performans katsayısı 1 değerinin üzerinde çıkarak, kullanılan yöntemin ısı ve hidrolik açıdan avantajlı olduğu sonucunu ortaya koymuştur. En fazla iyileşmenin tüm Reynolds sayıları için % 1 hacimsel karışım oranında elde edildiği Şekil 9'den anlaşılabilir. Birlikte, en yüksek termohidrolik performans katsayısı %1 hacimsel karışım oranında, 10000 Reynolds sayısında 1.20 olarak elde edilmiştir. Nanoakışkan hacimsel karışım oranının azalmasıyla düşüş gösteren termohidrolik performans katsayısı, Reynolds sayısının artmasıyla da benzer bir eğilim göstererek daha düşük gerçekleşmiştir. Buna göre en düşük termohidrolik performans katsayısı en yüksek Reynolds sayısında, en düşük hacimsel karışım oranı olan % 0.5 değerinde 1.0013 olarak tespit edilmiştir.

4. Tartışma ve Sonuç

Gerçekleştirilen çalışma neticesinde aşağıda sıralanan önemli bulgulara ulaşılmıştır.

- Isıtma ve soğutma yapan sistemlerde Grafen-Demir Oksit-Su nanoakışkanı kullanılması termohidrolik performansın iyileştirilmesi açısından etkili bir ısı transferi iyileştirme tekniğidir. Buna ek olarak Grafen-Demir Oksit-Su hibrit nanoakışkanının, bu çalışmada kullanılan fiziksel şartlarda ve sınır şartlarında daha önce bir ısı değiştiricisi borusunda kullanılmaması ile bu etkili tekniğin önemi de bu çalışma ile birlikte ortaya konulmuştur.
- Bunun çalışmada ısı iletkenlik katsayısı yüksek, ticari üretimi daha güç ve maliyeti yüksek olan Grafen nanopartikülü ile ısı iletkenliği ve maliyeti görece daha düşük ve daha yüksek üretim oranlarına sahip Demir Oksit nanopartikülün birlikte hibrit olarak kullanılmasıyla da, hem termofiziksel özellik hem de mali açıdan bir denge oluşturularak termohidrolik performans katsayısında yüksek değerlere ulaşılabildiği ortaya konulmuştur.
- Nanoakışkan içerisindeki nanopartikül tanecikleri yoğunluk ve viskozite gibi akışkanların termofiziksel özelliklerinin değişmesine ve dolayısıyla taban akışkana oranla basınç düşümünün de değişiklik göstermesine sebep olmaktadır. Basınç düşümündeki bu artışın, ısı transferindeki artışa kıyasla daha

yüksek çıkması termohidrolik performansı olumsuz etkilerken, aksine ısı transferindeki artışın daha yüksek gerçekleşmesi ise kullanılan yöntemin termohidrolik açıdan avantajlı olduğunu ortaya koymaktadır. Buna göre elde edilen çalışma sonuçlarında uygulanan tüm konfigürasyonlarda ısı transferindeki artış, basınç düşümündeki artışa oranla daha yüksek düzeyde gerçekleşmiş ve termohidrolik performans katsayısının tüm modellerde 1 değerinin üstünde olmasını sağlamıştır.

- Bu çalışma sonuçlarında en yüksek ve Nusselt sayısı değeri 50000 Reynolds sayısında % 1 hibrit nanoakışkan hacimsel karışım oranında 392 olarak tespit edilirken sürtünme katsayısındaki artış oranı en yüksek % 9 olarak elde edilmiştir. En yüksek termohidrolik performans katsayısı ise %1 hacimsel karışım oranında, 10000 Reynolds sayısında 1.20 olarak elde edilerek yaklaşık % 20 oranında bir iyileşme sağlanmıştır. Bu iyileşme oranı nanoakışkan hacimsel karışım oranının artması ile artış göstermektedir, bu sonuç karışım içerisindeki hibrit nanopartiküllerin, akışkanın ısı iletim katsayısını artırmakla birlikte akış içerisinde çalkantı oluşumuna, yüzey alanının artmasına, partiküllerin birbiri ile çarpışarak mikrotaşınım karakteristiğini geliştirmesine ve dolayısıyla ısı transfer hızının artmasına katkı sağladığını ortaya koymaktadır.
- Uygulamada ısı transfer akışkanı olarak hibrit nanoakışkanların seçilmesi, ısı transferi iyileştirme kabiliyeti açısından önem arz etmektedir. Bu çalışma sonuçlarından anlaşılacağı üzere Grafen-Demir Oksit-Su nanoakışkanı üstün termofiziksel özelliklere sahip olması nedeniyle etkili bir ısı transfer akışkanı olarak ortaya çıkarken, tekil kullanıma oranla ekonomik bir model olarak değerlendirilme potansiyeline sahiptir.

Teşekkür

Tüm yazarlar Erciyes Üniversitesi'ne bu çalışmanın yürütülmesinde kullanılan gerekli altyapıyı sağlaması nedeniyle teşekkür eder.

Kaynakça

- [1] Ozerinç, S., Kakaç, S., Yazıcıoğlu, A.G., 2010. Enhanced Thermal Conductivity of Nano- Fluids: A State-of-the-Art Review. *Microfluid Nanofluid*, 8(2), 145-170.
- [2] Mehrali, M., Sadeghinezhad, E., Latibari, S., Kazi, S., Mehrali, M., Zubir, MNBM., Metselaar, HSC., 2014. Investigation of Thermal Conductivity and Rheological Properties of Nanofluids Containing Graphene Nanoplatelets. *Nanoscale Research Letters*, 9(1), 15.
- [3] Ghozatloo, A., Rashidi, A., ve Shariaty-Niassar, M., 2014. Convective heat transfer enhancement of graphene nanofluids in shell and tube heat exchanger, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 53,136 – 141.
- [4] Sadeghinezhad, E., Mehrali, M., Tahan Latibari, S., Mehrali, M., Kazi, S.N., Oon, C.S., ve Metselaar, H.S.C., 2014. Experimental Investigation of Convective Heat Transfer Using Graphene Nanoplatelet Based Nanofluids under Turbulent Flow Conditions, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(31),12455–12465.
- [5] Selvam, C., Raja, R.S., Lal, D.M., ve Harish, S., 2017. Overall heat transfer coefficient improvement of an automobile radiator with graphene based suspensions, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 115,580 – 588.
- [6] Sarafraz, M., Yang, B., Pourmehran, O., Arjomandi, M., ve Ghomashchi, R., 2019. Fluid and heat transfer characteristics of aqueous graphene nanoplatelet (GNP) nanofluid in a microchannel, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 107,24 – 33.
- [7] Askari, S., Koolivand, H., Pourkhalil, M., Lotfi, R., Rashidi, A.,2017. Investigation of Fe₃O₄/Graphene nanohybrid heat transfer properties: Experimental approach. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 87, 30-39
- [8] Yarmand, H., Zulkifli, N., Gharekhani, S., Shirazi, S., Alrashed, A., Azlin Bin Ali, M., Dahari, M., Kazi, S.N.,2017. Convective heat transfer enhancement with graphene nanoplatelet/platinum hybrid nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 88, 120-125
- [9] Bahiraei, M., Mazaheri, N., Hassanzamani, S.M., 2019. Efficacy of a new graphene–platinum nanofluid in tubes fitted with single and twin twisted tapes regarding counter and co-swirling flows for efficient use of energy. *International Journal of Mechanical Sciences*, 150, 290–303.

- [10] Bahiraei, M., Mazaheri, N., Aliee, F., 2019. Second law analysis of a hybrid nanofluid in tubes equipped with double twisted tape inserts. *Powder Technology*, 345, 692–703
- [11] Bahiraei, M., Mazaheri, N., Rizehvandi, A., 2019. Application of a hybrid nanofluid containing graphene nanoplatelet–platinum composite powder in a triple-tube heat exchanger equipped with inserted ribs. *Applied Thermal Engineering*, 149, 588-601
- [12] Zongyuan, W., Chang-Jun, L., 2014. Preparation and application of iron oxide/graphene based composites for electrochemical energy storage and energy conversion devices: Current status and perspective. *Nano Energy* 11, 277–293.
- [13] W. Lu, X. Guo, B. Yang, S. Wang, Y. Liu, H. Yao, C.-S. Liu, H. Pang. 2019. Synthesis and Applications of Graphene/Iron(III) Oxide Composites. *ChemElectroChem*, 6, 4922-4948.
- [14] Wciślik, S. 2020. Efficient Stabilization of Mono and Hybrid Nanofluids. *Energies*, 13, 3793.
- [15] Potenza, M., Cataldo, A., Bovesecchi, G., Corasaniti, S., Coppa, P., Bellucci, S., 2017. Graphene nanoplatelets: Thermal diffusivity and thermal conductivity by the flash method. *AIP Advances*, 7, 1-15.
- [16] Manikandan, S. P., Baskar, R., 2018. Assessment of the Influence of Graphene Nanoparticles on Thermal Conductivity of Graphene/Water Nanofluids Using Factorial Design of Experiments. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 62(3), 317-322.
- [17] Yongsheng, F., Haiqun, C., Xiaoqiang, S., Xin, W., 2012. Combination of cobalt ferrite and graphene: High-performance and recyclable visible-light photocatalysis. *Applied Catalysis B: Environmental*, 111, 280–287.
- [18] Adrian M.T. S. ve Sonia A.C. 2016. *Advances in Carbon Nanostructures*. ss 3-37. Oxana Vasilievna, K., Beatriz Ortega, G., Boris Ildusovich, K., Ubaldo Ortiz, M., ed. 2016. *Magnetic-Graphene-Based Nanocomposites and Respective Applications*, InTech Open, Londra.
- [19] Guangshuo, W., Yingying, M., Zhiyong, W., Min, Q., 2016. Development of multifunctional cobalt ferrite/graphene oxide nanocomposites for magnetic resonance imaging and controlled drug delivery. *Chemical Engineering Journal*, 289, 150–160.
- [20] Peng, E., Choo, ES., Chandrasekharan, P., vd. 2012. Synthesis of manganese ferrite/graphene oxide nanocomposites for biomedical applications, *Small*, 8(23), 3620-3630.
- [21] Bhattacharyya, R., Prakash, O., Roy, S. vd. 2019. Graphene oxide-ferrite hybrid framework as enhanced broadband absorption in gigahertz frequencies, *Sci Rep* 9, 12111.
- [22] Fluent, 2016. *ANSYS Fluent V.17.0 User Guide*, Fluent Corporation, Lebanon, New Hampshire.
- [23] Salim, S.M., Cheah, S.C. 2009. Wall y^+ Strategy for Dealing with Wall-bounded Turbulent Flows. *International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*, 18-20 Mart, Hong Kong, 2165-2170.
- [24] Munish, G., Vinay, S., Rajesh, K., Zafar, S., 2017. A review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 638-670.
- [25] Keklikcioglu Cakmak, N., Zafar, S., L. Syam, S., Ziad, M. A., Arun K. T. 2020. Preparation, characterization, stability, and thermal conductivity of rGO-Fe₃O₄-TiO₂ hybrid nanofluid: An experimental study. *Powder Technology*, 372, 235-245.
- [26] Keklikcioglu Cakmak, N. 2020. The impact of surfactants on the stability and thermal conductivity of graphene oxide de-ionized water nanofluids. *Journal of Thermal Analysis Calorimetry*, 139, 1895–1902.
- [27] Keklikcioglu, O., Dagdevir, T., Ozceyhan, V., 2019. Heat transfer and pressure drop investigation of graphene nanoplatelet-water and titanium dioxide-water nanofluids in a horizontal tube. *Applied Thermal Engineering*, 162, 114256.
- [28] Pak, B. C., Cho, Y. I., 2007. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental Heat Transfer*, 11, 151-170.

- [29] Buongiorno, J., 2006. Convective transport in nanofluids. *Journal of Heat Transfer*, 128, 240-250.
- [30] Anjali Devi, SP., Suriya U.D.S. (2016). Numerical investigation of hydromagnetic hybrid Cu-Al₂O₃/water nanofluid flow over a permeable stretching sheet with suction. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 17, 249–257.
- [31] Keklikcioglu, O., 2020. İçerisinde Grafen katkılı nanoakışkan ve konik iç eleman kullanılan boruda termohidrolik performans ve entropi üretiminin incelenmesi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 191s, Kayseri.
- [32] Krishna Varma, K.P.V., Kishore, P.S., Durga Prasad, P.V., 2017. Enhancement of Heat Transfer Using Fe₃O₄ / Water Nanofluid with Varying Cut-Radius Twisted Tape Inserts. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12, 7088-7095.
- [33] Jensen, M.K., Vlakancic, A., 1999. Experimental investigation of turbulent heat transfer and fluid flow in internally finned tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42, 1343-1351.
- [34] Zhang, L., Xiong, W., Zheng, J., Liang, Z., Xie, S., 2021. Numerical analysis of heat transfer enhancement and flow characteristics inside cross-combined ellipsoidal dimple tubes. *Case Studies in Thermal Engineering*, 25, 100937.
- [35] Webb, R.L., 1981. Performance evaluation criteria for use of enhanced heat transfer surfaces in heat exchanger design. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 24, 715-726.

Active Flow Control with DBD Plasma Vortex Generators around a NACA 2415 Airfoil

Hürrem Akbıyık¹, Hakan Yavuz²

¹ Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği, ADANA
² Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği, ADANA

(Alınış / Received: 26.03.2021, Kabul / Accepted: 28.08.2021, Online Yayınlanma / Published Online: 31.08.2021)

Keywords

Lift Coefficient,
Plasma Actuators,
Vortex Generators,
Pressure Coefficient,
Drag Coefficient

Abstract: In this study, the effect of dielectric barrier discharge vortex generator plasma actuators on pressure coefficients of a NACA2415 airfoil are investigated experimentally at a Reynolds number of 5×10^4 . The dielectric barrier discharge plasma vortex generators are placed at the leading edge of the airfoil. Force measurements with a six-axis load cell and free stream velocity with a pitot static tube are conducted. The pressure distributions over the airfoil are measured using a scan-valve unit and a pressure transducer. The experimental results showed that when the dielectric barrier discharge vortex generators were driven at a specific electrical parameter, the lift coefficient of the airfoil is increased significantly and the stall angle was postponed by induced flow effect. Moreover, the co-rotating dielectric barrier discharge vortex generators type is more effective than the counter-rotating type in reducing the drag coefficient. Furthermore, the 3D flow structure for both types of vortex generators was observed at the surface of the airfoil by using pressure measurements along with spanwise direction. In addition, it appears that the effect is less in the case of the stall angle in both plasma actuated state for drag coefficient, but they are more effective in the pre-stall angle and post-stall cases.

NACA2415 Kanat Modeli Etrafındaki Akışın DBD Plazma Girdap Üreteçleri ile Kontrolü

Anahtar Kelimeler

Kaldırma Katsayısı,
Plazma Aktüatör,
Girdap Üretici,
Basınç Katsayısı,
Sürüklenme Katsayısı

Öz: Bu çalışmada, girdap üretici olarak dielektrik bariyer deşarjı plazma eyleyicilerinin NACA2415 kanat modelinin aerodinamik performansına etkileri basınç katsayısı göz önüne alınarak deneysel olarak Reynolds sayısının 5×10^4 olduğu deşerde incelenmiştir. Dielektrik bariyer deşarjı plazma girdap üreteçleri kanat modelinin ön kısmına yerleştirilmiştir. Kuvvet ölçümleri altı eksenli yük hücresi kullanılarak yapılmıştır ve serbest akış hızı pitot statik tüpü ile ölçülmüştür. Kanat modeli etrafındaki basınç dağılımları basınç dönüştürücü ve dairesel tarama vanası kullanılarak ölçülmüştür. Deneysel sonuçlar, dielektrik bariyer deşarjı girdap üreteçleri belirli elektriksel parametrelerde sürüldüğünde kaldırma katsayısını önemli ölçüde arttırdığı ve stol açısını indirgenmiş akış etkisiyle geciktirdiğini göstermiştir. Dahası, eş dönümlü dielektrik bariyer deşarjı girdap üreteçlerinin sürüklemeyi katsayısını azaltmada zıt dönümlü dielektrik bariyer deşarjı tipine göre daha etkili olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, kanat yüzeyinde üç boyutlu akış yapısı kanat açıklığı yönünde alınan basınç ölçümleri sayesinde her iki girdap üretici tarafından da oluşturulduğu ortaya gözlemlenmiştir. İlave olarak, her iki plazma girdap üreteçlerinin de sürüklenme katsayısı üzerine etkileri stol açısında daha az iken stol öncesi ve sonrası durumlarda daha fazla etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir.

*Corresponding Author, email: hakbiyik@cu.edu.tr

1. Introduction

In recent years, dielectric barrier discharge plasma actuators have been a popular topic for many researchers in aerodynamic applications due to their features such as simple structure, fast response time, having no moving parts and so on. In the aerodynamic field, they have critical applications such as plasma gurney flap[1,2], plasma travelling wave device[3,4], plasma tip-clearance seals[5] and plasma vortex generators[6-8]. The conventional mechanical vortex generators have a drag penalty. However, DBD plasma vortex generators can be activated on demand at required conditions. Due to their electrical structure, they can be adapted easily to the electrical system

of an aircraft. Choi et al. [9] reported that plasma virtual actuators can be used instead of conventional actuators. Akbiyik et al. [10] stated the effect of vertically placed plasma actuators on the lift and drag coefficient of an airfoil.

In the numerical and experimental study by Aram et al. [11], sDBD plasma actuators were used to control turbulent boundary layer separation. They reported that the Reynolds number for the study was set at 240000. In the plasma release signal, which is one of the critical parameters examined in the study, they compared the type of signal activated in a certain range (duty cycle) with sine wave. They revealed that the input signal has an important role in the efficiency of the plasma, beyond the plasma release voltage, in the development of the aerodynamic performance of the aircraft wing. Khoshkhoo and Jahangirian [12] conducted a study examining the activity time of plasma as another numerical study. In their studies, they examined plasma actuators placed on the NACA0015 aircraft wing model as key parameters in the flow separation control as a result of continuous triggering at regular intervals. They revealed that the body force created with the help of plasma enables the flow to hold on to the wing and it affects the boundary layer development. Sun et al. [13] stated in their study that plasma actuators triggered at certain intervals, that is, the momentum transfer in the opposite direction due to the effects of the gaps formed during the release, was prevented. Zhang et al. [14] experimentally investigated the turbulence boundary layer separations using symmetrical plasma actuators at high Reynolds number in their study. In their experimental studies, they revealed that the wing significantly suppresses the turbulence boundary layer separations with the help of plasma actuators. In addition, they achieved a maximum improvement of 9% in lift force and shifted the stall angle by 2 degrees. These actuators have been successfully used to form the flow around bodies [15] and used in boundary layers [16,17]. Most of the plasma actuators are placed along the spanwise direction in order to generate induced flow and to add momentum to the flow in the literature. However, two rows of DBD plasma actuators were used in a turbulent boundary layer so as to produce a spanwise force [18,19]. When the skin friction was reduced, the streamwise vortices were generated by the plasma actuators. Okita et al. [20] used a yawed DBD plasma actuator by generating a large-scale streamwise vortex that delay flow separation around a NACA2415 airfoil. Porter et al. [21] and Bolitho and Jakob [22] reported the tangential jets by using two opposing plasma actuators. They showed that varying the produced induced flow can be vectored to generate a jet that is similar to a vortex generator.

Recent studies about the vortex generator application as passive and active flow control devices is given in the following sentences. Hu et al. [23] investigated the effects of DBD vortex generator (DBD-VG) on flow around the Ahmed body that is vehicle model. DBD-VG actuators placed to back slope of the Ahmet body model. Their results indicates that DBD-VG provides 8.51% drag reduction with the driving voltage of 13kV. Vernet et al. [24] performed the experimental study by using DBD-VG for truck-trailer model. Their results showed that DBD-VG provides a drag reduction of 20%. They placed the actuators at the leeward sides which is located in front of the truck. Natarajan et al. [25] studied the influence of bio-inspired bristled shark skin vortex generator on the submarine model. Said et al. [26] performed the experimental study to research the optimum location of micro vortex generator on flow around the NACA 4415 airfoil. They found the optimum position to be chord length of 30%. As seen in the studies given above, these vortex generators are still widely used in the literature for both active and passive flow control applications. In this study, the co-rotating and counter-rotating plasma vortex generators and their contribution to aerodynamic performance of a NACA2415 airfoil has been studied. Moreover, the aim of this study is to show the potential of yawed plasma actuators in flow control applications. Pressure coefficient of the airfoil is measured in spanwise and in chordwise directions in order to present the three-dimensional effects of plasma vortex generators. By using smoke-wire flow visualization technique, the flow around the airfoil is also examined prominently.

2. Material and Method

Experiments were conducted in an open-suction type wind tunnel with plexiglass test section of $1000\text{mm} \times 570\text{mm} \times 570\text{mm}$. The NACA2415 airfoil was used as a test model and the DBD VGs plasma actuators placed at the leading edge of this airfoil as it seen in Figure 1. The chord length and spanwise length of the airfoil are 150 mm and 500 mm, respectively. The 280mm end plates located at both top and bottom sides of the test section.

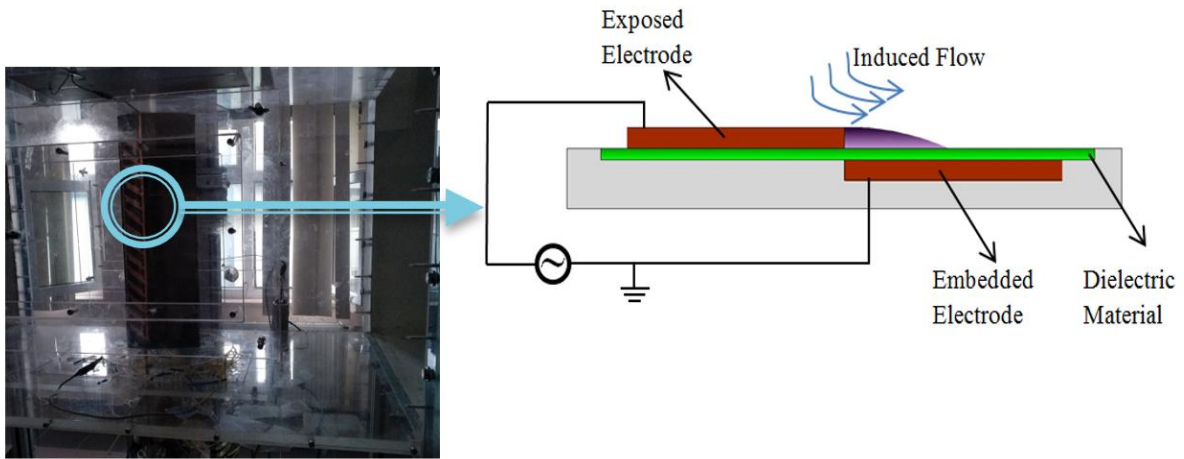


Figure 1. The test model in wind tunnel and structure of the plasma actuator

As it is seen in Figure 2, two different electrode geometry configurations namely as co-rotating and counter-rotating types plasma actuators are used to control of flow around airfoil.

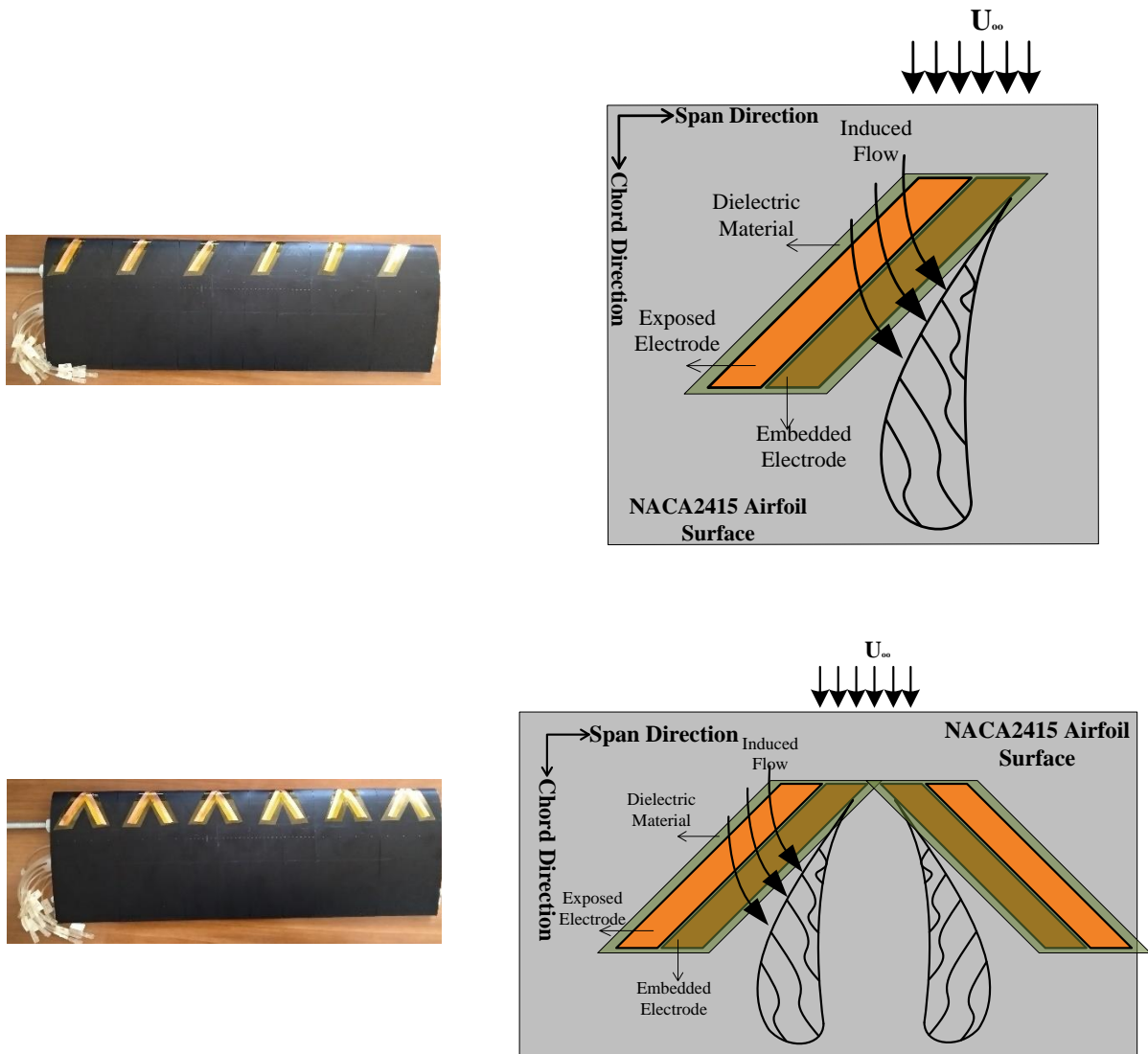


Figure 2. Structures of the co-rotating and counter-rotating plasma vortex generators

The dielectric barrier discharge vortex generators (DBD VGs) placed on the surface of the airfoil at $x/C = 0.1$ where “x and C” denotes direction and chord length, respectively. Each plasma actuator includes an embedded and an exposed electrode. Kapton is the dielectric material with thicknesses of 0.07 mm and it is placed between

embedded and exposed electrodes. A DBD VGs generates an induced flow which is perpendicular to the free stream flow. The structure of the accretive vortex depends on electrical properties of the plasma actuators such as applied voltage, excitation frequency, duty cycle, signal type; structures of actuators such as types of dielectric material, the thickness of dielectric material, length of the electrodes, width of the electrodes; flow properties such as types of fluid (Helium, Argon, Oxygen), free stream velocity; ambient conditions such as temperature, pressure and etc.; and the electrode placement angle to the surface of a model (yaw angle). In particular, the growth and decay of this vortex related to many of given parameters. The electrode lengths are carefully arranged as 50mm and yawing angles of the actuators are set to 45 degrees. In this study, the plasma generation system and electrical measurement devices are illustrated in Figure 3 and 4(b). In plasma generation, a custom-made amplifier is used to drive the plasma actuators. The plasma actuator driven parameters are set to 7 kV_{pp} applied voltage and 4 kHz excitation frequency. The signal type in this study is sinusoidal and monitored by Tektronix TDS2012B model oscilloscope. A Tektronix P6015A model voltage probe connected to this oscilloscope to measure the applied voltage.

Aerodynamic forces are measured by using an ATI Gamma model six axes load cell. Test model mounted on a rotary unit with a connection rod in order to set the attack angle of the model. The sampling frequency of the force measurement is 500 Hz and the experiments taken during the 10 second period. So, each measurement includes 10000 sampled values and repeated twice. Angle of attacks for the force measurement is varied between 0° and 16° with an increment of 2°. Uncertainty for the force measurement is calculated to be lower than 5%.



Figure 3. General view of the test setup

The pressure values acting over the NACA2415 airfoil surface were measured by using pressure taps. These pressure taps were located on the surface of the airfoil along the chord direction. The pressure taps were connected to a circular 36 channel scan-valve that transfers pressure values to a pressure transducer. The data taken from the pressure transducer were collected with the help of NI DAQ card. As it seen from Figure 4(a and c), the hose of the pressure transducer was connected to the coordinated pressure sockets on the wing, and measurements were taken. The other measurements were made from the tunnel test zone wall where the stream velocity is free stream type. The pressure coefficient distribution graph was obtained by dividing the difference of the pressure values taken from each pressure taps over the velocity values taken from the pitot tube used in the tunnel.

$$C_p = \frac{P_2 - P_1}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (1)$$

The pressure coefficients were calculated by using Equation 1, where, U is the free stream velocity, P₂ and P₁ are the values read for each station from the pressure transducer, and ρ is the density of the air. The results represent the underlying dynamics for each pressure station at 0, 4, 8, 10, 12 and 16 degrees of attack angles. Uncertainty for the pressure measurement is calculated to be lower than 3.7%. In order to observe the flow around the NACA 2415 airfoil, a smoke-wire flow visualization method is utilised. Liquid form paraffin is dropped down to the wire for producing of white smoke. A power supply is used to heat the wire. The flow structure around the NACA2415 airfoil is visualized with a camera.

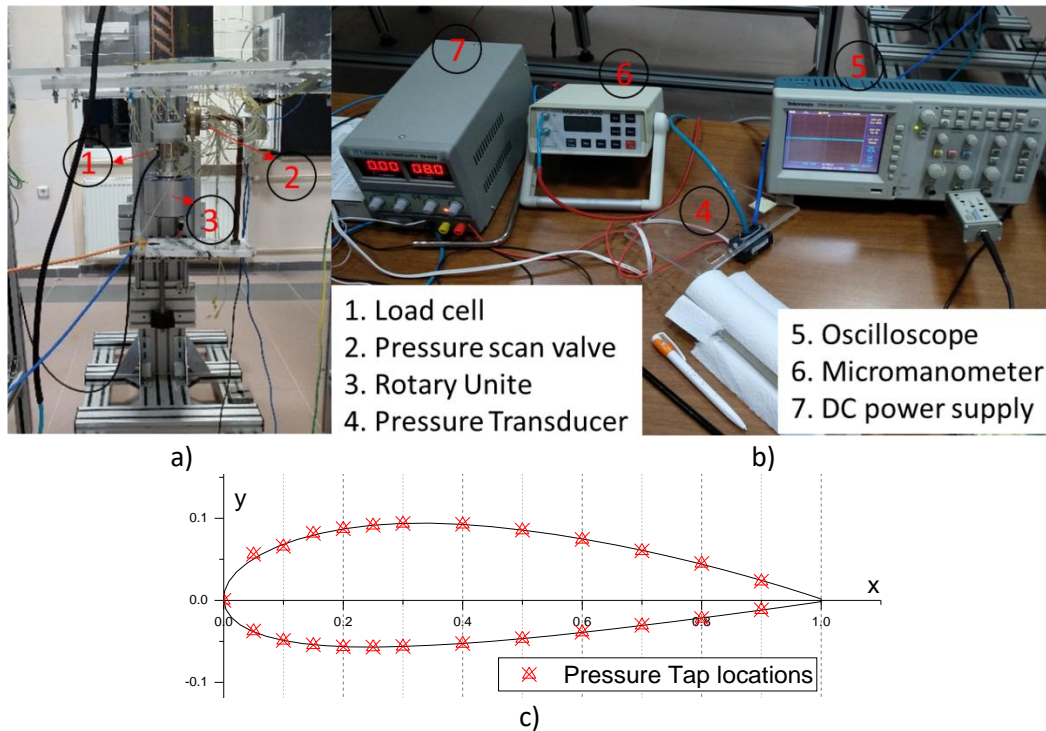


Figure 4. (a) force measurement system, (b) measurement devices and (c) schematic view of pressure tap locations

3. Results and Discussions

In this study, the effect of two different DBD-VGs plasma actuators placed on the NACA2415 aircraft wing along the span of the drag and lift force was investigated. The plasma applied voltage was set as 7 kV and frequency as 4 kHz, and the experiments are performed at $Re = 50000$. It is known that the range of Reynolds number defined is compatible with the flow conditions of MAVs and UAVs as it is reported by the study of Mueller[27]. In pressure coefficient measurements, the base model pressure coefficient was measured along chord for DBD-VGs Co and Counter Rotating models.

The aerodynamic coefficients such as lift (C_L) and drag (C_D) and lift to drag ratio (L/D) versus the angle of attack (AoA, α) for the NACA 2415 airfoil are presented in Figure 5(a-c). It is apparent that the lift coefficient increases with the increase of AoA. The C_L of the base NACA2415 airfoil increases linearly till 8 degrees with a maximum lift coefficient around 0.85. After 8 degrees of AoA, the lift coefficient of the airfoil decreases gradually because of the stall phenomenon. Considering the plot of the lift coefficient according to the angle of attack, it is observed that the lift coefficient of the base NACA2415 model is improved compared to the case for which the plasma actuators are used. It has been experimentally demonstrated that counter-rotating DBD-VGs type plasma actuators have a higher increase in lifting force compared to the case with co-rotating DBD-VGs plasma actuators. In addition, it was observed that the stall angle was shifted around 2 degrees compared to that of the base model for both plasma actuator cases. The stall angle was determined as 8 degrees for the base model, while it was observed as 10 degrees in the other case. It was observed that the lift coefficient of 0.85 at this angle value was increased to approximately 1.15 when the plasma was activated.

Also, the C_D of the NACA2415 airfoil increases with the increase of AoA. The C_D of the base NACA2415 airfoil increases slightly till 8 degrees. However, after the stall angle, the drag coefficient of the base airfoil increases gradually. When analyzed in terms of drag force, again, it is observed that both DBD-VGs plasma actuator cases drag coefficient is reduced compared to that of the base model NACA2415. However, it is clearly seen in the drag coefficient vs. AoA graph (in Figure 5(b)) that the DBD-VGs co-rotating plasma actuator structure is more effective than the counter-rotating model in reducing the drag coefficient. In addition, it appears that the effect is less in the case of the stall angle in both plasma actuated state, but they are more effective in the pre-stall angle and post-stall cases. Within the scope of this study, when the aerodynamic forces are analysed and interpreted together, the structures with plasma actuators are enabled to have a shorter take-off distance, also consume less fuel for the same journey, hence the running cost is reduced and the overall flight range is extended with improvements in aerodynamic design (C_L/C_D) (as shown in Figure 5(c)) for aircraft compared to the features of the base model. In addition, the experimental results of the study show that the presented active models play a critical role in reducing the drag coefficient. In special applications, the co-rotating DBD-VGs plasma actuated structure and the

counter rotating DBD-VGs plasma actuated structures have critical importance considering the improvements achieved in respective the lift coefficients.

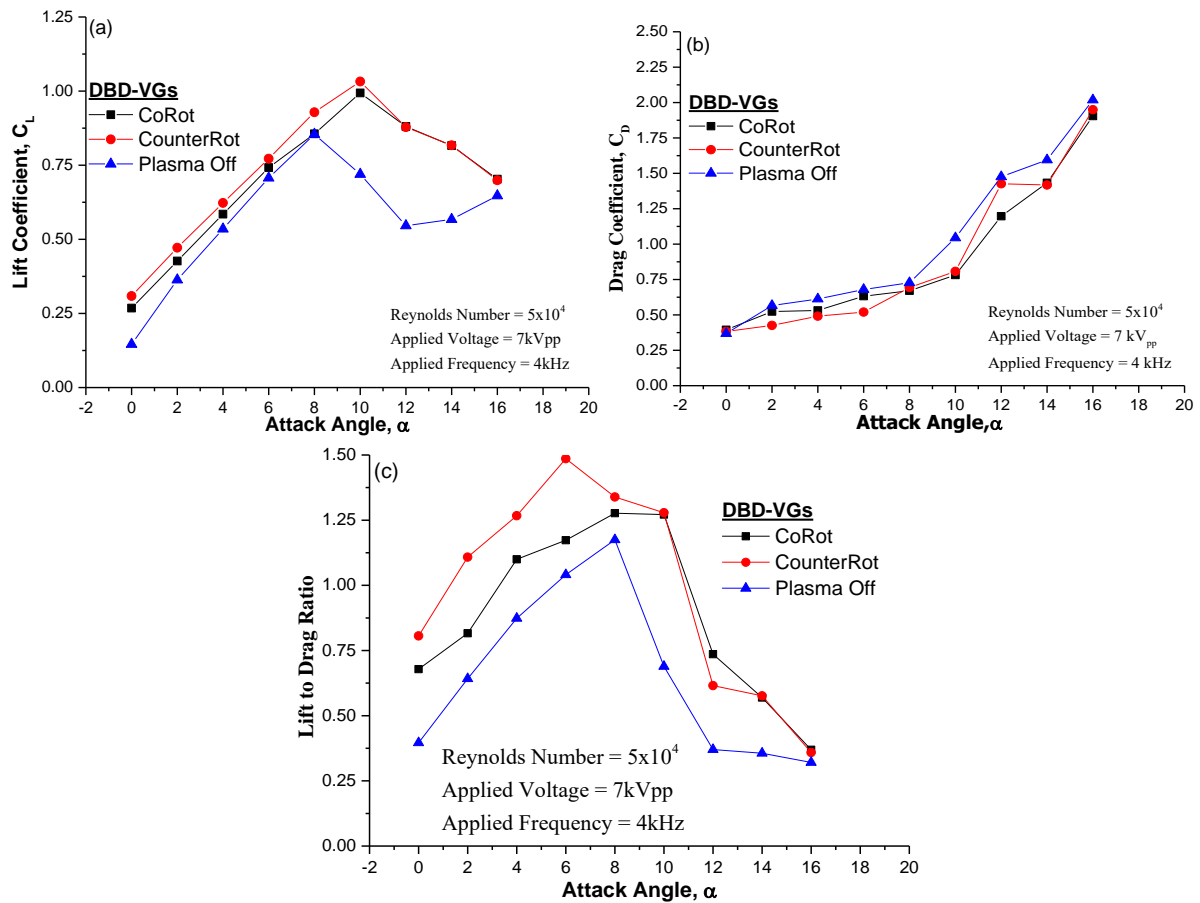


Figure 5. The effect of DBD-VGs Co- and Counter-rotating plasma actuator for (a) the lift coefficient, (b) drag coefficients and (c) lift to drag ratio of the NACA2415 airfoil

In Figure 6, the angle of attack of the NACA2415 wing model shows the pressure coefficients at different positions taken for various attack angles. Within the scope of this study, it is seen in the values in the graph that the pressure distributions for the basic model are uniform and they are compatible with the literature. The pressure difference between the suction and pressure surfaces of the basic model supports the lifting force acting on the wing model. When Laminar Separation Bubble (LSB) occur on the surface of the airfoil, it leads to changes on pressure coefficient of the airfoil. This LSB gives rise to significant increase in pressure coefficient after flow completes transition process. Then, the flow becomes more energetic and reattaches the surface of the airfoil. The LSB can be divided into two group as long and short bubbles [28]. Short bubbles may cause reattachment of the separated flow. Also, after the short bubble process, long bubbles may occur and this can be resulted in early stall for the airfoil. In Figure 6, the counter-rotating type DBD VGs has higher C_p values than the co-rotating type when AoA is 0° . Also, it appears that the co-rotating DBD VGs equipped airfoil has short bubble whilst the co-rotating DBD VGs equipped airfoil has long bubble. Two types of DBD VGs have the short bubble for AoA is 4° . However, the transition point of counter-rotating type DBD VGs has higher than co-rotating type. This can be interpreted that LSB structure occurred by the counter-rotating DBD VGs has bigger than co-rotating type. On the other hand, it is apparent that the LSB for the base airfoil case has long type bubble. So, the lift coefficient increased significantly but bubble type was changed. For the angle of attack is increased to 8° , the base airfoil has again long bubble generated. When the plasma vortex generators are activated, the separation point and reattachment point of the flow are the same for the both actuator types. However, actual pressure distribution with laminar separation bubble line has a slight difference. In the case of 10° AoA, the stall angle is shifted. Moreover, the lift coefficient significantly improved but both plasma VGs give rise to short bubble type. After this critical AoA, the airfoil may stall early due to the short bubble structure. For the AoA is 12° , the LSB structure is long bubble but just lift coefficient increased. There is no improvement of aerodynamic forces when AoA is 16° . This means that plasma actuators are not effective after 16° for the applied electrical parameters.

Active Flow Control with DBD Plasma Vortex Generators around a NACA 2415 Airfoil

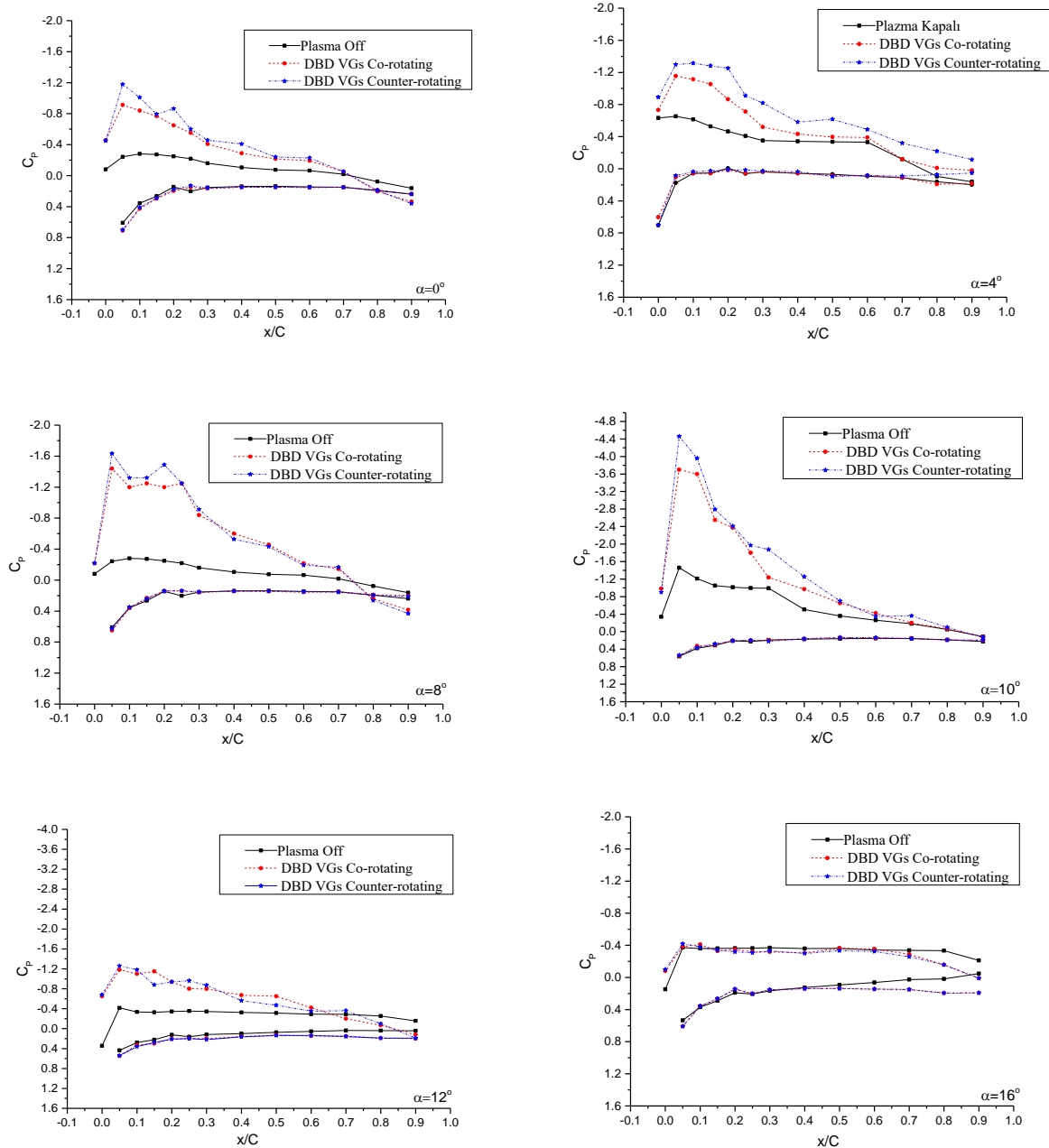


Figure 6. Chordwise pressure distribution of the NACA2415 airfoil at $Re = 5 \times 10^4$ and for varied attack angles

As seen in Figure 7, pressure coefficients of a NACA 2415 airfoil were measured for different attack angles where the pressure taps are placed at $x/C=0.4$ positions. The pressure taps are located this position in order to see the effects of plasma actuators. The pressure values taken from spanwise located pressure taps for the DBD VGs plasma actuators has 3D effects on the airfoil surface. As mentioned in Figure 2, The dielectric barrier discharge vortex generators located on the surface of the airfoil (with yaw angle) generated the induced flow that leads to initiate a process in which swirling flow occurred. The accretive longitudinal vortex changed the flow structure on the surface of the airfoil. In this case, the separated flow became close to the surface of the airfoil and increase the lift coefficient of the airfoil as well as the stall angle is shifted. Of course, the size of the accretive longitudinal vortex depends on some plasma generation parameters but especially related with yaw angle of actuators and length of the actuators. So, it appears that the change in 3D structure of generated vortex affects directly the aerodynamic properties of the airfoil. When the C_p values of the airfoil compared with the base airfoil in Figure 7, it can be said that both plasma actuators cases increase the lift coefficient. Furthermore, the fluctuating of C_p is an indication of 3D structure of flow generated by plasma vortex generators on the surface of the airfoil. It can be said that Counter-Rotating type vortex generators causes relatively more fluctuated flow on the surface of the airfoil due to adding more momentum to the flow. After the plasma vortex generators are activated, the pressure change, in the suction side of the airfoil, becomes clearly visible. The Counter-Rotating DBD VGs cause more changes in the pressure coefficient due to their structural features. The increase in the pressure difference between the suction and the

pressure side indicates that the lifting force is increased. Furthermore, the shifting in the stall angle and the increase in the lift force are clearly seen. It was observed that the measured pressure is increased due to the induced flow effect at the points where the plasma actuators were placed (x/C from 0.1 to 0.35). These plots show the details of the development of the boundary layer while the pressure increases after peak suction from LE to TE. Moreover, the distribution of pressure coefficient provides the details for the formation and progress the laminar separation bubble, transition and re-attached flow.

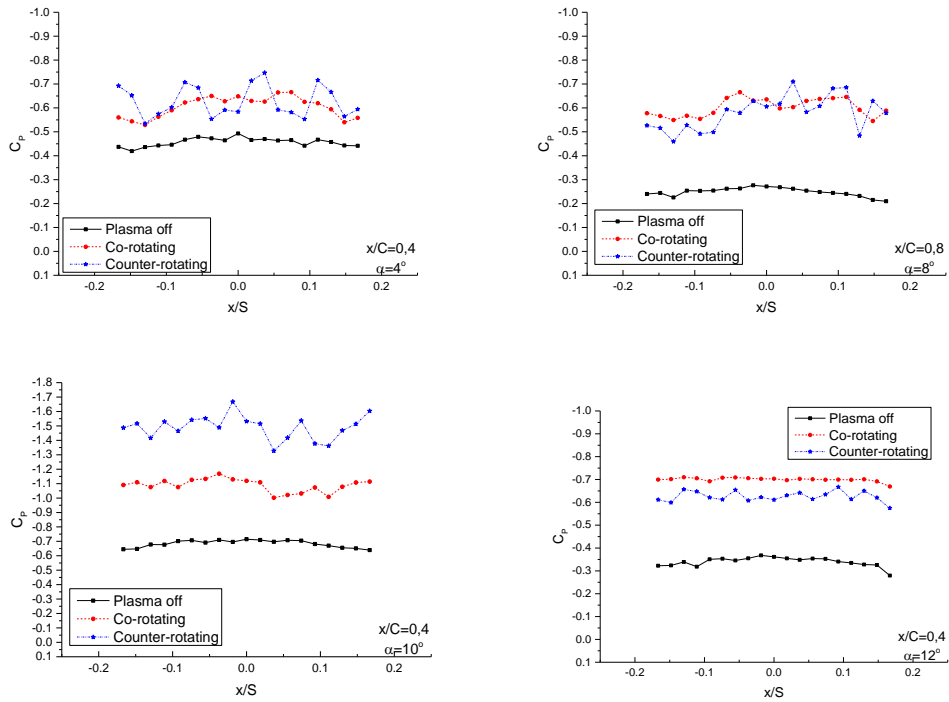


Figure 7. Spanwise pressure distribution of the NACA2415 airfoil at $Re = 5 \times 10^4$ and varied attack angles

The flow around the NACA2415 airfoil is visualized at 20×10^3 of Reynolds number. The flow structure around the airfoil is seen in Figure 8 at 10° of attack angle. Red dash line indicates the flow visualization plane for co-rotating and counter-rotating DBD-VG. For the plasma off case, it seems that the flow separated from the leading edge of the airfoil. But the separated flow comes near the surface of the airfoil when the plasma vortex generators are activated. It is seen that the flow visualization results support the pressure measurements and aerodynamic force measurements for the stall angle. It can be clearly reported that the plasma actuators have an important contribution to the flow control around the airfoil.

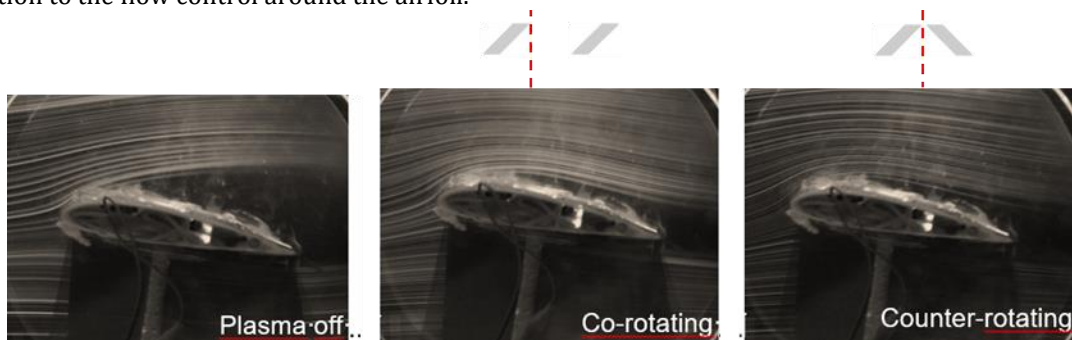


Figure 8. Flow visualization results for the base airfoil, co-rotating and counter-rotating DBD VGs airfoil at 10° of AoA

4. Conclusions

The main aim of this study is to gain some understanding of the phenomenon for the NACA2415 airfoil equipped with dielectric barrier discharge plasma vortex generators at low Reynolds number. The following list of conclusions achieved:

- The re-attached flow and laminar separation bubble formations are observed.
- Long and short bubble structures are experimentally investigated in this study.
- The 3D flow structure is generated by the DBD VGs plasma actuators and showed in the pressure coefficient results.
- The stall angle was shifted and the lift coefficient is increased.

- The drag coefficient of the airfoil is decreased for all cases. However, it is also observed that the decrease observed varies for different angle of attacks for both DBD-VGs models.

For further studies, varying effectiveness of electrical parameters of DBD-VGs plasma actuators and more vortex generator structures can be considered for an extended investigation. Moreover, the parameters that affect the structure of the accretive longitudinal vortex can be investigated in details such as electrical properties, structures of actuators, flow properties, ambient conditions and the electrode yawing angle. In addition, a sensor-actuator based control system can be implemented to the DBD-VGs vortex generators for aerodynamic flow control applications.

Acknowledgment

The authors would like to acknowledge the financial support of this work by the Scientific Research Projects (BAP) of the Çukurova University under the Contract Number of FBA-2019-12084.

Nomenclature

AoA	angle of attack
C	chord
CoRot	co-rotating
CounterRot	counter-rotating
C_D	drag coefficient
C_L	lift coefficient
C_P	pressure coefficient
DBD	dielectric barrier discharge
DBD-VG	dielectric barrier discharge vortex generator
LE	leading edge
LSB	laminar separation bubble
MAVs	micro air vehicles
sDBD	single dielectric barrier discharge
P	pressure
TE	trailing edge
Re	Reynolds number
U	free stream velocity
UAVs	unmanned air vehicles
VG	vortex generator
V_{PP}	peak to peak voltage
<i>Greek letters</i>	
α	angle of attack
ρ	density of the air
μ	dynamic viscosity of the air
x	direction

References

- [1] Wang, J. J., Li, Y. C., Choi, K. S. 2008. Gurney Flap-Lift Enhancement, Mechanisms and Applications. Progress in Aerospace Sciences, 44, 22-47.
- [2] Zhang, P. F., Liu, A. B., Wang, J. J. 2009. Aerodynamic Modification of a NACA 0012 Airfoil by Trailing-Edge Plasma Gurney Flap. AIAA Journal, 47, 2467-2474.
- [3] Zhao, H., Wu, J. Z., Luo, J. S. 2004. Turbulent Drag Reduction by Traveling Wave of Flexible Wall. Fluid Dynamics Research, 34, 175-198.
- [4] Itoh, M., Tamano, S. 2012. Drag Reduction in Turbulent Boundary Layers by Spanwise Travelling Waves with Wall Deformation, Journal of Turbulence, 13, 1-26.
- [5] Saddoughi, S., Bennett, G., Boespflug, M., Puterbaugh, S. L., Wadia, A. R. 2015. Experimental Investigation of Tip Clearance Flow in a Transonic Compressor with and without Plasma Actuators. Journal of Turbomachinery, 137, 1-10.
- [6] Jukes, T., Choi, K. S. 2013. On the Formation of Streamwise Vortices by Plasma Vortex Generators. Journal of Fluid Mechanics, 733, 370-393.

- [7] Jukes, T., Choi, K. S. 2012. Dielectric-Barrier-Discharge Vortex Generators: Characterization and Optimization for Flow Separation Control. *Experiments in Fluids*, 52, 329-345.
- [8] Segawa T., Furutani H. 2013. Flow Control on a NACA 4418 Using Dielectric-Barrier-Discharge Vortex Generators. *AIAA Journal*, 51, 452-464.
- [9] Choi, K. S., Jukes, T. N., Whalley, R. D., Feng, L. H., Wang, J. J., Matsunuma, T., Segawa, T. 2015. Plasma Virtual Actuators for Flow Control. *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*, 3, 22-34.
- [10] Akbıyık, H., Yavuz, H., Akansu, Y. E. 2016. Investigation of the Effect of the Plasma Actuators Vertically Placed on the Spanwise of NACA0015 Airfoil. 8th International Exergy, Energy and Environment Symposium (IEEES-8), 1-4 May, Antalya, Turkey.
- [11] Aram, S., Shan, H., Lee, Y. T. 2016. Application of an Integrated Flow and Plasma Actuation Model to an Airfoil. *AIAA Journal*, 54, 2201-2210.
- [12] Khoshkhoo, R., Jahangirian, A. 2016. Numerical Simulation of Stall Flow Control Using a DBD Plasma Actuator in Pulse Mode. *Plasma Science and Technology*, 18, 933-942.
- [13] Sun, M., Yang, B., Peng, T., Lei, M. 2016. Optimum Duty Cycle of Unsteady Plasma Aerodynamic Actuation for NACA0015 Airfoil Stall Separation Control. *Plasma Science and Technology*, 18, 680-685.
- [14] Zhang, X., Huang, Y., Wang, X., Wang, W., Tang, K., Li, H. 2016. Turbulent Boundary Layer Separation Control Using Plasma Actuator at Reynolds Number 2000000. *Chinese Journal of Aeronautics*, 29, 1237-1246.
- [15] Jukes, T., Choi, K. S. 2009. Flow Control around a Circular Cylinder Using Pulsed Dielectric Barrier Discharge Surface Plasma. *Physics of Fluids*, 21, 1-12.
- [16] Moreau, E. 2007. Airflow Control by Non-thermal Plasma Actuators. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40, 605-636.
- [17] Grundmann, S., Tropea, C. 2008. Active Cancellation of Artificially Introduced Tollmien-Schlichting Waves Using Plasma Actuators. *Experiments in Fluids* 44, 795-806.
- [18] Jukes, T., Choi, K. S., Johnson, G., Scott, S. 2006. Turbulent Drag Reduction by Surface Plasma Through Spanwise Flow Oscillation. In: 3rd AIAA Flow Control Conference, 5-8 June, California, USA.
- [19] Choi, K. S., Jukes, T., Whalley, R., 2011. Turbulent Boundary-Layer Control with Plasma Actuators. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 369, 1443-1458.
- [20] Okita, Y., Jukes, T., Choi, K. S., Nakamura, K. 2008. Flow Reattachment over an Airfoil Using Surface Plasma Actuator. 4th AIAA Flow Control Conference, 23-26 June, Washington, USA.
- [21] Porter, C., Abbas, A., Cohen, K., McLaughlin, T., Enloe, C. L. 2009 Spatially Distributed Forcing and Jet Vectoring with a Plasma Actuator. *AIAA Journal*, 47, 1368-1378.
- [22] Bolitho, M., Jacob, J. 2008. Thrust Vectoring Flow Control Using Plasma Synthetic Jet Actuators. 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 7-10 January, Nevada, USA.
- [23] Hu, X., Zhang, J., Hui, Z., Luo, Y., Guo, P., & Wang, J. 2021. Flow control of automobile with plasma vortex generator. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 35(6), 2493-2502.
- [24] Natarajan, E., Freitas, L. I., Chang, G. R., Al-Talib, A. A. M., Hassan, C. S., & Ramesh, S. 2021. The hydrodynamic behaviour of biologically inspired bristled shark skin vortex generator in submarine. *Materials Today: Proceedings*, 46, 016009.
- [25] Vernet, J. A., Örlü, R., Söderblom, D., Elofsson, P., & Alfredsson, P. H. 2018. Plasma streamwise vortex generators for flow separation control on trucks. *Flow, turbulence and combustion*, 100(4), 1101-1109.
- [26] Said, I., Poonasparan, M. K., Bohari, B., Idris, A. C., Rahman, M. R. A., & Saad, M. R. 2021. The Effect of Streamwise Location of Micro Vortex Generator on Airfoil Aerodynamic Performance in Subsonic Flow. *Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation*, 53(2), 173-178.
- [27] Mueller, T. J. 1999. Aerodynamic Measurements at Low Reynolds Numbers for Fixed Wing Micro-Air Vehicles. Development and Operation of UAVs for Military and Civil Applications, Hessert Center for Aerospace Research, University of Notre Dame, 8.1-8.32.
- [28] Horton, H. P. 1968. Laminar Separation Bubbles in Two and Three Dimensional Incompressible Flow, University of London, UK.

Kayseri’de Tramvay Hattı Boyunca Gerçekleşen Trafik Kazalarının İncelenmesi

Alper KÜL¹  - M. Tamer ŞENEL^{1*} 

¹Erciyes Üniversitesi Fen Fakültesi Matematik Bölümü, KAYSERİ

(Alınış / Received: 28.05.2021, Kabul / Accepted: 22.08.2021, Online Yayınlanma/ Published Online: 31.08.2021)

Anahtar Kelimeler

Veri madenciliği
Trafik kazaları
Kural bulma
Sınıflandırma

Öz: Bu çalışmada, Kayseri ili tramvay hattı boyunca meydana gelen trafik kazaları, oluş nedenleri, meydana geliş zamanı, ve kazaya karışanlar açısından veri madenciliği yöntemleri ile incelenmiştir.

Examination of Traffic Accidents in the Tramway Route in Kayseri

Keywords

Data mining
Traffic accidents
Rule finding
Classification

Abstract: In this study, traffic accidents occurred along the tram line of Kayseri province, causes and time of the accident were examined in terms of those who involved in the accident by data mining methods

*İlgili Yazar, email: senel@erciyes.edu.tr

1. Giriş

Trafik insanların, diğer canlıların ve araçların karayolları üzerindeki hal ve hareketleridir. Ayrıca trafik toplumsal düzen açısından da büyük bir önem taşımaktadır. Buradaki en olumsuz etken ise trafik kazalarıdır.

2019 yılı verilerine göre ülkemizde her geçen gün saatte ortalama 133 trafik kazası meydana gelmektedir [1]. Bu kazaların saatte ortalama 19 adedi yaralanmalı veya ölümlü trafik kazalarıdır. Bu kazalarda günde ortalama 15 can kaybı yaşanmış, günde ortalama 360 kişi de yaralanmıştır. Bu durum yıla yayıldığında her yıl ortalama 5000 ila 7000 kişi trafik kazalarında hayatını kaybediyor ve 200000 ila 300000 kişi de yaralanıyor. Kazaların ortaya çıkmasındaki en önemli etkenin insan olduğu görülmektedir.

TÜİK(Türkiye İstatistik Kurumu)’den alınan verilere göre örneğin 2018 yılında ülkemizdeki toplam taşıt sayısı 22.865.921 adettir [2]. Yıl içerisinde toplamda 1.229.364 kaza gerçekleşmiştir. Bu ise mevcut araç sayısının %5,37 si kadar kaza gerçekleştiği durumunu ortaya çıkarır. Gerçekleşen bu kazalarda 6.675 kişi hayatını kaybetmiş, 307.071 kişi ise yaralanmıştır. Bu kazaların 1.184.732’si şehir merkezleri ve ilçelerinde gerçekleşirken; kazaya karışan kişilerin 4.836’sı hayatını kaybetmiş, 249.687’si ise yaralanmıştır. Geriye kalan 44.632 kaza ise merkeze uzak yerlerde veya şehirler arası yolculuk yaparken gerçekleşmiş; bu kazalarda ise 1.839 kişi hayatını kaybedip, 57.384 kişi ise yaralanmıştır [3]. Bir oranlama yaparsak şehir merkezi ve çevresinde yapılan kazaların %0.4’ü ölümlü kazaya dönüşürken; şehirler arası yapılan kazalarda ise kazaların %4.1 i ölümlü kazaya dönüşüyor. Buradan şehirler arası yolculuklarda yapılan kazalarda ölüm riskinin daha yüksek olduğu çıkarımını yapabiliriz. Buradan da şehirler arasında kaza sayısının fazla olma sebebinin yüksek hız olduğu tahminlemesi yapılabilir.

Bu çalışmada son yıllarda popüleritesini artıran veri madenciliği teknikleri ile Kayseri ilinde tramvay güzergâhında gerçekleşmiş olan trafik kazalarının incelenmesi yapılmış ve bunun için Kayseri Trafik Şube Müdürlüğü ve Kayseri Büyükşehir Belediyesi’nden yaralanmalı ve ölümlü olan kazaların veri seti temin edilmiştir. Bu veri setine veri madenciliği teknikleri uygulanarak kazaya sebebiyet veren durumlar ve kaza türü ile ilgili kurallar bulmak amaçlanmıştır. Eldeki ham veri; veri temizleme, birleştirme ve dönüştürme işlemlerine tabi tutulmuştur. İndirgenmiş veriyi sınıflandırmak için Weka’ nın karar ağaçları ve kural bulma algoritmaları kullanılmıştır. Sonuçta, anlamlı ve yararlı kurallar bulunmuş ve yorumlanmıştır.

Sigortacılık, borsa, sağlık, bankacılık, istihbarat, satış ve pazarlama, eğitim, mühendislik, genetik, ulaşım gibi karar verme sürecine ihtiyaç duyulan birçok alanda veri madenciliği uygulamaları kullanılmaktadır.

Atalay ve arkadaşları [4], Türkiye’de 1977 ve 2006 yılları arasında gerçekleşmiş olan kaza verilerini analiz etmek adına zaman serisi analiz yöntemlerinden ARIMA’yı kullanarak, kazaların en çok ve en az olduğu dönemleri

tahminlemişlerdir. Karamaşa, çalışmasında; Türkiye’de bayramlarda meydana gelen trafik kazalarını veri madenciliği tekniklerinden olan Birliktelik Kuralları içerisinde Apriori algoritması ile incelemişler ve meydana gelen kazaların ortak noktalarını belirleyen kurallar elde etmişlerdir [5]. Smeed R.J., [6] ve Adams, J. [7], kaza analizleri üzerine yapılan çalışmalarda öncü çalışmalar yapmışlardır. 1949 yılında 20 farklı ülkeye ait kazaları karşılaştırmış ve sonucunda bir regresyon modeli geliştirmiştir. Geliştirilen model, araç trafik riski ile araç sahipliği arasında ters orantı olduğunu göstermiştir. Güler, karayolu trafik kazaları üzerinde çalışma yapmış ve bir Kaza Analiz Kesimleri Modeli geliştirmiştir. Geliştirilen model verileri teorik olarak üretilen kuramsal bir yol kesiminde test edilmiştir [8]. Murat ve Şekerler [9] tarafından klasik ve bulanık kümeleme yöntemleri kullanılarak trafik kaza verileri tahminlenmiş ve bulunan küme merkezlerine yakın yerlerde trafik kazalarının daha çok olduğu noktalar kara nokta olarak belirlenerek, kazaya sebep olan faktörler incelenmiştir. Çelik ve Oktay çalışmalarında 2008 ile 2013 yılları arasında Erzurum ile Kars otoyolunda meydana gelen kazaları analiz edip, Multinomial Lojistik modeli ile yaralanma derecesine etki eden unsurları belirlemişlerdir. Ölümlü kaza riski üzerinde; yaş, eğitim ve yaya kaldırımı bulunması gibi faktörlerin etkili faktörler olduğunu saptamışlardır [10].

Bu çalışmada, Kayseri’de 2011-2019 yılları arasında tramvay hattı boyunca meydana gelen 2500’e yakın ölümlü ve yaralanmalı kazalar veri seti üzerinde veri madenciliği ön işleme ve sınıflandırma algoritmaları ile analizi gerçekleştirilmiştir. Ön işleme için veri temizleme, veri birleştirme, veri dönüştürme işlemleri Excel veri seti üzerinde, verilerin durumuna, yoğunluğuna göre gerçekleştirilmiştir. İndirgeme işlemi ise Excel üzerinde tramvay hattı ve güzergâhı gözlemlenerek yapılmıştır.

İndirgenen veriye Weka veri madenciliği yazılımındaki tüm sınıflandırma algoritmaları kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucunda; trafik kazalarının, ölümlü-yaralanmalı ve kazanın oluş nedeni (araç araca çarpması, sabit cisme çarpma gibi) durumuna göre sınıflandırılarak, kaza sonuçlarına göre kurallar bulunması amaçlanmıştır. Elde edilen anlamlı kuralların doğrulukları ve güvenilirlikleri test edilmiştir. Yorumlar, sınıflandırma doğruluğu en yüksek olan algoritmaların sonuçları üzerinden yapılmıştır.

Elde edilen kurallar, trafik kazalarının hangi durumlarda meydana geldiğine ilişkin önemli bilgiler vermekte ve meydana gelmeden önce trafik kazalarını engellemek için düzeltici ve önleyici faaliyetlerin planlanması noktasında karar desteği sağlayacağı düşünülmektedir.

2. Materyal ve Metot

Kurumlardaki büyük ölçekli olarak tanımlanan ve milyonlarca veriye sahip yazılım sistemlerinden, ihtiyacı karşılayacak değerli verilerin elde edilmesi işlemine Veri Madenciliği denilmektedir. Bu sayede veriler arasındaki ilişkileri ortaya koymak ve gerektiğinde ileriye yönelik doğru tahminlerde bulunmak mümkün hale gelmektedir. Veri madenciliği sayesinde karmaşık, çok net olmayan veriler anlamlı bilgilere dönüştürülür. Yapılan çalışmada veri madenciliği disiplinlerinden faydalanılmıştır.

Bu çalışmada ön işleme ve sınıflandırma aracı olarak; kaba kümeler yaklaşımıyla özellik indirgeme, özellik seçimi, karar ağaçları ve kural bulma algoritmaları kullanılmıştır. Sınıflandırma için Weka veri madenciliği programı içerisindeki algoritmalar çalıştırılmıştır. Bu algoritmalar; çalışmada en iyi sonucu veren JRip algoritması kullanılarak devam edilmiştir.

Jrip algoritması, IREP (Incremental Reduced Error Pruning) ‘in optimize edilmiş versiyonu olarak, William W. Cohen tarafından önerilen hata azaltma için “Tekrarlayan Artırımlı Budama” olarak tercüme edilebilen (Repeated Incremental Pruning to Produce Error Reduction (RIPPER) bir kural öğrenme uygulamasıdır. Algoritma, tamamı pozitif örneklerden oluşan bir kural seti kurar ve gürlüklü büyük veri setleri üzerinde etkili performans sergiler.

Bir kural oluşturmadan önce, öğrenme örneklerinin mevcut setini, geliştirilen set (genellikle 2/3) ve budanan set (genellikle 1/3) olmak üzere iki alt sete böler. Kuralı, geliştirilen setteki örneklerden yapılandırır. Kural seti, boş bir kural kümesi ile başlar ve kurallar artırımlı olarak negatif örnekler arındırılınca kadar kural setine eklenir. Geliştirilen setten bir kural üretildikten sonra, budanan örnekler üzerinde kural setinin performansını geliştirmek için koşul, kuraldan silinir. Bir kuralı budamak için, RIPPER kuraldan sadece koşulların bir son sıralamasını dikkate alır ve fonksiyonu maksimize eden kuralları seçer.

Bu çalışmada Kayseri ilinde 2011-2019 yılları arasında gerçekleşmiş olan 18 farklı özelliğe dayanan 2500’e yakın yaralanmalı ve ölümlü trafik kazaları incelenmiş ve bu çalışmaya başlarken veri seti, veri ön işleme başlığı altında; veri temizleme, veri birleştirme, veri dönüştürme işlemlerine tabi tutulmuştur.

3. Bulgular

Elde edilen veri kümelerinden problemi çözecek olanlara, Weka yazılımındaki sınıflandırma algoritmalarının pek çoğu uygulanmıştır ve doğru olarak sınıflandırılan örnek sayısını maksimize eden algoritmalar değerlendirilmeye

alınmıştır. Algoritmalar test edilirken çapraz doğrulamaya (cross validation) tabi tutulmuştur. 10 kat çapraz doğrulama (10 fold cross validation) olarak test edilmiştir. K-fold çapraz doğrulamada veri ilk olarak k eşit (veya hemen hemen eşit) parçaya bölünür. Ardından, her iterasyonda farklı bir parça (fold), kalan k-1 parça (fold) öğrenme için kullanıldığında bu farklı parça (fold) ile doğrulama yapılarak k iterasyon tamamlanır.

Birkaç veri setiyle yapılan denemeler sonucunda; Weka kural bulma algoritmalarından JRip algoritmasının, diğer tüm algoritmalara göre daha fazla örneği doğru olarak sınıflandırdığı ve kural bulmadaki üstünlüğü tespit edilmiştir. Ayrıca; Ridor, NNge ve PART algoritmaları da yüksek doğrulukta sınıflandırma yapmakta ve daha fazla ve uzun kurallar bulmaktadır. Bu nedenle; JRip algoritmasının amacımıza uygun sonuçlar için uygulanması uygun görülmüştür. JRip haricindeki; DecisionTable, ZeroR, PART ve OneR kural bulma algoritmaları da tek tek uygulanmıştır. Bu algoritmalarından JRip algoritmasının kaza türüne göre ve oluş nedenine göre ürettiği kurallar sırasıyla Tablo 2 ve Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 1. Oluş nedenine göre sınıflandırma istatistikleri

TP Rate	FP Rate	Precision	Recall	FMeasure	MCC	ROC-Area	PRC-Area	Class
0,983	0,028	0,986	0,983	0,984	0,953	0,970	0,975	AA
0,976	0,134	0,690	0,976	0,809	0,758	0,916	0,679	AY
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,784	0,008	AD
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,771	0,061	DT
0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	-0,007	0,755	0,071	SCC
0,097	0,003	0,600	0,097	0,167	0,228	0,798	0,177	YC
0,883	0,050	0,000	0,883	0,000	0,000	0,938	0,816	Weighted Avg.

Tablo 2. JRip algoritmasının kaza türüne göre çıkardığı kurallar

JRIP rules:

(HAVA_DURUMU = Y) and (KAZA_SAAT = 20-21) and (MAHALLE >= 314) => KAZA_TURU=OLUMLU (3.0/1.0)
=> KAZA_TURU=YARALANMALI (1994.0/7.0)

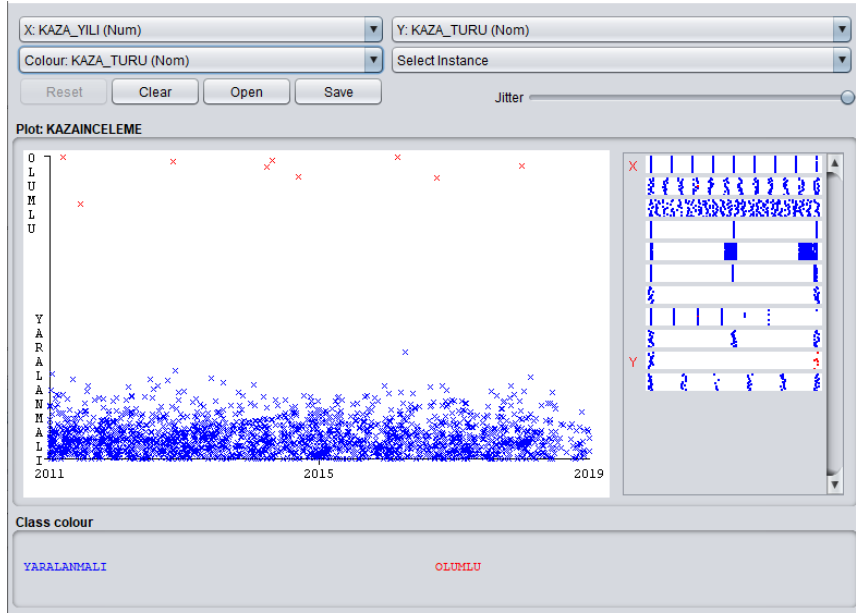
Tablo 3. JRip algoritmasının oluş nedenine göre çıkardığı kurallar

JRIP rules:

(KAZAYA_KARISAN_ARAC <= 1) and (KAZA_YILI >= 2016) and (KAZA_SAAT = 09-10) and (KAZA_YILI <= 2017) => OLUS_NEDENI=SCC (4.0/0.0)
(KAZAYA_KARISAN_ARAC <= 1) and (KAZA_SAAT = 04-05) and (KAZA_YILI <= 2017) => OLUS_NEDENI=YC (6.0/0.0)
(KAZAYA_KARISAN_ARAC <= 1) and (KAZA_SAAT = 01-02) => OLUS_NEDENI=YC (8.0/2.0)
(KAZAYA_KARISAN_ARAC <= 1) and (MAHALLE <= 303) => OLUS_NEDENI=AY (390.0/95.0)
(KAZAYA_KARISAN_ARAC <= 1) and (YOL >= 3005) => OLUS_NEDENI=AY (177.0/61.0)
(KAZAYA_KARISAN_ARAC <= 1) and (KAZA_SAAT = 18-19) => OLUS_NEDENI=AY (15.0/2.0)
(KAZAYA_KARISAN_ARAC <= 1) and (KAZA_AYI = MART) => OLUS_NEDENI=AY (7.0/2.0)
(KAZAYA_KARISAN_ARAC <= 1) and (KAZA_SAAT = 19-20) => OLUS_NEDENI=AY (13.0/5.0)
=> OLUS_NEDENI=AA (1377.0/77.0)

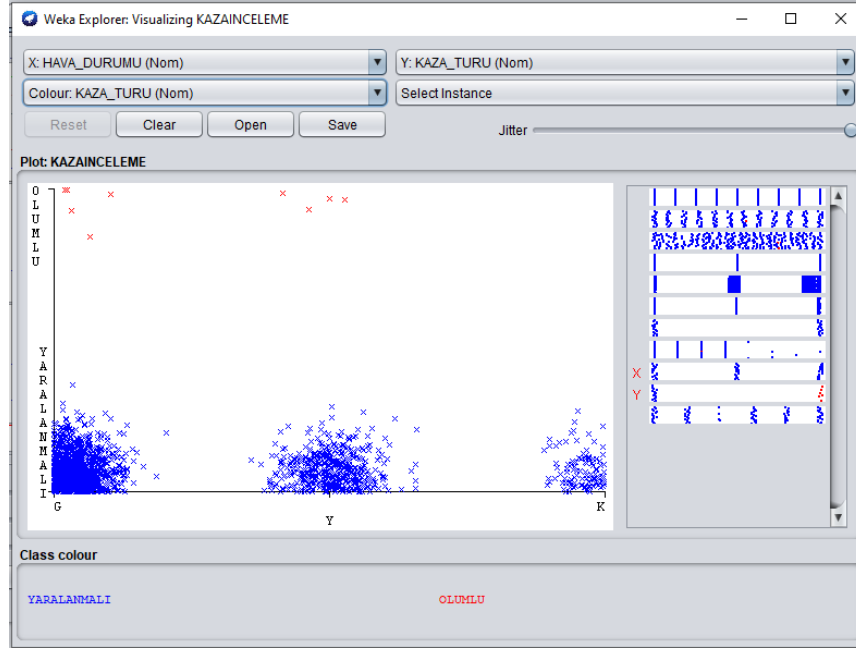
Yaptığımız çalışmaların bir kısmı ölümlü ve yaralanmalı kaza sonuçlarını doğuran parametrelerin birbirleri ile olan ilişkisini incelemek iken diğer kısmı ise yapılan kazaların nasıl gerçekleştiğini anlamak ve gerçekleşmesine yol açan parametreleri birbirleri arasında değerlendirmektir.

Bulguların görselleri ise aşağıda verilmiştir.



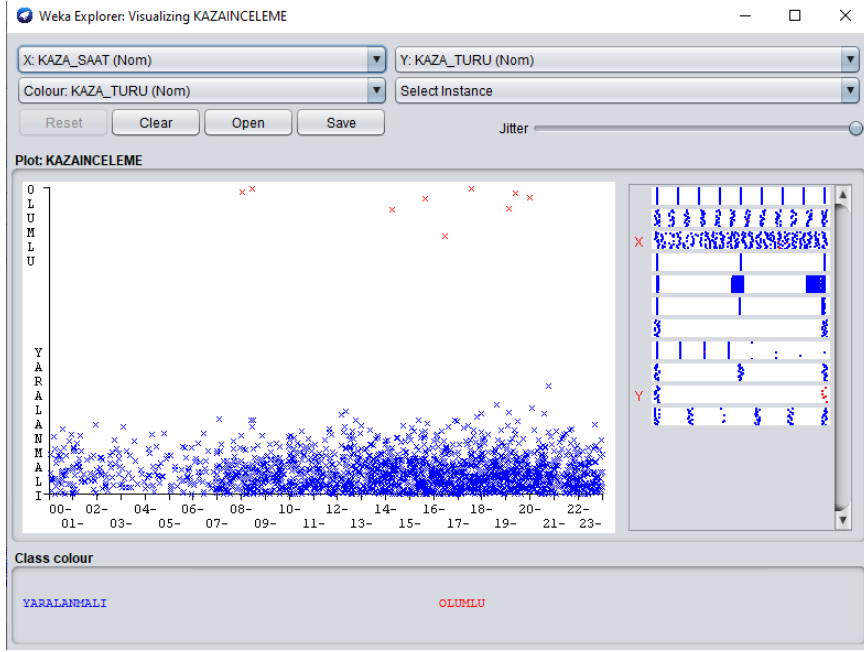
Şekil 1. Kaza yılının, kaza türü ile ilişkisi

Şekil 1 de görüldüğü üzere yaralanmalı kazaların daha çok gerçekleştiği anlaşılmaktadır.



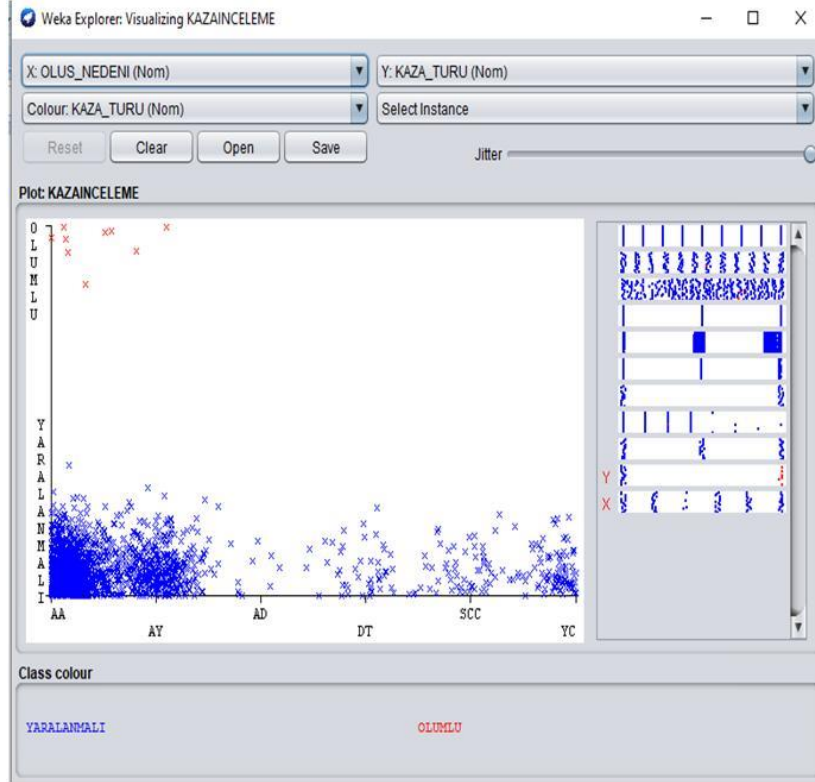
Şekil 2. Hava durumunun, kaza türü ile ilişkisi

Şekli incelediğimizde tahmin edilenin aksine güneşli havalarda kar yağışlı havalardan daha fazla kaza gerçekleşmiştir.



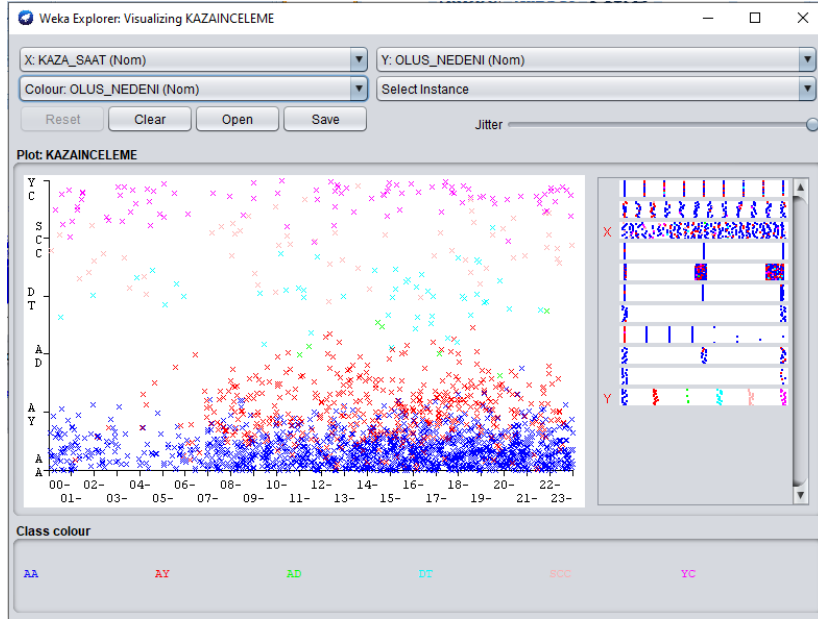
Şekil 3. Kaza saatlerinin, kaza türü ile ilişkisi

Şekil 3'e göre gece saatlerinde daha az kaza meydana gelmiş, gündüz ve akşam saatlerinde ise kaza sayısı artmıştır. Sabah 8.00-9.00, akşam ise 18.00-19.00 saat aralığında kaza yoğunluğu gözlenmektedir.



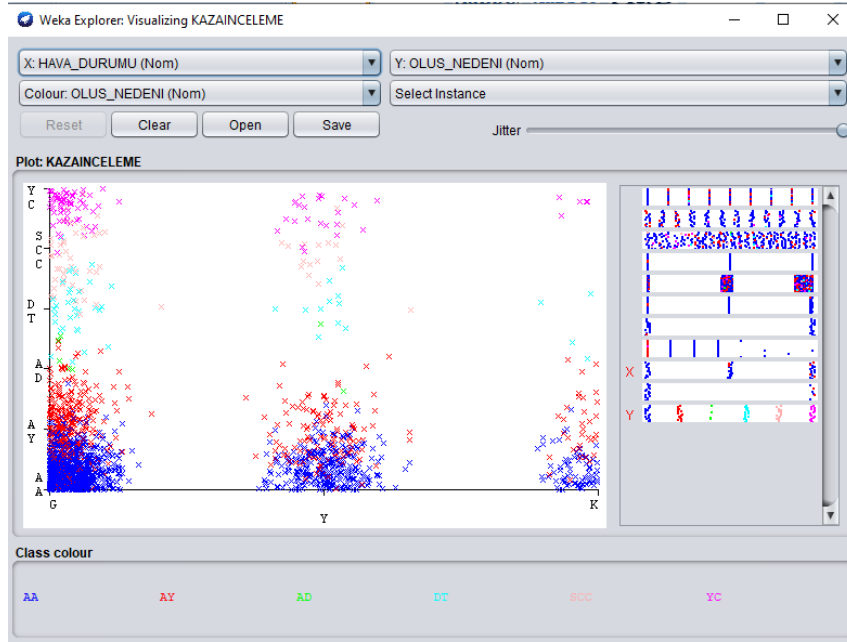
Şekil 4. Kazaların oluş nedeninin, kaza türü ile ilişkisi

Şekil 4'e göre kaza oluş nedeni AA olarak kodlanan araç araca çarpışma parametresinin ilk sırada, AY olarak kodlanan araç yayaya çarpması parametresinin ise ikinci sırada olduğu görülmektedir.



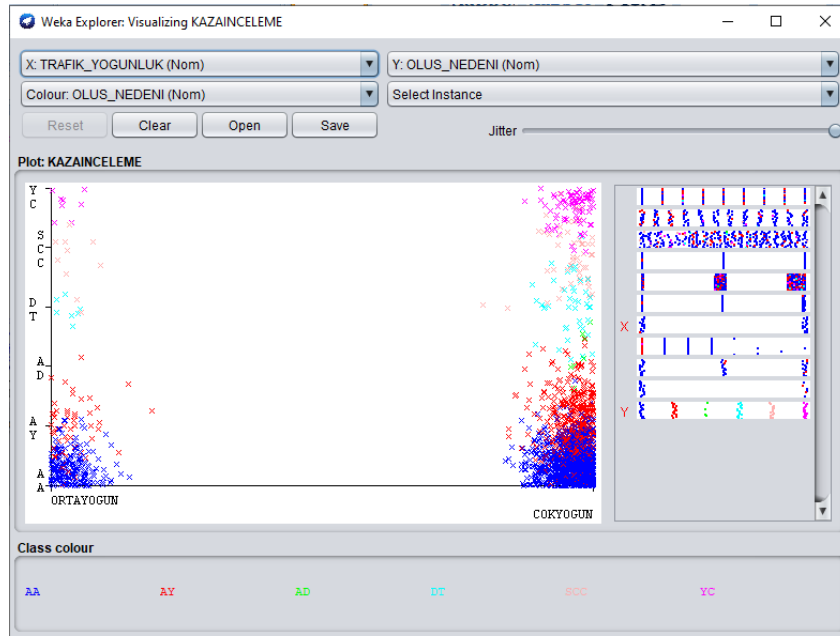
Şekil 5. Kaza saatlerinin, kazanın oluş nedeni ile ilişkisi

Kaza nedenleri ile kaza saatleri arasındaki ilişkiyi değerlendirdiğimizde gece saatleri çoğunlukla araç araca çarpışma görülürken, gündüz ve akşam saatleri araç araca çarpışmanın yanı sıra araç yayaya çarpma ve diğer kaza nedenlerinin de daha sık olduğu görülmektedir.



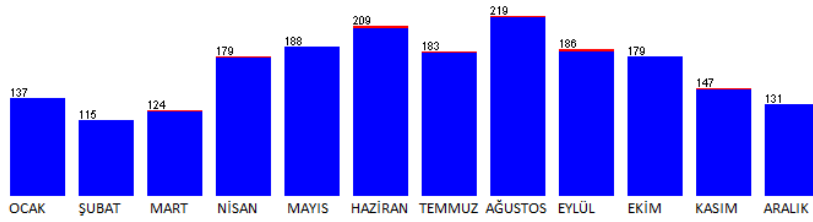
Şekil 6. Hava durumunun, kaza türü ile ilişkisi

Şekil 6’ ya göre hava durumu ile kaza türü incelendiğinde tahmin edilenin aksine kazaların daha çok güneşli havalarda olduğu görülmektedir.



Şekil 7. Trafik yoğunluğunun, kazanın oluş nedeni ile ilişkisi

Şekil 7'e göre trafiğin daha yoğun olduğu bulvarlarda yaşanan kaza sayıları, trafiğin daha az yoğun olduğu cadde ve sokaklara göre daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 8. 2011-2019 tarihleri arasında çalışmış olduğumuz güzergâhda gerçekleşen kazaların aylara göre sayıları

Şekil 8'e göre en çok kaza ağustos ayında en az kaza Şubat ayında gerçekleşmiştir.

4. Tartışma ve Sonuç

Kurallarımızı incelediğimizde ilk kuralımızda hava durumunun yağmurlu olduğunda ve 20.00-21.00 saat aralığında özellikle de 314 no.lu mahalle (Kılıçaslan) ve sonrasındaki mahallelerde araç kullanımının kaza riskinin daha fazla olduğu sonucu çıkarılabilir.

Trafik kazalarının öğleden önce en çok 8.00-9.00, öğleden sonra ise 18.00-19.00 arasında gerçekleştiğini, ayrıca en çok kaza yapılan ayın Ağustos ayı olduğu sonucu ortaya çıkmıştır.

Gece saat 01.00-05.00 arasında gerçekleşen kazalarda ise genellikle araçların yoldan çıkma sebebiyle kaza yaşandığı anlaşılmaktadır.

Ayrıca meydana gelen kazaların bir kısmında ise hız faktörü ve diğer faktörlerin de etken olabileceği açıktır. Araçların kaç km hızla çarptığı ya da çarpıştığı, sürücünün takip mesafesini koruyup korumadığı, sürücünün hız kurallarına uyup uymadığı, sürücünün dikkat dağıtacak bir davranış yapmadığı (telefonla konuşmak, mesaj atmak vs.) veri setlerimizde yer almadığı için bu kurallar değerlendirme dışında tutulmuştur. Bu sebeple kazaların bu etkenlerden kaynaklanıp kaynaklanmadığı incelenememiştir.

İncelemeler sonucunda yaralanmalı ve ölümlü kazalara sebebiyet veren durumlara baktığımızda kaza saati, kaza ayı ve dolayısıyla hava durumu, kazanın gerçekleştiği yerdeki trafik yoğunluğu etkenlerini gördük. Kazaların bir çoğunun ise sürücü kusuru yani; trafik kurallarını ihlal, emniyet kemeri takmama, hız aşımı olduğunu söyleyebiliriz. Genel olarak baktığımızda ise 2013 yılından itibaren kazalarda bir miktar azalma olduğunu söyleyebiliriz. Toplamda en çok kazanın Ağustos en az kazanın ise Şubat ayında olduğu çıkarımını yapabiliriz. Kaza saatlerini incelediğimizde en çok kaza 170 kaza ile saat 18.00-19.00 saat aralığında yani işten dönüş saati olduğu çıkarımını yapabiliriz. Sabah saatlerinde ise en çok 8.00-9.00 aralığında yani işe gidiş saati olarak nitelendirebileceğimiz saatte 123 kaza gerçekleşmiştir. Gün içerisinde en az kaza olan saatin ise sabah 04.00-05.00

aralığı olduğunu görmekteyiz. Fakat bu saat aralığında yapılan kazalarda ise ölüm oranının diğer saatlere göre çok daha yüksek olduğunu görmekteyiz. En çok kaza gerçekleşen mahalleler Sanayi Mahallesi, Alpaslan Mahallesi ve Osman Kavuncu Mahallesi olurken; en çok kaza gerçekleşen yollar ise Osman Kavuncu Bulvarı, Sivas Bulvarı, Ahmet Gazi Ayhan Bulvarı, Aşık Veysel Bulvarı' dır.

Kaynakça

- [1] <http://www.trafik.gov.tr/istatistikler37>, (Erişim Tarihi: Ekim 2020)Banica, T.,Belinschi, S. T., Capitaine, M.,Collins, B. 2011. FreeBesselLaws. CanadianJournal of Mathematics, 63(2011), 3-37.
- [2] <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Aralik-2018-30629>, (Erişim Tarihi: Ağustos 2020)Wangler, T. P. 2008. RF Linear Accelerators. 2nd, completelyrevisedandenlargededition. WILEY-VCH VerlagGmbH&Co. KGaA, Weinheim, 450s.
- [3] <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Karayolu-Trafik-Kaza-Istatistikleri-2018-30640>, (Erişim Tarihi: Ağustos 2020)Çolakoğlu, K. ed. 1999. Klasik Mekanik. PalmeYayıncılık, Ankara, 361s.
- [4] Atalay, A., Tortum, A., Gökdağ M., 2012. Türkiye'de 1977-2006 yılları arasında meydana gelen aylık trafik kazalarının zamansal analizi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 18(3), 221-229.
- [5] Karamaşa, Ç., 2018. Bayramlarda Gerçekleşen Trafik Kazalarının Birliktelik Kuralları İle Analiz Edilmesi. Anadolu Üniversitesi, Sosyal Bilimler Entitüsü, Doktora Tezi, Eskişehir, 206 s.
- [6] Smeed, R.J.,1949. Some statistics aspects of road safety research. Journal of the Royal Statistical Society, Series A, (General), 112(1), 1-34.
- [7] Adams, J.,1987. Smeed"s Law: Some further thoughts. Journal of Traffic Engineering and Control, 10(7), 70-73.Güler, G. 2013. Planyalanmış kızılçam (Pinusbrutia Ten.) ürünlerinde taguchi deney tasarımı ile optimum işleme şartlarının belirlenmesi.
- [8] Güler, H., 2017.Karayolu trafik kazalarına yeni bir yaklaşım:kaza analiz kesimleri modeli.Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi,23(6):707-717.
- [9] Murat, Y.Ş., şekerler, A.,2009. Trafik kaza verilerinin kümelenme analizi yöntemi ile modellenmesi. IMO Teknik Dergi, 20(3), 4759-4777.
- [10] Çelik, A.K., Oktay, E., 2014. A multinomial logit analysis of risk factors in fluencing road traafic injury severities in the Erzurum and Kars Provinces of Turkey, Accident Analysis and Prevention, 72, 66-77.

Ekler

Ek A. Kodlamalar

Oluş Nedeni Kodları

AY=Araç-Yaya
 AA=Araç-Araç
 AD=Araçtan İnsan Düşmesi
 ACD=Araçtan Cisim Düşmesi
 DT=Devrilme-Takla
 SCC=Sabit Cisme Çarpma
 YC=Yoldan Çıkma

Hava Durumu Kodları

G=Güneşli
 Y=Yağmurlu
 K=Karlı

Kaza Türü Kodları

1=Yaralanmalı
 2=Ölümlü

***Ralstonia eutropha* H16 suşuyla sulu çözeltilerden kurşun ve bor biyogiderimi**

Kamil Varınca¹, Miraç Uçkun², Şeyma Akkurt¹, Aysel Alkan Uçkun*¹

¹ Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, 02040, Merkez/Adıyaman

² Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü, 02040, Merkez/Adıyaman

(Alınış / Received: 30.05.2021, Kabul / Accepted: 05.07.2021, Online Yayınlanma / Published Online: 31.08.2021)

Anahtar Kelimeler

Biyosorpsiyon
Ralstonia eutropha
Atık suların biyolojik arıtımı
Sulardan metal biyogiderimi
Bakterilerin SEM görüntüleri

Öz: Bu çalışmada, su ortamlarına en fazla karışan ve canlılar üzerinde önemli toksik etkileri bulunan kurşun (Pb) ile kullanımı giderek yaygınlaşan ve ülkemiz için oldukça büyük stratejik öneme sahip olan bor (B) elementinin sulardan gideriminde, geleneksel yöntemlere alternatif olarak daha ekonomik, kullanışlı ve etkin bir yöntem olan biyolojik arıtımın kullanılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, *Ralstonia eutropha* H16 suşunun Pb ve B bağlama kapasitesi test edilmiştir. Minimum İnhibisyon Konsantrasyonları (MİK), kurşun klorür (PbCl₂) için 1365 ppm, borik asit (H₃BO₃) için 2500 ppm olarak belirlenmiştir. PbCl₂ ve H₃BO₃'ün üç alt dozu (PbCl₂ için 5, 25, 50 ppm; H₃BO₃ için 500, 1000, 1500 ppm) bakterilere 24 saat boyunca uygulanmış ve bu sürenin sonunda kültür ortamında, bakteriyel hücrelerin yüzeyinde ve içinde olmak üzere üç farklı ortamda biriken Pb ve B konsantrasyonları bir İndüktif Eşleşmiş Plazma Kütle Spektrometresi (ICP-MS) kullanılarak tayin edilmiştir. En fazla Pb biyogiderimi %88'lik bir oranla 5 ppm PbCl₂ uygulamasında, en fazla B giderimi ise %7'lik bir oranla 500 ppm H₃BO₃ uygulamasında gözlenmiştir. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) görüntüleri, PbCl₂ uygulanan hücrelerin yüzeyinin kontrole göre pürüzlü olduğunu ve önemli derecede çökeltmeler olduğunu göstermiştir. Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDX) spektrumları ise PbCl₂ uygulanan hücrelerde Pb varlığını doğrulamıştır. Çalışmanın sonuçları, *R. eutropha* H16 suşunun sulardan Pb gideriminde önemli derecede etkili olduğunu ancak B gideriminde yeterli olmadığını göstermiştir.

Lead and boron bioremoval from aqueous solutions by *Ralstonia eutropha* H16 strain

Keywords

Biosorption
Ralstonia eutropha
Biological treatment of waste waters
Metal bioremoval from waters
SEM images of bacterias

Abstract: In this study, it was aimed to use biological treatment, which is a more economical, useful and effective method alternative to traditional methods in removal of lead (Pb), which is the most involved element in aquatic environments and has significant toxic effects on organisms from the waters, and boron (B), which is increasingly widespread and has great strategic importance for our country. For this purpose, the binding capacity of *Ralstonia eutropha* H16 strain to Pb and B was tested. Minimum Inhibition Concentrations (MIC) were determined as 1365 ppm for lead chloride (PbCl₂) and 2500 ppm for boric acid (H₃BO₃). Three sub-doses of PbCl₂ and H₃BO₃ (5, 25, 50 ppm for PbCl₂; 500, 1000, 1500 ppm for H₃BO₃) were applied to the bacteria for 24 hours, and at the end of this period the metal concentrations accumulated in the medium, on the surface of the bacterial cells and inside the cells were calculated using a Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS). The highest Pb removal was observed in 5 ppm PbCl₂ application with a rate of 88%, and the highest B removal was observed in 500 ppm H₃BO₃ application with a rate of 7%. Scanning Electron Microscope (SEM) images showed that the surface of the cells treated with PbCl₂ was rough compared to the control and there was significant precipitations. Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX) spectra confirmed the presence of Pb in PbCl₂ treated cells. The results of the study showed that *R. eutropha* H16 strain was significantly effective in Pb removal from water, but not sufficient in B removal.

*İlgili Yazar: ayseluckun@gmail.com

1. Giriş

Gelişen sanayi ile birlikte, endüstriyel atıkların su kaynaklarına ulaşması, akarsuların ağır metallere daha çabuk ve fazla kirlenmesine sebep olmaktadır. Ağır metaller hem doğal olaylar (erozyon, rüzgâr taşınımı, volkanik etkiler, vb.) hem de antropojenik etkiler (atık su deşarjları, zirai faaliyetler, atık depolama vb.) sonucunda yer altı ve yüzeysel su kaynaklarına karışmaktadır [1]. Toprak ve su ortamlarının çeşitli toksik metallere kirlenmesi ekosistem ve insan sağlığı için ciddi bir tehdit olup uygun iyileştirici önlemlerin acilen uygulanmasını gerektirmektedir. Krom (Cr), kadmiyum (Cd), cıva (Hg), arsenik (As), kurşun (Pb) vb. ağır metallerin, çevre ve insan sağlığı üzerindeki toksik etkileri nedeniyle başlıca çevresel kirlenmeler olarak kabul edilmektedir [2].

Kurşun (Pb), yaygın bir çevresel toksik kirlenici olarak kabul edilmektedir ve kurşun-asit pillerin işlenmesinde, madencilik, metal işleme endüstrisi, nükleer reaktör koruma kalkanı, elektronik bileşenlerin ince tabakaları, araçlar, akü plakaları, boyalar, seramikler, kabloların üretimi gibi birçok alanda kullanılmaktadır [3, 4]. Ayrıca bu endüstrilerin kanalizasyon çamurunda, enerji santrali ve atık yakma tesislerinden kaynaklanan atıklarda yüksek konsantrasyonlarda bulunan tehlikeli ağır metallere biridir [4]. Düşük konsantrasyonlarda bile kurşun canlılar için toksik olup nörodejeneratif bozukluk, böbrek yetmezliği, üreme hasarı ve kanser gibi insanlar üzerinde ciddi sağlık sorunlarına neden olan mutajenik ve teratojenik bir metaldir [5]. Bu toksik özellikleri nedeniyle, ABD Çevre Koruma Ajansı (USEPA) tarafından kurşun tehlikeli inorganik atıklar listesine eklenmiş [5], içme suyundaki sınır değeri olarak da 15 µg/L belirlenmiştir [6].

Bor (B), metal ve ametal arasında bir özelliğe sahip olan yarı metaldir ve 3A grubu elementidir. Bor, doğada serbest hâlde bulunmaz, her zaman oksijene bağlıdır [7]. Bor ve bileşikleri, ekosistemlerin abiyotik ve biyotik bileşenlerinde kendilerine özgü kimyaları nedeniyle bozunamazlar. Bu nedenle tuz birikintilerinin süzülmesi ve minerallerin kayalardan ayrıştırılması gibi doğal süreçler sonucunda su ortamlarına salınırlar [8]. Ayrıca bor, antropojenik kaynaklardan da doğaya salınmaktadır [9]. Bor, doğada düşük konsantrasyonlarda yaygın bir şekilde dağılmıştır ve yüzey tatlı sularında genellikle 0,1-0,5 mg/L'den daha azdır, ancak daha yüksek konsantrasyonları birkaç alanda ölçülür [10]. Bor, bir mikro besin olup bitkilerin, tek hücreli ökaryotların ve hayvanların büyümesi için gereklidir, ancak gerekli bor seviyeleri bu organizmalar arasında farklılık gösterir [11]. Öte yandan bor belirli bir eşiğin üzerinde canlı hücreler için toksiktir. Ayrıca insanlarda bor maruziyetinin üst eşiğinden daha yüksek dozlar, testisler ve üreme fonksiyonları üzerinde zararlı bir etkiye sahiptir [7]. Bor minerallerinin endüstride kullanım alanları oldukça geniştir. Borun en yaygın kullanıldığı alan cam endüstrisi olup diğer endüstri alanları seramik, temizleme ve ağartma, alev geciktiriciler, tarım, metalürji, nükleer uygulamalar, bor elyafları, havacılık, enerji, sağlık ve çimentodur. Seramik sektöründe bor mineralleri genellikle seramik sır üretiminde ve porselen emaye yapımında frit üretimi aşamasında kullanılmaktadır [12]. Bununla birlikte, sucul ekosistemlerdeki en önemli antropojenik bor kirlilik yolu, boraks içeren deterjanların kullanılmasıdır. Boraksla zenginleştirilmiş deterjanlar ve temizlik ürünleri kullanılması durumunda, borik asit (H_3BO_3) gibi suda çözünür bor formları, evsel atık su ile kolayca kanalizasyon arıtma sistemlerine deşarj edilir [13]. Türkiye dünyanın en büyük bor ihracatçılarından biridir. Tinkal, kolemanit ve üleksit mineral konsantreleri, rafine boraks dekahidrat; boraks pentahidrat ($Na_2O \cdot 2B_2O_3 \cdot 5H_2O$); susuz boraks ($Na_2O \cdot 2B_2O_3$); ve borik asit (H_3BO_3) ihraç edilmektedir. Türkiye, dünyadaki bor rezervlerinin %73'üne sahiptir. Ülkemizde bilinen bor yatakları; Eskişehir-Kırka, Kütahya-Emet, Balıkesir- Bandırma ve Bigadiç'te bulunmaktadır [14]. Birçok endüstride yaygın olarak kullanılan bor bileşiklerinin endüstriyel gelişmelere bağlı olarak yüzeysel sulardaki konsantrasyonu artış göstermektedir. Bor, Türkiye'de su kaynaklarının kirlenmesine neden olan önemli kirlenmelerden biridir. Borun arıtılması hem insan sağlığı hem de tarımsal ürün yetiştiriciliği için büyük önem taşımaktadır. Borun giderilmesinde, konvansiyonel su arıtımı yöntemleri (pıhtılaşma, çökeltme, filtrasyon) etkili değildir. Bu nedenle, bor konsantrasyonu yüksek olan suların borun giderilmesi için özel yöntemlerin kullanılması gerekir. İyon değişimi ve ters ozmoz süreçleri önemli ölçüde giderim sağlayabilir, ancak bu yöntemler görece daha pahalıdır.

Türkiye'de Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği'nde kıta içi su kaynaklarının sınıflarına göre kalite kriterleri verilmiştir. Buna göre kurşun sınır değeri I. Sınıf sular için 0,01 mg/L, bor sınır değeri ise tüm sınıf sular için 1,0 mg/L olarak belirlenmiş olup bora karşı hassas bitkilerin sulanmasında ise sınır değer 0,3 mg/L'ye kadar düşürülmüştür. Maden sanayii atık sularının alıcı ortama deşarj standartlarında ise kurşun için sınır değer 0,5 mg/l, bor için ise sınır değer 500 mg/L olarak verilmiştir [15]. İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik'e göre içme suyunda bulunabilecek maksimum kurşun konsantrasyonu 0,01 mg/L, maksimum bor konsantrasyonu ise 1 mg/L'dir [16]. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından içme suyundaki kılavuz kurşun değeri 0,01 mg/L, bor değeri ise 2,4 mg/L olarak tayin edilmiştir [17].

Toprak ve su ortamlarının çeşitli toksik metallere kirlenmesi ekosistem ve insan sağlığı için ciddi bir tehdit olup uygun iyileştirici önlemlerin acilen uygulanmasını gerektirmektedir. Farklı endüstriyel ve tarımsal atıkların oluşturduğu ağır metallerin kirlenmiş ortamlardan (su, atık su, toprak vb.) giderilmesinde birçok yöntem kullanılmaktadır [18]. Fiziksel ve kimyasal arıtma teknolojileri (ileri oksidasyon prosesleri, kimyasal çökeltme, iyon değişimi, elektrokimyasal yöntemler, aktif karbon, membran filtrasyonu ve ters ozmoz vb.) farklı kirlenmelerin uzaklaştırmasına rağmen, artan enerji tüketimi, arıtım süreçlerinin zorluklar içermesi, ek kimyasallara ihtiyaç

duyulması, arıtma verimliliğinin düşük olması, yan ürünlerden kaynaklanan ikincil kirlilik vb. birçok dezavantajlara sahiptir [19, 20]. Bununla birlikte, kimyasal çöktürme ve elektrokimyasal arıtma, özellikle sulu çözeltideki metal iyon konsantrasyonu düşük konsantrasyonlarda etkili değildir ve proses sonunda arıtımı oldukça zor ve maliyetli olan yüksek miktarda çamur üretilir. İyon değiştirme, membran teknolojileri ve aktif karbon adsorpsiyon işlemi, düşük konsantrasyonda ağır metal içeren atık suların arıtılması için son derece pahalıdır ve bu yüzden büyük ölçekte kullanılamazlar [21]. Biyoremediasyon prosesinde ise, metallerin giderilmesi ve geri kazanımı, kullanılan konvansiyonel fiziksel-kimyasal arıtım yöntemlerine kıyasla çevre dostu, ekonomik, kolay uygulanabilir olması, ek kimyasal gerektirmemesi, yüksek arıtma verimine sahip olması nedeniyle tercih edilmektedir [22]. Bu proses; kontamine toprak ve su ortamlarından, kirlilik yaratan bileşiklerin (metal, pestisit vb.) doğada doğal olarak bulunan mikroorganizmalar (bakteri, mantar, maya, yosun vb.) tarafından biyolojik olarak parçalanarak çevreye daha az zararlı bileşiklere dönüştürülmesi ile kirlenen bölgelerin temizlenmesi işlemidir [23]. Ayrıca, bu proseste kullanılan mikroorganizmaların metallere karşı yüksek affinitesinin olması nedeniyle ağır metal ve metal iyonlarının neden olduğu çevre sorunlarını çözmek için konvansiyonel yöntemlere önemli bir alternatiftir [24].

Yüksek konsantrasyondaki ağır metaller ile kirlenmiş bölgelerde yaşayan mikroorganizmalar çeşitli genetik mekanizmalar geliştirerek metallerin zararlı etkilerine karşı direnç gösterirler. Genellikle, kirli bölgelerde hayatta kalma yetenekleri olan suşlar ortamdaki izole edilerek, biyoremediasyon uygulaması için kullanılırlar [25]. Gram negatif betaproteobacterium *Ralstonia eutropha* toprakta ve tatlı su ortamlarında bulunur. Kısmen birçok farklı bileşiği besin ve enerji kaynağı olarak kullanma kabiliyetinden dolayı, *Hydrogenomonas eutropha*, *Alcaligenes eutrophus* ve *Wautersia eutropha* olarak daha önce adlandırılmış ve yeniden adlandırılmıştır. Organizmanın günümüzde kullanılan isimleri; *Cupriavidus necator* ve *Ralstonia eutropha*'dır [26]. Metabolik olarak çok yönlü *R. eutropha*, zorlu çevre koşullarında hayatta kalma yeteneğine sahiptir. Aromatikler ve ağır metaller dâhil olmak üzere çeşitli çevre kirleticilerine karşı toleranslıdır [27]. Bir çalışmada [28], ağır metallerle kirlenmiş toprağa *R. eutropha* aşılandığında, ağır metallerin bitkiler üzerindeki toksik etkisinin azaldığı görülmüştür. Bu durum, *R. eutropha*'nın ağır metal biyoremediasyonu için bir detoksifikasyon ajanı olabileceğini göstermiştir. *Ralstonia sp.* dâhil olmak üzere metale dirençli bakterilerin uygulanması, biyoremediasyon prosesi için etkili perspektifler sunar [28]. Daha önce bu konuda yapılmış olan çalışmalarda, göl çökeltilerinde ve endüstriyel biyotoplarda *Ralstonia*'nın metal direnci daha önce bildirilmiştir [29].

Bu çalışmada, sulara karışan en toksik elementlerden biri olan kurşun ile ülkemizde bol bulunan ve dolayısıyla sulara karışması kaçınılmaz olan borun sularından biyolojik olarak gideriminde, toprak ve tatlı su ortamlarında doğal olarak bulunan yabancıl *R. eutropha* H16 suşunun etkinliğinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Minimum İnhibisyon Konsantrasyonunun (MİK) belirlenmesi

Minimum İnhibisyon Konsantrasyonu (MİK), bir mikroorganizmanın büyümesini en az seviyede inhibe eden metal konsantrasyonudur [30]. *R. eutropha* H16 suşunun Pb ve B metallerine karşı direnç kapasitesi, Aleem vd. (2003)'nin [31] MİK metoduna göre belirlenmiştir. Çalışmada, yalnızca Lauren Broth besiyeri (LB), LB ve metal solüsyonu, LB ve hücre kültürü olmak üzere üç farklı kontrol grubu kullanılmıştır. *R. eutropha* H16 suşu (ATCC 17699) farklı konsantrasyonlarda PbCl₂ (50-2000 mg/L) ve en yaygın B formu olan H₃BO₃ (400-3000 mg/L) içeren LB agar ve broth ortamına ayrı ayrı inoküle edilmiştir. LB agar ve broth daha sonra 37°C'de 96 saat boyunca inkübe edilmiştir. Önceden belirlenmiş zaman aralıklarında (0, 2, 4, 8, 12, 24, 48, 72 ve 96 saat) numuneler alınmış ve bir mikropilaya okuyucusunda (Thermo Flash 2000) 600 nm'de ölçülmüştür.

2.2. Biyobirikim deneyleri

Biyobirikim deneylerinde, *R. eutropha* hücresine farklı oranlarda PbCl₂ (5, 25 ve 50 ppm) ve H₃BO₃ (500, 1000, 1500 ppm) içeren çözeltiler uygulanmış ve çalkalamalı olarak ayrı ayrı 120 rpm'de 37°C'de 24 saat boyunca inkübe edilmiştir. Bu suşun kontrol gruplarına PbCl₂ ve H₃BO₃ uygulaması yapılmamıştır. Besiyerinde kalan Pb ve B miktarını belirlemek için 24 saat sonunda kültür ortamından örnekler alınmıştır. Vortekslenerek homojenize edilen numunelerden 1 ml alınarak steril bir tüpe aktarılmıştır. Örnekler, 10000 rpm'de 10 dk santrifüj edilmiş ve 0,45 µm gözenek çapına sahip bir filtreden süzölmüştür. Hücre yüzeyindeki metal birikimlerini belirlemek için önceki aşamada santrifüjden sonra çökmüş hücrelere 1 ml 10 mM EDTA (Merck) çözeltisi ilave edilmiş, 2500 rpm'de vortekslenerek homojen hâle getirilmiştir. Bu örnekler oda sıcaklığında 2 saat boyunca bekletilmiş ve 10000 rpm'de 10 dk santrifüj edildikten sonra 0,45 µm gözenek çapına sahip bir filtreden süzölmüş, filtratta kalan numune 1/100 oranında seyreltilmiştir. Hücrelerin içinde biriken metal konsantrasyonlarını belirlemek için çöken hücrelere 1 M HNO₃ (Merck)'den 1 ml eklenmiş, 3 dk boyunca 2500 rpm'de vortekslenmiş ve sonra 10000 rpm'de santrifüjlenmiştir. Daha sonra süzüntüler 0,45 µm gözenek çapına sahip bir filtreden süzölmüştür. Her üç

ekstraksiyon sonucunda filtratta kalan numuneler 1/100 oranında seyreltilmiştir. Örneklerdeki Pb ve B miktarı, Adıyaman Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan İndüktif Eşleşmiş Plazma Kütle Spektrometresi (ICP-MS; Perkin Elmer & Nexion 350X) kullanılarak belirlenmiştir.

2.3. Görüntü analizleri

PbCl₂ uygulanan ve uygulanmayan *R. eutropha* H16 suşlarının hücre yüzeyinde morfolojik modifikasyonlarını gözlemlemek için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizi yapılmıştır. SEM analizi için hücreler, PbCl₂ (100 mg/L) içeren ve içermeyen (kontrol) 50 ml LB sıvı besiyerine aşılınmış ve 120 rpm'de 37°C'de 48 saat boyunca inkübe edilmiştir. Daha sonra örnekler alınmış ve 5000 rpm'de 30 dk santrifüj edilmiştir. Süpernatant atılmış ve pelletler üç kere fosfat tamponu (PBS, pH 7,2) ile yıkandıktan sonra 2 saat boyunca 4°C'de %2,5 glutaraldehit ile fikse edilmiştir. Hücrelerin PBS ile yıkanma işlemi iki kere tekrarlandıktan sonra %1 osmiyum tetraoksit ile sabitlenmiştir. Sabitlenmiş hücreler PBS tamponunda iki kere yıkandıktan sonra değişen konsantrasyonlardaki asetonla (%15, %30, %60, %90 ve %100) dehidre edilmiştir. Son olarak, kritik olarak kurutulmuş numuneler altın-platin (Quorum) ile kaplanmış ve SEM ve EDX (Zeiss & Evo LS 10 (Almanya)) ile analiz edilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. MİK değerleri ve metallerin alt dozlarının belirlenmesi

MİK değeri, mikroorganizmaların ağır metallere tolerans kapasitelerini göstermektedir. Yılmaz [32], *Escherichia coli*'nin H₃BO₃ MİK değerini 7,60 ppm, Darcan ve Kahyaoglu [33] ise *Escherichia coli* ve *Pseudomonas aeruginosa*'nın H₃BO₃ MİK değerlerini 8 ppm olarak tespit etmişlerdir.

Bu çalışmada ise *R. Eutropha* H16 suşunun PbCl₂ ve H₃BO₃ için MİK değerleri sırasıyla 1365 ppm ve 2500 ppm olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu MİK değerleri göz önünde bulundurularak da Pb ve B için üç alt doz uygulanmıştır. Uygulanan dozlar Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. PbCl₂ ve H₃BO₃ MİK değerleri ile uygulanan alt dozları

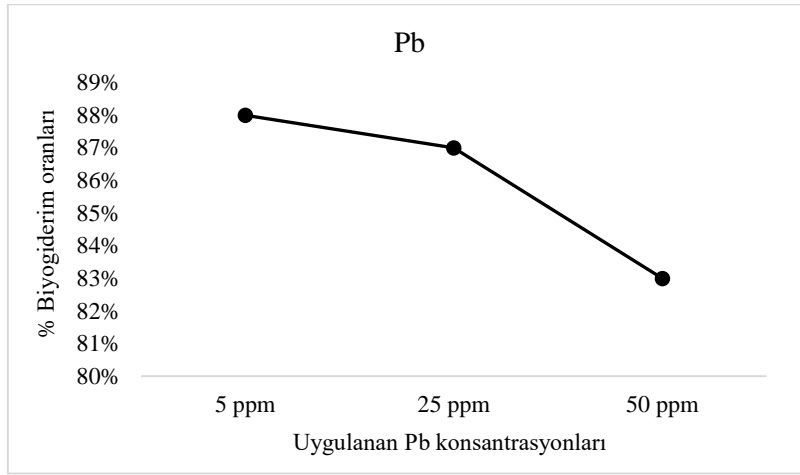
PbCl ₂ (ppm)	H ₃ BO ₃ (ppm)
MİK: 1365	MİK: 2500
50	1500
25	1000
5	500

3.2. Biyogiderim

PbCl₂'nin *R. eutropha*'ya uygulanması sonucu ICP-MS ile besiyerinde, hücre yüzeyinde ve hücre içinde saptanan Pb değerleri uygulanan PbCl₂ miktarına göre Tablo 2'de, uygulanan PbCl₂ miktarına göre toplam Pb biyogiderim oranları ise Şekil 1'de verilmiştir. % Biyogiderim oranları şu formüle göre hesaplanmıştır: Hücredeki toplam metal konsantrasyonu x 100 / Uygulanan metalin konsantrasyonu.

Tablo 2. Uygulanan PbCl₂ miktarına göre Pb'nin besiyerinde, hücre yüzeyinde ve hücre içinde ölçülen değerleri

Uygulanan PbCl ₂ miktarı (ppm)	Besiyerinde ölçülen Pb miktarı (ppm)	Hücre yüzeyinde ölçülen Pb miktarı (ppm)	Hücre içinde ölçülen Pb miktarı (ppm)	Toplam biyogiderim oranı
5	0,60	3,05	1,35	%88
25	3,25	18,00	3,75	%87
50	8,50	37,50	4,00	%83



Şekil 1. Pb'nin toplam biyogiderim oranları

Tablo 1'e göre; uygulanan PbCl₂'nin 5 ppm'lik konsantrasyonunun %12'si besiyerinde, %61'i hücre yüzeyinde ve %27'si hücre içinde birikmiştir. 25 ppm'lik uygulama dozunda Pb'nin %13'ü besiyerinde, %72'si hücre yüzeyinde ve %15'i hücre içinde bulunmuştur. En yüksek doz olan 50 ppm'de ise Pb'nin %17'si besiyerinde, %75'i hücre yüzeyinde ve %8'i hücre içinde saptanmıştır. Bu sonuçlara göre hücre yüzeyinde en fazla tutulum en yüksek konsantrasyon olan 50 ppm'de, hücre içinde en fazla birikim ise en düşük konsantrasyon olan 5 ppm'de gözlenmiştir. Toplam biyogiderim ise en fazla %88'lik oranla 5 ppm uygulama dozunda olmuştur.

Bakterilerin Pb biriktirme kapasiteleri uygulanan Pb başlangıç dozuna bağlıdır. 150 mg/L'den fazla Pb konsantrasyonunda, organizma metalleri taşımak için daha büyük bir itici güç gerektirir [34]. Genellikle düşük konsantrasyonlarda metaller için bakteriyel yüzey üzerindeki bağlanma yerleri mevcut olur ancak yüksek metal konsantrasyonlarında bağlanma yerleri doymuş hâle gelir [35].

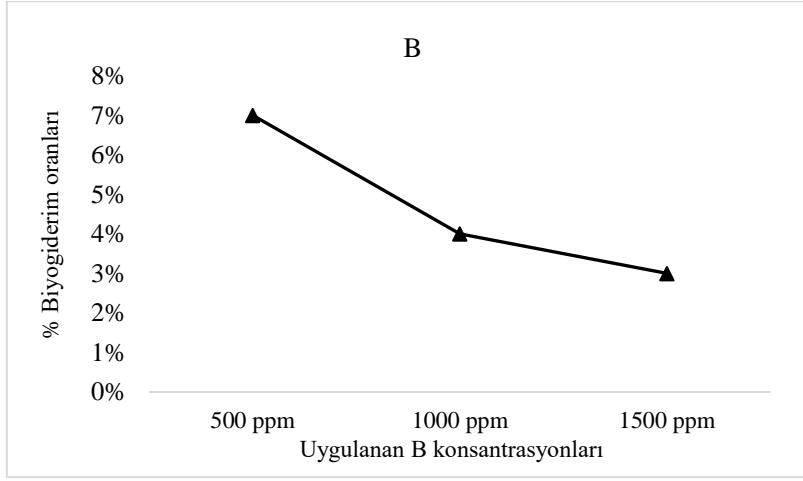
Literatürde pek çok bakterinin Pb'u hücre yüzeyine adsorbe ettiği bildirilmiştir. Roane [36], Pb'ye dirençli bakteri *Pseudomonas marginalis* ve *Bacillus megaterium*'u izole etmiş ve *P. marginalis*'in sitoplazmada ekzopolimer üreterek Pb'u hücre dışında tuttuğunu, *B. megaterium*'un ise Pb'u hücre içinde biriktirdiğini tespit etmiştir. Puyen vd. [37], *Micrococcus luteus* DE2008'in 1965 mg/g Pb(II) adsorpsiyon kapasitesi sergilediğini bildirmiştir. Benzer şekilde Maldonado vd. [38], bakteriyel ekzopolimer tarafından Pb(II) birikimini bildirmiştir. *Pseudomonas* BC15, *Enterobacter* sp. J1 ve *Bacillus cereus* BPS9'un, besiyerinde bulunan Pb'nun %65, %75 ve %78'ini hücreye absorpladığı bildirilmiştir [24, 39, 40]. Bakterilerin, ağır metalleri hücre içinde biriktirmesinde metal bağlayıcı proteinlerin etkili olduğu bilinmektedir.

Literatürdeki çalışmalar ile bu çalışma genel olarak kıyaslandığında, kullanılan *R. eutropha*'nın %88'lik oranla en fazla giderim yapan tür olduğu söylenebilir. Ancak bu kıyaslama uygulanan dozların ve deney koşullarının (pH, sıcaklık, başlangıç konsantrasyonu, uygulama süresi vs.) farklılığına göre değişkenlik gösterebilir.

H₃BO₃'in *R. eutropha*'ya uygulanması sonucu ICP-MS ile besiyerinde, hücre yüzeyinde ve hücre içinde saptanan B değerleri uygulanan H₃BO₃ miktarına göre Tablo 3'de, uygulanan H₃BO₃ miktarına göre toplam B biyogiderim oranları ise Şekil 2'de verilmiştir.

Tablo 3. Uygulanan H₃BO₃ miktarına göre B'nin besiyerinde, hücre yüzeyinde ve hücre içinde ölçülen değerleri

Uygulanan H ₃ BO ₃ miktarı (ppm)	Besiyerinde ölçülen B miktarı (ppm)	Hücre yüzeyinde ölçülen B miktarı (ppm)	Hücre içinde ölçülen B miktarı (ppm)	Toplam biyogiderim oranı
500	465	30,00	5,00	%7
1000	960	30,00	10,00	%4
1500	1455	4,50	40,50	%3



Şekil 2. B'nin toplam biyogiderim oranları

Tablo 2'ye göre; H_3BO_3 'ün 500 ppm'lik doz uygulanması sonucu, bu konsantrasyonun %93'ü besiyerinde, %6'sı hücre yüzeyinde ve %1'i hücre içinde belirlenmiştir. 1000 ppm H_3BO_3 uygulamasında, besiyerinde %96, hücre yüzeyinde %3 ve hücre içinde %1 oranlarında B tespit edilmiştir. 1500 ppm'lik H_3BO_3 uygulaması sonucu besiyerinde %97, hücre yüzeyinde %0,3 ve hücre içinde %2,7 oranlarında B varlığı saptanmıştır. Toplam biyogiderim oranları uygulanan H_3BO_3 konsantrasyonları arttıkça sırasıyla %7, %4 ve %3 olarak hesaplanmıştır. Buna göre en fazla biyogiderim en düşük H_3BO_3 konsantrasyonu olan 500 ppm'de gözlenmiştir.

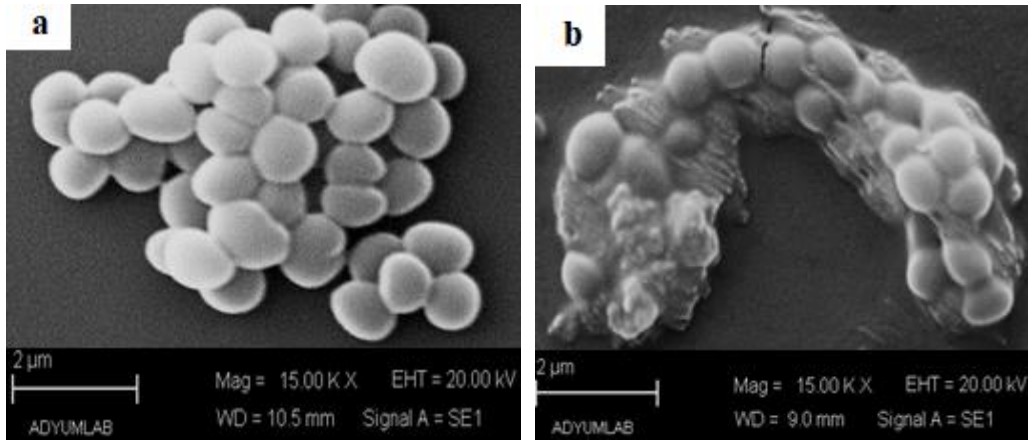
Doğal ortamdaki B konsantrasyonları 0,1-10 mg/L arasında değişir (örneğin, atık suda yaklaşık 10 mg/L, deniz örneklerinde 4-7 mg/L ve tipik toprak örneklerinde yalnızca 0,1-0,7 mg/L) [41]. Yüksek konsantrasyonlarda B içeren kirlenmiş toprak ve kanalizasyon çamuru, yüksek B biriktiren bakteriler için çevresel bir niş oluşturabilir. Ancak tek hücreli mikroorganizmalarda bile, hücre içi B seviyesinin türler arasında değiştiği rapor edilmiştir. Bu, bakterilerde hücre içi B için bir düzenleyici mekanizmanın var olabileceğini düşündürmektedir. B için aktif bir taşıma mekanizması, bakterilerin B eksikliği olan koşullar altında B alması veya fazla B'un sitotoksik etkilerinden kaçınması için önemli bir rol oynayabilir [42]. Miwa ve Fujiwara [42], Hisarcık (Kütahya, Türkiye) bölgesinde borla kirlenmiş topraklardan izole ettikleri BAM522 suşunun 1,36 nmol/g, BAM5 suşunun 0,67 nmol/g oranında hücre içinde B biriktirdiğini, yine aynı çalışmada topraktan izole edilmemiş bir laboratuvar suşu olan *Bacillus subtilis* ISW1214'in ise 0,62 nmol/g oranında B biriktirdiğini tespit etmişlerdir. Buradan görüldüğü üzere, bor ile kirlenmiş topraktan izole edilmiş suşlarla laboratuvar suşu arasında hücre içi B birikimi açısından çok önemli bir fark olmamıştır. Suşların B biriktirme kapasitesi, türlerin membran bileşimi, taşıma mekanizmaları ve borik asidi bağlayabilen protein ve organik bileşiklerin kullanımına göre değişir.

Raja ve Omine [43], uçucu kül boşaltma alanından izole ettikleri B toleranslı bakterilerin karakterizasyonunu yapmışlar, bunların *Bacillus*, *Lysinibacillus*, *Microbacterium* ve *Ralstonia* cinsine ait olduğunu tanımlamışlardır. Bu suşların 0,1-2,0 mg/L aralığında B'yi besiyerinden ve 2,7-3,7 mg/L aralığında B'yi ise uçucu külden 168 saatte giderdiğini belirlemişlerdir. Laçın vd. [44], *Candida tropicalis*, *Rhodotorula mucilaginosa*, *Micrococcus luteus*, *Bacillus thuringiensis*, *Bacillus cereus*, *Bacillus megaterium*, *Bacillus pumilus*, *Pseudomonas aeruginosa* ve *Aspergillus versicolor* suşlarının B içeren sentetik atık suyundan B giderim kapasitesini araştırmışlar, en etkin suşların *A. versicolor* ve *B. cereus* olduğunu tespit etmişlerdir. Bir fungus türü olan *A. versicolor*'un B biyobirikim verimi 16,20 mg/L B konsantrasyonunda %49,25 olmuştur. *Bacillus cereus*'un 20 mg/L B konsantrasyonunda B biyobirikimi %12,86 oranında olmuştur. Buradan, fungusların B gideriminde bakterilere göre daha etkin olduğu görülmüştür.

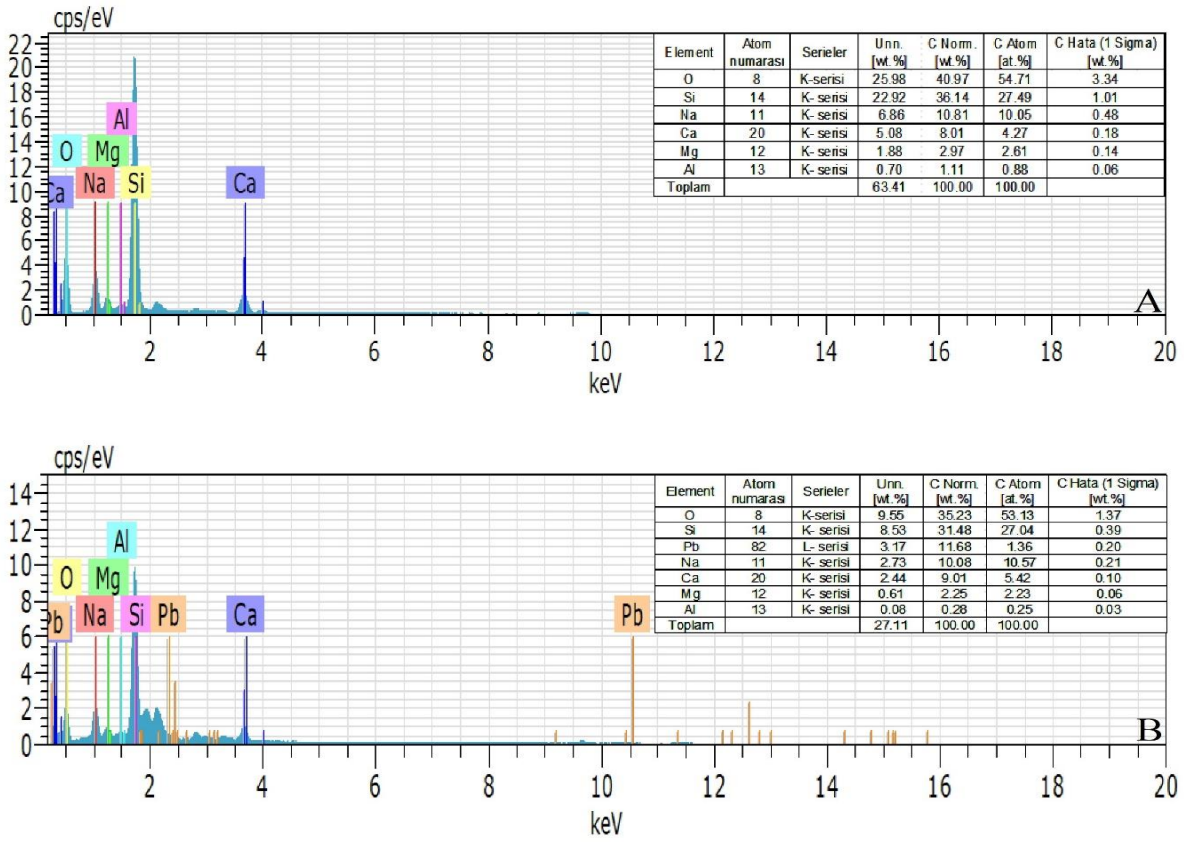
Bu çalışmada uygulanan B konsantrasyonları literatürdekilerden yüksek olduğundan net bir kıyaslama yapılamamakla birlikte genel bir değerlendirme yapıldığında biyogiderim oranlarının literatürdeki çalışmalara yakın değerlerde olduğu görülmüştür.

3.3. Hücre morfolojisi görüntüleri

R. eutropha suşunun SEM görüntüleri Şekil 3'de, EDX analizleri ise Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 3. *R. eutropha* suşunun SEM görüntüleri; a) $PbCl_2$ uygulanmamış b) 50 ppm $PbCl_2$ uygulanmış



Şekil 4. EDX analizi A) $PbCl_2$ uygulanmamış B) 50 ppm $PbCl_2$ uygulanmış

B biyogiderimi çok düşük konsantrasyonlarda olduğundan ve SEM-EDX analizlerinde B elementinin varlığı tanımlanamadığından dolayı sadece $PbCl_2$ uygulanmış (50 ppm) ve uygulanmamış (kontrol) bakterilerin SEM görüntüleri ve EDX sonuçları yazılmıştır.

SEM görüntüleri, hücrelerin yüzey morfolojisini gösterir. Buna göre, $PbCl_2$ uygulanmamış kontrol grubu bakterilerin morfolojisinin küre şeklinde ve pürüzsüz yüzeyli olduğu gözlenmiştir (Şekil 3a). $PbCl_2$ uygulanmış hücrelerin ise morfolojisinin önemli oranda etkilendiği ve gözle görülür hasar gördüğü açıktır. Bu hücrelerin yüzeyinde bazı floklaşmış çökelmeler görülmüştür (Şekil 3b). Agregasyon ve çökeltme, ağır metallerin bağlanmasında önemli bir role sahip olan hücre dışı polimerik maddelerden kaynaklanıyor olabilir [45].

EDX, biyosorbentlerin kimyasal ve elementel analizi için yararlı bir araçtır. EDX spektrumları, hücrelerin polisakkaritlerinde ve proteinlerinde olması muhtemel olan karbon, nitrojen ve oksijen sinyallerini göstermektedir. $PbCl_2$ uygulanmamış hücrelerin EDX analizinde hiçbir metal iyon zirvesi gözlenmemiştir (Şekil 4a). $PbCl_2$ uygulanmış hücrelerin EDX spektrumu ise bakteri hücrelerinin yüzeyinde Pb'nin bağlanmasının gözle görülür kanıtını açıkça göstermiştir (Şekil 4b).

Bu çalışmadaki bulgulara benzer olarak, Pugazhendhi vd. [2], Pb uyguladıkları *Ralstonia solanacearum*'un hücre yüzeyinin kontrole göre önemli derecede pürüzlü olduğunu gözlemlemişlerdir. Sagar vd. [46], ağır metal toksisitesine maruz kalan bakteri hücrelerinin birbirine yapışmasının ve fiziksel olarak parçalanmasının, toplam yüzey alanında bir azalma gösterdiğini öne sürmüştür. *Rhodobacter sphaeroides* SC01 suşuna 7 gün boyunca 160 ppm Pb uygulandığında, hücrelerin kontrole göre önemli ölçüde küçülme gösterdiği ve çok sayıda hücre döküntüsü olduğu gözlenmiştir [47]. Li vd. [45], *R. eutropha*'ya hiçbir metal uygulaması yapmadıklarında hücre yüzeylerinin net sınırlara sahip olup pürüzsüz yapıda olduğunu, 50-100 mg/L Cd uyguladıklarında hücrelerin yüzeylerinin pürüzlü hâle geldiğini ve tortularla kaplandığını gözlemlemiştir ve hücre morfolojisindeki bu değişiklikleri, stresli bir ortama tepki veren koruyucu bir mekanizma olarak yorumlamışlardır.

4. Sonuç ve Değerlendirme

R. eutropha'nın sulu çözeltilerden Pb ve B giderim etkinliği metalin türüne ve konsantrasyonuna göre farklılık göstermiştir. Bu suşun Pb giderim kapasitesi B'dan daha fazla bulunmuştur. En yüksek giderim verimi her iki metalin de en düşük konsantrasyonunda gözlenmiştir. Bu metallerin gerçek sularda bulunma konsantrasyonları düşük olduğundan, *R. eutropha* suşunun düşük konsantrasyonlarda bile bu metalleri absorbe etmesi çevrede kullanılabilirliği açısından yararlıdır.

Kaynakça

- [1] Doğan G., Pseudomonas cinsi bakterilerde hegzavalent krom indirgeme üzerine organik moleküllerin etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 2012.
- [2] Pugazhendhi A., Boovaragamoorthy GM., Ranganathan K., Naushad M., Kaliannan T., New insight into effective biosorption of lead from aqueous solution using *Ralstonia solanacearum*: characterization and mechanism studies, *Journal of Cleaner Production*, 174, 1234-1239, 2018.
- [3] Kalita D., Joshi SR., Study on bioremediation of lead by exopolysaccharide producing metallophilic bacterium isolated from extreme habitat, *Biotechnology Reports*, 16, 48-57, 2017.
- [4] Lombardi PE., Peri SI., Verrengia Guerrero NR., ALA-D and ALA-D reactivated as biomarkers of lead contamination in the fish *Prochilodus lineatus*, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 73 (7), 1704-1711, 2010.
- [5] Shahid M., Pinelli E., Dumat C., Review of Pb availability and toxicity to plants in relation with metal speciation; role of synthetic and natural organic ligands, *Journal of Hazardous Materials*, 219-220, 1-12, 2012.
- [6] Rosen MB., Pokhrel LR., Weir MH., A discussion about public health, lead and *Legionella pneumophila* in drinking water supplies in the United States, *Science of Total Environment*, 590-591, 843-852, 2017.
- [7] Çöl M., Çöl C., Environmental boron contamination in waters of Hisarcik area in the Kutahya province of Turkey, *Food and Chemical Toxicology*, 41(10), 1417-20, 2003.
- [8] Türker OC., Yakar A., Gür N., Bioaccumulation and toxicity assessment of irrigation water contaminated with boron (B) using duckweed (*Lemna gibba*) in a batch reactor system, *Journal of Hazardous Materials*, 324, 151-159, 2017.
- [9] Raja CE., Omine K., Arsenic, boron and salt resistant *Bacillus safensis* MS11 isolated from Mongolia desert soil, *African Journal of Biotechnology*, 11(9), 2267-2275, 2012.
- [10] Howe PD., A review of boron effects in the environment. *Biological Trace Element Research*, 66(1), 153-166, 1998.
- [11] Rowe RI., Eckhart CD., Boron is required for zebrafish embryogenesis, *Journal of Experimental Biology*, 202(12), 1649-1654, 1999.
- [12] Roskill. *The Economics of Boron*, 9th edition, 1999.
- [13] Hasenmueller EA., Criss RE., Multiple sources of boron in urban surface waters and groundwaters, *Science of Total Environment*, 447, 235-247, 2013.
- [14] ETİ Maden. Boron in Turkey. <https://www.etimaden.gov.tr/en/boron-in-turkey>. Erişim tarihi: 11/04/2021.
- [15] Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği, Resmî Gazete tarih ve sayı: 31.12.2004-25687.
- [16] İnsani Tüketim Amaçlı Sular Hakkında Yönetmelik, Resmî Gazete tarih ve sayı: 17.02.2005-25730.
- [17] WHO, Guidelines for drinking-water quality World Health Organization, fourth, editör WHO, Geneva, 2017.
- [18] Akinci G., Guven DE., Bioleaching of heavy metals contaminated sediment by pure and mixed cultures of *Acidithiobacillus* spp., *Desalination*, 268(1), 221-226, 2011.
- [19] Akkoyun MB., Özdemir S., Kılınc E., Birhanli E., Aygün A., Sen F., Resistance, removal, and bioaccumulation of Ni (II) and Co (II) and their impacts on antioxidant enzymes of *Anoxybacillus mongoliensis*, *Comparative Biochemistry and Physiology - Part C*, 235, 108790, 2020.
- [20] Geva P., Kahta R., Nakonechny F., Aronov S., Nisnevitch M., Increased copper bioremediation ability of new transgenic and adapted *Saccharomyces cerevisiae* strains, *Environmental Science and Pollution Research*, 23(19), 19613-19625, 2016.

- [21] Wang J., Chen C., Biosorbents for heavy metals removal and their future, *Biotechnology Advances*, 27(2), 195-226, 2009.
- [22] Vural A., Demir S., Boyno G., Biyoremediasyon ve fungusların biyoremediasyonda kullanılması, *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Tarım Bilim Dergisi*, 28, 490-501, 2018.
- [23] Verma S., Kuila A., Bioremediation of heavy metals by microbial process, *Environmental Technology & Innovation*, 14, 100369, 2019.
- [24] Sharma B., Shukla P., Lead bioaccumulation mediated by *Bacillus cereus* BPS-9 from an industrial waste contaminated site encoding heavy metal resistant genes and their transporters, *Journal of Hazardous Materials*, 401 (June 2020), 2021.
- [25] Das S., Dash HR., Chakraborty J., Genetic basis and importance of metal resistant genes in bacteria for bioremediation of contaminated environments with toxic metal pollutants, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100(7), 2967-2984, 2016.
- [26] Vandamme P., Coenye T., Taxonomy of the genus *Cupriavidus*: a tale of lost and found, *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 54 (Pt6), 2285-2289, 2004.
- [27] Chen W-M., Chang J-S., Wu C-H., Chang S-C., Characterization of phenol and trichloroethene degradation by the rhizobium *Ralstonia taiwanensis*, *Microbiological Research*, 155(8), 672-680, 2004.
- [28] Pandey G., Jain RK., Bacterial chemotaxis toward environmental pollutants: role in bioremediation, *Applied and Environmental Microbiology*, 68(12), 5789-5795, 2002.
- [29] Konstantinidis KT., Isaacs N., Fett J., Simpson S., Long DT., Marsh TL., Microbial diversity and resistance to copper in metal-contaminated lake sediment, *Microbial Ecology*, 5(2), 191-202, 2003.
- [30] Manasi Rajesh V., Santhana Krishna Kumar A., Rajesh N., Biosorption of cadmium using a novel bacterium isolated from an electronic industry effluent, *Chemical Engineering Journal*, 235, 176-185, 2014.
- [31] Aleem A., Isar J., Malik A., Impact of long-term application of industrial wastewater on the emergence of resistance traits in *Azotobacter chroococcum* isolated from rhizospheric soil, *Bioresource Technology*, 86(1), 7-13, 2003.
- [32] Yılmaz M T., Minimum inhibitory and minimum bactericidal concentrations of boron compounds against several bacterial strains, *Turkish Journal of Medical Sciences*, 42(2), 1423-1429, 2012.
- [33] Darcan C., Kahyaoğlu M., The effect of some boron derivatives on kanamycin resistance and survival of *E. coli* and *P. aeruginosa* in lake water, *Biomedical and Environmental Sciences*, 25(4), 476-482, 2012.
- [34] Masoumi F., Khadivinia E., Alidoust L., Mansourinejad Z., Shahryari S., Safaei M., et al. Nickel and lead biosorption by *Curtobacterium* sp. FM01, an indigenous bacterium isolated from farmland soils of northeast Iran, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(1), 950-957, 2016.
- [35] Ren G., Jin Y., Zhang C., Gu H., Qu J., Characteristics of *Bacillus* sp. PZ-1 and its biosorption to Pb(II). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 117, 141-148, 2015.
- [36] Roane TM., Lead resistance in two bacterial isolates from heavy metal-contaminated soils, *Microbial Ecology*, 37(3), 218-224, 1999.
- [37] Puyen ZM., Villagrasa E., Maldonado J., Diestra E., Esteve I., Sole A., Biosorption of lead and copper by heavy-metal tolerant *Micrococcus luteus* DE2008, *Bioresource Technology*, 126, 233-237, 2012.
- [38] Maldonado J., Diestra E., Huang L., Domenech A M., Villagrasa E., Puyen Z M., et al., Isolation and identification of a bacterium with high tolerance to lead and copper from a marine microbial mat in Spain, *Annals of Microbiology*, 60(1), 113-120, 2010.
- [39] Lu W B., Shi J J., Wang C H., Chang J S., Biosorption of lead, copper and cadmium by an indigenous isolate *Enterobacter* sp. J1 possessing high heavy-metal resistance, *Journal of Hazardous Materials*, 134, 80-86, 2006.
- [40] Raja C E., Anbazhagan K., Selvam G S., Isolation and characterization of a metal-resistant *Pseudomonas aeruginosa* strain, *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 22, 577-585, 2006.
- [41] Nable RO., Banuelos GS., Paull JG., Boron toxicity, *Plant Soil*, 193(1), 181-198, 1997. metal resistant genes and their transporters, *Journal of Hazardous Materials*, 401 (June 2020), 123285, 2021.
- [42] Miwa, H., Fujiwara T., Isolation and identification of boron-accumulating bacteria from contaminated soils and active sludge, *Soil Science and Plant Nutrition*, 55, 643-646, 2009.
- [43] Raja C E., Omine K., Characterization of boron tolerant bacteria isolated from a fly ash dumping site for bacterial boron remediation, *Environmental Geochemistry and Health*, 35, 431-438, 2013.
- [44] Laçın B, Ertit Taştan B, Dönmez G. Detection of boron removal capacities of different microorganisms in wastewater and effective removal process, *Water Science and Technology*, 72(10), 1832-1839, 2015.
- [45] Li X., Li D., Yan Z., Ao Y., Biosorption and bioaccumulation characteristics of cadmium by plant growth-promoting rhizobacteria, *RSC Advances*, 8(54), 30902-30911, 2018.
- [46] Sagar S, Bajaj S, Gola D, Malik A, P J Khankhane R K, Singh. D K. A qualitative approach to nickel and lead uptake by heavy metal resistant bacteria *Klebsiella* sp.10KN, *International Journal of Applied Research*, 3(7), 878-885, 2017.
- [47] Su Y J., Lin J Q., Lin J Q., Hao D H., Bioaccumulation of Arsenic in recombinant *Escherichia coli* expressing human metallothionein, *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 14(5), 565-570, 2009.

Snyder-Gama Sentetik Birim Hidrografın Yamula Barajı Havzasına Uygulanması

Neşe AÇANAL HAKTANIR*¹ 

*¹ Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği, KAYSERİ

(Alınış / Received: 05.06.2021, Kabul / Accepted: 03.08.2021, Online Yayınlanma / Published Online: 31.08.2021)

Anahtar Kelimeler

Sentetik birim hidrograf,
Snyder sentetik birim
hidrografi,
Tasarım hyetografi,
Tasarım taşkın hidrografi

Öz: Birçok ülkede olduğu gibi, ülkemizde de su yapıları tasarımında, taşkın hidrografları yaygınlıkla Birim Hidrograf yöntemiyle hesaplanmaktadır. Bu çalışmada, Snyder-Gama sentetik birim hidrografi Yamula Barajı havzasına uygulanmıştır. Yamula Barajı havzası içinde ve yakın çevresinde 39 yıl ve daha uzun süreli ölçümleri bulunan yağmur rasat istasyonlarında gözlenen standart süreli ekstrem yağmur serileri ile frekans analizi hesapları yapılmıştır. En uygun olasılık dağılımları seçilerek, noktasal 10-Bin yıl ortalama tekerrürlü ekstrem yağmur bulgularından Thiessen yöntemiyle havza ortalaması 24-saat süreli yıllık ekstrem yağmur değeri hesaplanmıştır. Eğri Numarası yöntemiyle havza sızma indisi hesaplanmış, 24-saatlik yıllık ekstrem yağmurun, 2'şer saatlik dilimlerde tasarım hyetografi oluşturulmuştur. Yamula Barajı havzası için 2 saat süreli artık yağmur için Snyder-Gama sentetik birim hidrografi tasarlanmış, bunun tasarım hyetografına uygulanmasıyla Yamula Barajına gelecek 10-Bin yıl ortalama tekerrürlü taşkın hidrografi hesaplanmıştır. Böylece elde edilen tasarım taşkın hidrografi ile Yamula Barajı kati projesinde verilen tasarım taşkın hidrografi karşılaştırılmış, her ikisinin yakın boyutlarda olduğu görülmüştür.

Application of Snyder-Gamma Synthetic Unit Hydrograph to Basin of Yamula Dam

Keywords

Synthetic unit hydrograph,
Snyder synthetic unit
hydrograph,
Design hyetograph,
Design flood hydrograph

Abstract: Similar to most countries in the world, in our country also, the unit hydrograph method is still widely used for flood hydrograph computation. In this study, the Snyder-Gamma synthetic unit hydrograph has been applied to the drainage basin of Yamula Dam. Frequency analyses have been performed on the series of standard-duration annual extreme rainfalls series observed at gauging stations having record lengths of at least 39 years. Using the point values having 10-thousand-year average return periods based on the best-fit probability distribution, the basin average 24-hour-long annual extreme rainfall has been computed by Thiessen method. Next to calculating the infiltration index by the Curve Number method, the design hyetograph of the 24-hour extreme rainfall at 2-hour increments has been developed. The Snyder-Gamma synthetic unit hydrograph of 2-hour effective rainfall has been computed for the drainage area of Yamula Dam, and having applied this to the design hyetograph, the flood hydrograph having an average return period of 10-thousand years has been formed. The flood hydrograph obtained as such as the outcome of this study has been compared with the design flood hydrograph given in the Final Project of Yamula Dam, and close conformity in both hydrographs has been observed.

*İlgili Yazar, email: nhaktan@erciyes.edu.tr

1. Giriş

Birçok ülkede olduğu gibi, ülkemizde de su yapıları tasarım taşkın hidrografları yaygınlıkla Birim Hidrograf yöntemiyle hesaplanmaktadır. Bunlara örnekler olarak, Birleşmiş Milletler Dünya Meteoroloji Kurumu'nun 168 nolu: "Guide to Hydrological Practices, Volume II, Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices." başlıklı teknik raporunun 6. Bölümü [1], A.B.D. Ordu Mühendisleri Birliği Hidrolojik Mühendislik Merkezi'nin: "Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Applications Guide" başlıklı yayını [2], İngiltere Çevre Ajansı'nın: "Flood Estimation Guidelines – Technical Guidance 197_08" başlıklı raporu [3], Hindistan Su Kaynakları Bakanlığı'nın: "Development of Hydrological Design Aids (Surface Water) under Hydrology Project II - State of The Art Report" başlıklı raporu [4], Avusturalya'nın "Australian Rainfall and Runoff: A Guide to Flood Estimation"

başlıklı raporu [5] gösterilebilir. Ülkemizde birçok barajın tasarım taşkın hidrografları Birim Hidrograf yöntemiyle hesaplanmış ve bunlarda sentetik birim hidrograflar kullanılmıştır [6, 7, 8, 9].

Havzanın yüzlerce, gerektiğinde binlerce küçük alanlara bölünüp her birim alanın toprak türü, en son toprak nemi, bitki türü ve yoğunluğu, dijital topografik haritası, dilim üzerindeki yağmur değeri gibi çok fazla coğrafik, topografik, meteorolojik veriler gibi giriş bilgileri gerektiren fiziksel modeller, hidrografın belirlenmesinde teorik olarak daha gerçekçi sonuçlar verebilmektedir. Güncel uluslararası literatürde “distributed” veya “causal” modeller olarak adlandırılan bu modellere bir örnek olarak CREST akronimi ile bilinen model ve onu icra eden paket program zikredilebilir [10] (<http://hydro.ou.edu/research/crest>). Gerektirdiği giriş verisinin elde edilmesindeki güçlük ve bunun için harcanacak zaman ve işgücü bu tür modellerin baraj tasarım taşkını hesaplarında kullanılmasını güçleştirmektedir. Uygulanacak paket programın öğrenilme zorluğu, programın yüksek maliyeti gibi faktörler, büyük barajlar için dahi ülkemizde Birim Hidrograf yöntemiyle tasarım taşkın hidrografının hesaplanmasına yol açmaktadır [7, 9]. Yanısıra, yüklü miktardaki giriş verilerinde yapılabilecek hatalar, sonuçta bu tür bir fiziksel modelin de hatalı taşkın hidrografı hesaplamasına yol açabilir. Yukarıda sözü edilen gelişmiş ülkelerin tanınmış kuruluşlarının ilgili raporlarında, Birim Hidrograf yönteminin gerektirdiği az sayıda parametrenin sağlıklı tahmin edilmesi ile bu modelin de makul hidrograflar vereceği belirtilmektedir.

1930’larda geliştirilen Birim Hidrograf yöntemi, bir havzaya ait birim hidrografları anahtar hidrograflar olarak kullanıp, kritik bir yağmur fırtınasının oluşturacağı hiyetografa bu birim hidrografların uygulanmasıyla taşkının yüzey akımı hidrografını hesaplar [11]. Önce, süresi havzanın toplanma zamanına eşit ($t_r = t_c$), ortalama tekerrürü periyodu 10-bin-yıl gibi aşılma olasılığı çok küçük olan ekstrem yağmurun toplam derinliği frekans analizi ile veya bir deterministik yöntem ile hesaplanır [1]. Sonra, bu toplam yağmur miktarı (mm), havza için geliştirilmiş genellemeler kullanılarak yağmur süresi boyunca şiddetinin zamana göre değişimini belirleyen tasarım hiyetografi hesaplanır. Ülkemizin bulunduğu kuzey yarım kürede 24 saatten daha uzun süreli kesiksiz yağmur fırtınaları oluşmadığından dolayı Meteoroloji Genel Müdürlüğü daimi süreleri 5 dakikadan 1440 dakikaya (24 saate) kadar değişen 14 farklı standart süreli yağmurları ölçüp gözlenmiş yıllık maksimum yağmur derinliklerini kayıt altına almaktadır.

Birim Hidrograf yönteminin daha duyarlı taşkın hidrografı hesaplamasında kullandığı birim hidrografın havza çıkış kesitinde ölçülmüş en az beş adet taşkın hidrografı ve havza üzerinde ortalaması alınacak bu taşkını oluşturan yağmur fırtınasının birçok meteoroloji istasyonunda gözlenmiş yağmur miktarlarının mevcut olması gerekir. Bu verilere sahip havzalarda gözlenmiş hiyetograf-hidrograf verilerinden elde edilmiş birim hidrografların pik debi, pik debi zamanı gibi bazı önemli büyüklükleri havza özelliklerine iliştilerle sentetik birim hidrograf parametreleri elde edilir [12, 13]. Coğrafik ve meteorolojik benzerlikleri olan ve ölçülmüş verisi eksik havzalarda sentetik birim hidrograf hesaplanması zorunlu hale gelmektedir. Ülkemizde çoğunlukla hâkim durum budur. Yakın zamana kadar yapılmış baraj projeleri incelendiğinde, bunların çoğunda sentetik birim hidrografın kullanıldığı ve sentetik birim hidrografların elde edilmesinde ise çoğunlukla Snyder yönteminin kullanıldığı görülmektedir. Bilindiği üzere Snyder yönteminin yanısıra, Clark, Gray, SCS, Mockus gibi birçok farklı sentetik birim hidrograf üretim yöntemi mevcuttur [11, 12, 13, 14, 15].

Bir sentetik birim hidrografın pik debisi ve pik debi zamanı kendine özgü formüllerle hesaplandıktan sonra birim hidrografın şekli tasarımcı tarafından belirlenmektedir. Birim hidrografın eğrisi altında kalan alanın verdiği yüzey akımı hacminin havza drenaj alanına bölünmesi 1 cm su derinliğine eşit olmak zorundadır. Tecrübesini de kullanarak, bu özelliği sağlayacak biçimde tasarımcı sentetik birim hidrografın şeklini çizer. Bununla birlikte bazı yayınlarda birim hidrograf şeklinin belirlenmesi için bazı olasılık dağılımlarının ölçek ayarı yapılmış olasılık yoğunluk fonksiyonunun sentetik birim hidrograf olarak kullanılması önerilmiştir [16, 17, 18, 19, 20]. Yukarıda anılan saygın kuruluşların da sentetik birim hidrografın belirlenmesinde Snyder’i kullandığı görülmektedir. Bu çalışmalar çoğunlukla 2-parametrelili gama dağılımını önermektedir [16, 17, 18, 19, 20]. Şubat 2021’de yayınlanan bir çalışmada, ilk defa, ölçeği ayarlanmış 2-parametrelili gama dağılımı olasılık yoğunluk fonksiyonunun Snyder sentetik birim hidrografının şeklini tanımlamada kullanılması önerilmiştir [21]. Pik debisi ve pik debi zamanı Snyder yöntemi formülleri ile hesaplandıktan sonra, mod koordinatlarının bunlara eşitlenmesiyle dağılımın parametre değerleri elde edilmektedir. Böylece oluşan birim hidrograf eğrisinin Snyder yöntemine özgü, pik debinin % 50’sine ve % 75’ine karşılık oluşan hidrograf genişliklerinin, “solda 1/3, sağda 2/3” kuralını çok yakından sağladığı görülmüştür [21].

Bu çalışmada, Snyder-Gama Sentetik Birim Hidrografı olarak adlandırılan bu yöntem Kayseri yakınındaki Yamula Barajı havzasına 2-saatlik sentetik birim hidrograf hesabı için kullanılmıştır. Yamula Barajı havzası içinde ve yakın sınırlarında bulunan yedi adet meteoroloji istasyonunda ölçülmüş standart süreli yıllık maksimum yağmur serilerine uygulanan frekans analizleri sonucu oluşturulan havza ortalaması 10-bin yıl ortalama tekerrürlü 24-saat süreli yağmur hiyetografi elde edilmiştir. 2-saatlik Snyder-Gama sentetik birim hidrografı, bu 10-bin-yıl ortalama tekerrürlü hiyetografa uygulanarak tasarım taşkın hidrografı hesaplanmıştır. Bu çalışmada elde edilen

bu taşkın hidrografının, hesap detayları verilmeyen, Yamula Barajı kati projesindeki Katastrofal Taşkın hidrografına yakın olduğu görülmüştür.

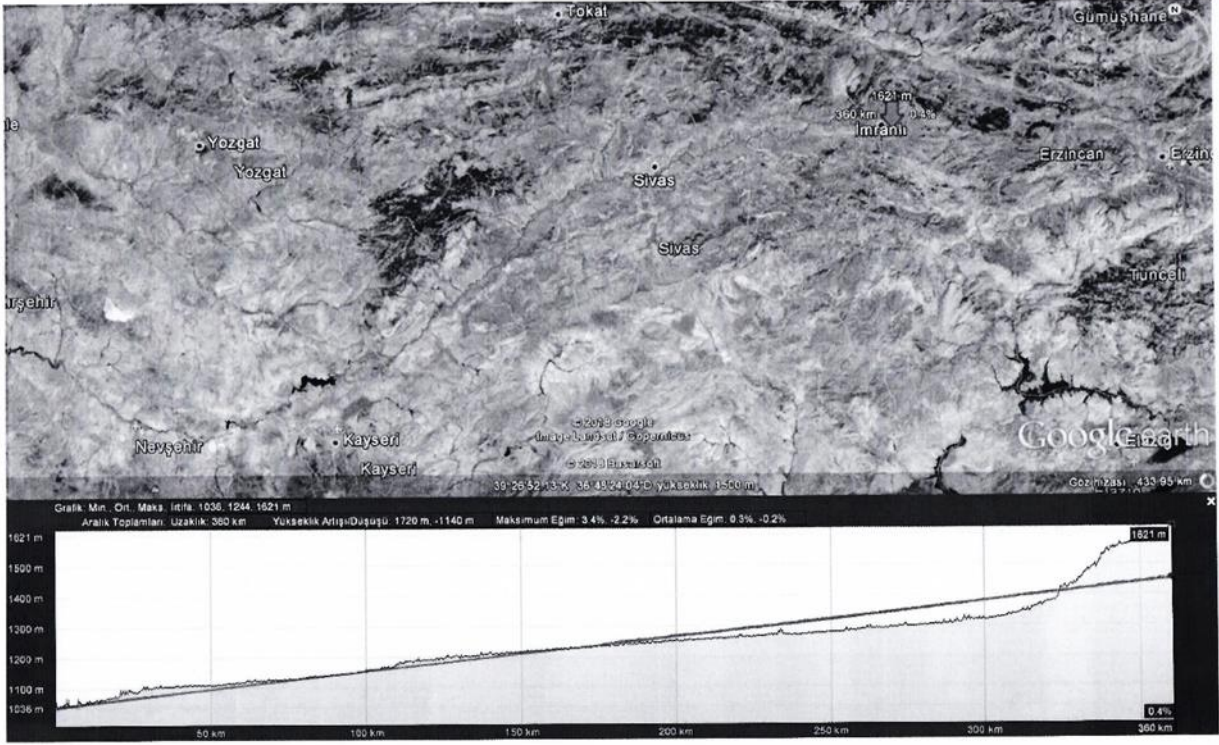
2. Materyal ve Metot

Göl hacmi kapasitesi açısından ülkemizin ilk 10 barajı içinde bulunan Yamula Barajına gelecek tasarım taşkın hidrografının hesabı, henüz yeni sayılan Snyder-Gama Sentetik Birim Hidrografi olarak adlandırılan, birim hidrograf kullanılarak yapılmıştır. Çalışmada kullanılan veriler, havzanın ve Kızılırmak'ın topografik ve morfolojik özellikleri ve Yamula Barajı havzasında Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nce (MGM) gözlenmiş ekstrem yağmur verileridir. İlk veri grubu, Kızılırmak'ın Yamula Barajı aksının bulunduğu kesite göre drenaj alanı, drenaj alanı üst toprak tabakasının hidrolojik sınıfları, arazi kullanım uygulamaları, Kızılırmak'ın doğduğu noktadan Yamula Barajı aksına kadar olan toplam uzunluğu ve ortalama eğimi, Kızılırmak'ın Yamula barajı ile havza ağırlık merkezi arasında kalan uzunluğu olarak sıralanabilir. MGM tarafından gözlenmiş kaydedilmiş standart-sürelili yıllık maksimum yağmur verileri, ilk defa hesaplanacak olan Snyder-Gama Sentetik Birim Hidrografına uygulanacak olan tasarım yağmur hiyetografının belirlenmesinde kullanılmıştır. Çalışmanın metodu, Yamula Barajı havzası için Snyder-Gama sentetik birim hidrografının hesaplanması, havza ortalaması 10-Bin yıl ortalama tekerrürlü 24 saat süreli ekstrem yağmur miktarının belirlenmesi, tasarım hiyetografının hesaplanması, tasarım taşkın hidrografının hesaplanması ve Yamula Barajı kati projesinde verilen tasarım taşkın hidrografi ile karşılaştırılması olarak özetlenebilir.

2.1. Materyal

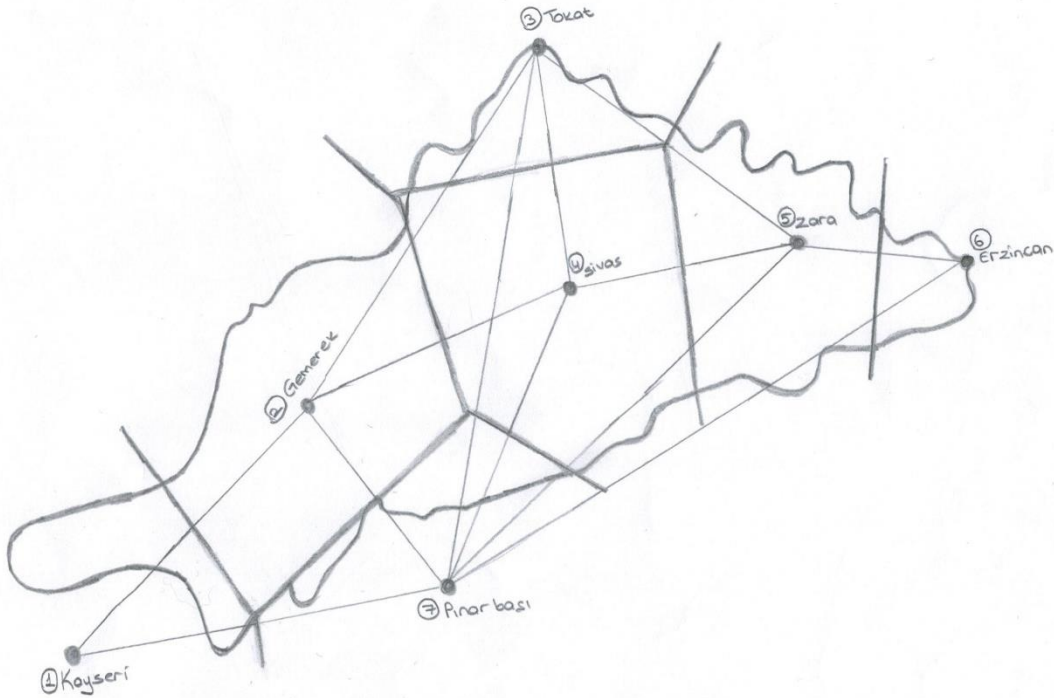
Çalışmada kullanılan veriler, Yamula Barajı havzasının topografik haritası, Google-earth'den alınan Yamula Barajı aksına kadar Kızılırmak Nehrinin talveg profili, Yamula Barajı havzası içinde ve yakın civarında bulunan yedi adet meteoroloji istasyonunda MGM tarafından gözlenmiş 39 ile 54 yıl arası uzunluklarında standart-sürelili ekstrem yağmur verileri olarak özetlenebilir.

Şekil 1'de Google-earth'den indirilen Yamula Barajı havzası haritası ve Yamula Barajı aksına kadar Kızılırmak Nehrinin talveg profili verilmiştir. Bu haritanın amacı, Yamula Barajı havzasının toplanma zamanını hesaplamak için gerekli, ana kol uzunluğu ve ortalama ana kol eğimi değerlerini elde etmektir. Çalışmada, Snyder-Gama sentetik birim hidrografını temel araç olarak kullanılıp Yamula Barajı 10-bin-yıl ortalama tekerrürlü taşkın hidrografının hesabı yapılmıştır. Bunun için başlangıç noktası olan ekstrem yağmurun süresinin belirlenmesi gerekir. Bu amaçla, havzanın tamamının çıkış kesitine yüzey akımı gönderdiği kritik süre olan 'toplanma zamanı (tc)' hesaplanmıştır. Türkiye'nin bulunduğu kuzey yarım kürede atmosfer kesiksiz olarak 24 saatten daha uzun süreli yağmur fırtınası üretmemektedir. Dolayısıyla, havzalarının toplanma zamanı 24 saatten büyük olan barajların tasarım taşkın hidrografı 24 saat süreli ekstrem yağmur ile hesaplanmaktadır [6, 7, 8, 9]. Çalışmanın ilk adımı olarak, Yamula Barajı havzasının toplanma zamanını hesaplayabilmek amacıyla doğduğu yerden Yamula Barajı aksına kadar Kızılırmak havzasının Google-earth görüntüsü ve nehrin talveg profili elde edilmiştir. Şekil 1'de bu görüntü verilmiştir.



Şekil 1. Google-earth'den indirilen Yamula Barajı havzası haritası, doğumundan baraj aksına kadar Kızılırmak nehrinin talveg profili, altında ve üstünde kalan alanları eşitleyecek biçimde çizilen ana kanal ortalama eğimi doğrusu.

Şekil 2'de Yamula Barajı havzası içinde ve yakın civarında bulunan yedi adet meteoroloji istasyonlarının konumları ve bunlara göre çizilmiş Thiessen poligonları gösterilmektedir.



Şekil 2. Yamula Barajı havzası içinde ve yakın çevresinde bulunan, 39 yıl ile 54 yıl arası gözlem süreleri olan yağış istasyonları ve onların Thiessen poligonları.

Çizelge 1'de MGM tarafından 1967–2010 sürecinde Gemerek meteoroloji istasyonunda ölçülmüş standart-sürelili ekstrem yağmur verileri ve bunlar üzerinde uygulanan frekans analizi bulguları verilmiştir. Hesaplamalarda kullanmakla birlikte sayfa limiti nedeniyle diğer altı istasyonun verileri ve bulguları burada verilmemiştir. Verilerin formatını göstermek amacıyla bir istasyonun verilerinin paylaşılması yeterli görülmüştür.

Çizelge 1. Gemerek meteoroloji istasyonunda Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından 1967–2010 sürecinde ölçülmüş standart-sürelili yıllık ekstrem yağmur verileri ve frekans analizi bulguları.

Gözlem Yılı	DAKİKA				SAAT									
	5	10	15	30	1	2	3	4	5	6	8	12	18	24
2010	3.6	6.4	7.5	11.8	13.2	18.0	18.1	20.8	25.2	25.3	25.3	26.7	35.9	38.2
2009	2.2	3.3	4.5	8.3	12.0	14.6	17.8	19.2	19.2	19.2	19.2	19.2	19.3	30.7
2008	5.5	9.2	12.9	15.9	20.2	22.0	26.6	26.9	26.9	26.9	27.7	29.2	29.2	29.2
2007	8.3	13.5	19.3	29.5	45.4	48.1	48.2	48.2	48.2	49.6	50.3	50.4	51.9	52.8
2006	9.7	9.9	10.1	15.2	18.4	18.9	21.3	21.3	21.4	21.4	21.4	21.5	21.6	21.6
2005	3.5	5.3	5.3	5.3	5.4	6.3	9.1	11.3	11.5	11.6	14.1	14.2	14.5	22.2
2004														*
2003	2.7	5.2	6.6	9.4	14.5	15.9	15.9	16.0	16.0	16.0	16.1	16.2	16.2	24.0
2002	7.7	11.8	14.0	20.1	23.0	23.6	23.6	26.8	29.1	31.4	32.1	32.2	32.2	32.2
2001														*
2000	6.8	11.5	15.5	19.6	20.7	20.7	20.7	20.7	20.7	20.8	20.8	20.9	20.9	21.5
1999	4.7	7.4	8.6	10.5	14.1	15.4	15.5	18.5	19.2	19.2	19.3	19.3	19.3	19.3
1998														*
1997	1.6	3.0	3.7	4.5	6.6	7.7	10.0	12.1	13.0	13.7	18.7	25.8	26.0	31.4
1996														*
1995	3.8	7.5	9.3	10.2	10.3	10.3	13.3	14.8	17.7	19.0	19.0	19.3	21.3	38.3
1994	1.7	2.2	2.3	4.1	7.4	9.9	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8	15.7	21.2
1993	3.6	4.1	4.3	4.8	5.9	8.1	10.2	10.5	16.3	18.5	20.5	20.5	20.5	20.5
1992	4.0	5.0	5.7	5.9	7.5	11.3	14.9	17.0	17.5	17.6	19.2	19.3	19.8	22.6
1991	5.5	7.0	7.3	8.2	12.0	15.0	16.4	16.4	16.6	17.3	20.8	25.9	35.4	35.4
1990	3.0	5.5	5.7	5.8	7.0	7.0	8.7	11.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	17.2
1989	8.9	16.9	20.7	23.2	23.7	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	50.6
1988	5.1	8.3	9.3	9.7	12.1	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.9	17.4	18.5	18.5
1987														*
1986	2.0	2.8	3.8	5.4	5.4	7.9	9.6	10.8	11.9	13.0	13.7	14.1	14.6	17.3
1985	5.5	9.0	10.2	17.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	21.6
1984	7.2	10.8	12.9	15.0	15.8	16.2	16.2	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	28.1
1983	9.3	12.0	12.3	12.4	12.4	12.4	12.4	15.7	20.5	20.6	21.9	21.9	22.4	27.5
1982	5.5	8.0	10.1	14.1	17.8	19.0	25.5	29.6	29.9	29.9	31.0	33.6	33.6	33.6
1981	2.7	4.5	5.2	7.4	11.2	16.2	18.4	18.9	18.9	19.4	21.4	22.2	24.9	35.2
1980	2.0	3.0	4.8	8.0	14.0	15.5	21.0	22.5	24.0	24.1	24.1	25.3	30.4	34.8
1979	2.8	9.7	5.5	7.8	7.8	14.0	14.9	16.4	17.2	17.9	17.9	18.0	19.2	22.1
1978	3.3	4.0	4.5	5.0	8.2	9.3	9.3	12.1	12.7	16.7	22.0	24.0	27.6	27.9
1977	2.0	4.4	5.0	6.2	8.5	15.3	16.4	18.2	18.2	18.2	18.2	18.2	20.4	26.2
1976	4.0	5.0	7.2	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	11.8	17.9	24.7
1975	5.0	8.3	11.2	14.2	14.4	16.1	17.4	17.9	25.9	26.2	26.7	27.9	27.9	33.7
1974	6.2	9.6	13.0	16.7	18.0	20.5	21.7	21.8	21.8	21.8	21.8	21.8	25.4	30.4
1973	4.1	6.2	9.3	16.3	16.3	17.7	17.7	17.7	17.7	17.7	17.7	17.7	17.7	24.7
1972	5.4	9.6	10.4	11.2	11.2	11.2	13.1	15.9	16.9	16.9	17.0	20.5	26.7	28.1
1971	5.6	8.9	10.6	11.8	12.3	13.9	14.8	14.8	14.8	14.9	14.9	14.9	16.8	24.6
1970	2.7	4.7	5.7	6.8	8.3	13.3	13.3	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0	16.1
1969	9.9	17.4	19.7	24.1	24.1	24.2	24.2	24.7	28.2	28.5	28.5	28.8	29.5	33.6
1968	7.6	11.4	12.8	12.8	14.4	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	16.4	17.1	25.1	26.6
1967	5.0	5.9	9.4	10.8	10.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	17.3
Serilerin ist. leri	DAKİKA				SAAT									
	5	10	15	30	1	2	3	4	5	6	8	12	18	24
N	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39
Ort.	4.9	7.6	9.1	11.7	13.8	15.7	17.0	18.2	19.2	19.6	20.4	21.3	23.1	27.7
Enbüy	9.9	17.4	20.7	29.5	45.4	48.1	48.2	48.2	48.2	49.6	50.3	50.4	51.9	52.8
St.S.	2.4	3.7	4.6	6.0	7.3	7.2	7.2	7.0	7.1	7.2	7.2	7.4	7.8	8.4
Var.K.	.48	.48	.50	.51	.53	.46	.42	.39	.37	.37	.35	.35	.34	.30
Çar.K.	.61	.78	.87	1.03	2.21	2.41	2.26	2.20	1.90	2.02	1.99	1.71	1.43	1.12

* Ölçüm yapılmamış yıl

Çizelge 2. Gemerek meteoroloji istasyonunda gözlenmiş seriler üzerinde Ki-Kare, Kolmogorov-Smirnov, ve Olasılık Pozisyonu Korelasyon Katsayısı (PPCC) uygunluk testleri değerlendirmesine göre uygun bulunan GED-OAM dağılımı ile ardışık standart süreli yıllık yağışların yinelenme değerleri.

Tekerrür Peryodu	DAKİKA				SAAT									
	5	10	15	30	1	2	3	4	5	6	8	12	18	24
2	6.8	8.0	8.7	10.2	11.9	14.0	15.3	16.4	17.2	18.0	19.2	21.1	23.2	24.8
5	10.8	12.3	13.3	15.1	17.3	19.7	21.4	22.6	23.6	24.5	26.0	28.2	30.6	32.5
10	13.6	15.3	16.4	18.6	21.1	23.9	25.8	27.2	28.4	29.4	31.1	33.6	36.3	38.4
25	17.1	19.2	20.6	23.3	26.3	29.7	32.0	33.7	35.1	36.2	38.2	41.2	44.4	46.9
50	19.8	22.3	23.9	26.9	30.4	34.4	36.9	38.9	40.5	41.9	44.1	47.5	51.2	54.0
100	22.5	25.4	27.2	30.7	34.7	39.3	42.3	44.5	46.4	48.0	50.5	54.4	58.7	61.9
200	25.3	28.6	30.7	34.7	39.3	44.6	48.0	50.6	52.8	54.6	57.5	62.0	66.9	70.6
500	29.1	32.9	35.5	40.3	45.8	52.2	56.3	59.4	62.0	64.2	67.8	73.3	79.2	83.7
1000	32.0	36.4	39.2	44.7	51.1	58.3	63.1	66.7	69.7	72.2	76.4	82.7	89.6	94.9
2000	34.9	39.9	43.2	49.4	56.6	65.0	70.4	74.6	78.0	80.9	85.8	93.1	101.1	107.3
5000	38.9	44.8	48.6	55.9	64.5	74.4	81.0	86.0	90.2	93.7	99.6	108.5	118.3	125.8
10000	42.1	48.6	52.8	61.1	70.8	82.2	89.7	95.5	100.3	104.4	111.1	121.5	132.9	141.7

2.2 Metot

2.2.1 Yamula Barajı Havzası Toplanma Zamanı Hesabı

Havzaların toplanma zamanının tahmini için çıkarılmış formüllerin çoğu ana kolun toplam uzunluğu (L) ve ortalama eğimini (S) gerektirmektedir. Şekil 1 üzerinde yapılan hesaplardan, Kızılırmak Nehrinin doğduğu noktadan Yamula Barajı aksına kadar olan toplam boyunun, L = 374 km, ortalama eğiminin ise, S = 0.0011 olarak belirlenmiştir. Yamula Barajı havzasının toplanma zamanı, ilgili yayınlarda [11, 22] orta ve büyük havzalarda duyarlı sonuç verdiği belirtilen aşağıdaki Kirpich Formülü [11] ile hesaplanmıştır.

$$t_c = (0.0663) \times L^{0.77} \times S^{-0.385} \quad (1)$$

Burada, L, km cinsinden ana kanalın uzunluğu; S, ana kolun ortalama eğimi; t_c, saat olarak toplanma zamanıdır. Yamula Barajı havzası için toplanma zamanı,

$$t_c = (0.0663) \times (374)^{0.77} \times (0.0011)^{-0.385} = (0.0663) \times (95.7439) \times (13.7741) = 87.4 \approx 87 \text{ saat bulunur.}$$

87 saat 24 saatten büyük olduğu için, çalışmada Yamula Barajı tasarım taşkınını oluşturan yağmur fırtınasının süresi 24 saat alınmıştır.

2.2.2 Yamula Barajı Havzası İçin Tasarım Yağmur Fırtınası Toplam Yağış Hesabı

Çalışmada tasarım yağmur fırtınasının ortalama tekerrür periyodu: T = 10-Bin yıl alınmıştır. Şekil 2'de görüldüğü gibi, Yamula Barajı havzası içinde ve civarında Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından işletilen, yeterli uzunlukta gözlem süresi olan, Kayseri, Gemerek, Tokat, Sivas, Erzincan, Pınarbaşı istasyonları bulunmaktadır. Bu istasyonlarda ölçülmüş standart-süreli yıllık maksimum yağmur serilerine uygulanan frekans analizleri sonucu tekerrür periyodu 10-Bin yıl olan 24 saat süreli yağmur derinlikleri hesaplanmıştır. Devamında, Yamula Barajı Havzası ortalama yağmur miktarı Thiessen Poligonları yöntemiyle yapılmıştır. Şekil 2'de gösterilen Thiessen poligonları planimetre ile ikişer kez ölçülüp ortalamaları alınmıştır. Bunlar, a₁ = 5.6 cm², a₂ = 20.5 cm², a₃ = 5.3 cm², a₄ = 19.9 cm², a₅ = 12.7 cm², a₆ = 2.4 cm², a₇ = 3.6 cm² olup toplam alan: A_t = 70 cm²'dir. Sonra, poligon alanlarına bağlı olarak havza ortalaması 24 saat süreli 10 Bin yıl tekerrürlü ekstrem yağmur derinliği aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

$$P_t = \sum_{j=1}^7 P_j \times \left(\frac{a_j}{A_t}\right) \quad (2)$$

Burada, a_j, planimetre ile ölçülen j'ninci poligon alanı (cm²); P_j, j'ninci istasyonda 24 saat süreli 10-Bin yıl tekerrürlü ekstrem yağmur derinliği (mm); A_t, toplam havza alanıdır (7 adet poligonun toplam alanı) (cm²). Ölçülen a_j'ler ve noktasal frekans analizleri sonucu hesaplanan P_j'ler yerlerine konulduğunda, P_t = (104.6 x 0.08) + (141.7 x 0.2928) + (78.5 x 0.0757) + (88.7 x 0.2843) + (198.5 x 0.1814) + (116.1 x 0.0343) + (100.2 x 0.0514) = 126.158 mm olarak hesaplanmıştır. Burada havza ortalaması 24 saat süreli 10-Bin yıl tekerrürlü ekstrem yağmur derinliği P_t = 126 mm olarak alınmıştır.

2.2.3 SCS Eğri Numarası Yöntemiyle Yamula Barajı Havzası için Tasarım Yağmur Fırtınasının Efektif Yağış ve Ortalama Sızma İndisi Hesabı

Yamula Barajı havzasının haritadan incelenmesinde, yüksek kotlu arazilerin ekili tarım yapılmayan çayır, mera, çıplak arazi; aşağı kotlardaki arazilerin ise meyve bahçeleri, tahıllar ve diğer bitkilerin tarım arazileri, meralar ve çıplak araziler ile kaplı olduğu görülmektedir. Arazi türü ve kullanımını temsil eden SCS eğri numaraları güncel literatürde tablolar halinde verilmektedir [11]. Yamula Barajı drenaj alanı üst tabaka toprak türünün anılan tablodaki B ve C grubu topraklardan oluştuğu, % 3 kadar çok az bir kısmının yerleşim alanları ile kaplı olduğu anlaşılmaktadır. SCS Eğri Numaraları tablosuna göre Yamula Barajı Havzası toprak yüzeyi kısımları eğri numaralarının 55 ile 88 arasında değerler aldığı belirlenmiş, havzanın ortalama eğri numarası yaklaşık CN = 70 olarak hesaplanmıştır.

Bu duruma göre SCS Eğri Numarası yönteminin ilgili formülleriyle yapılan efektif (artık) yağmur hesapları aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$S = 1000 / CN - 10 = 1000 / 70 - 10 = 14.2857 - 10 = 4.2857 \text{ inch} = 109 \text{ mm}$$

$$Pe = (Pt - 0.2 \times S)^2 / (Pt + 0.8 \times S) = (126 - 0.2 \times 109)^2 / (126 + 0.8 \times 109) = 50.93 = 51 \text{ mm}$$

Buna göre, havza ortalama sızma indisi aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\phi = (Pt - Pe) / tr = (126 - 51) / 24 = 75 / 24 = 3.13 \text{ mm/saat.}$$

2.2.4 DSİ Yöntemiyle Yamula Barajı Havzası için Tasarım Yağmur Hiyetografinin Hesabı

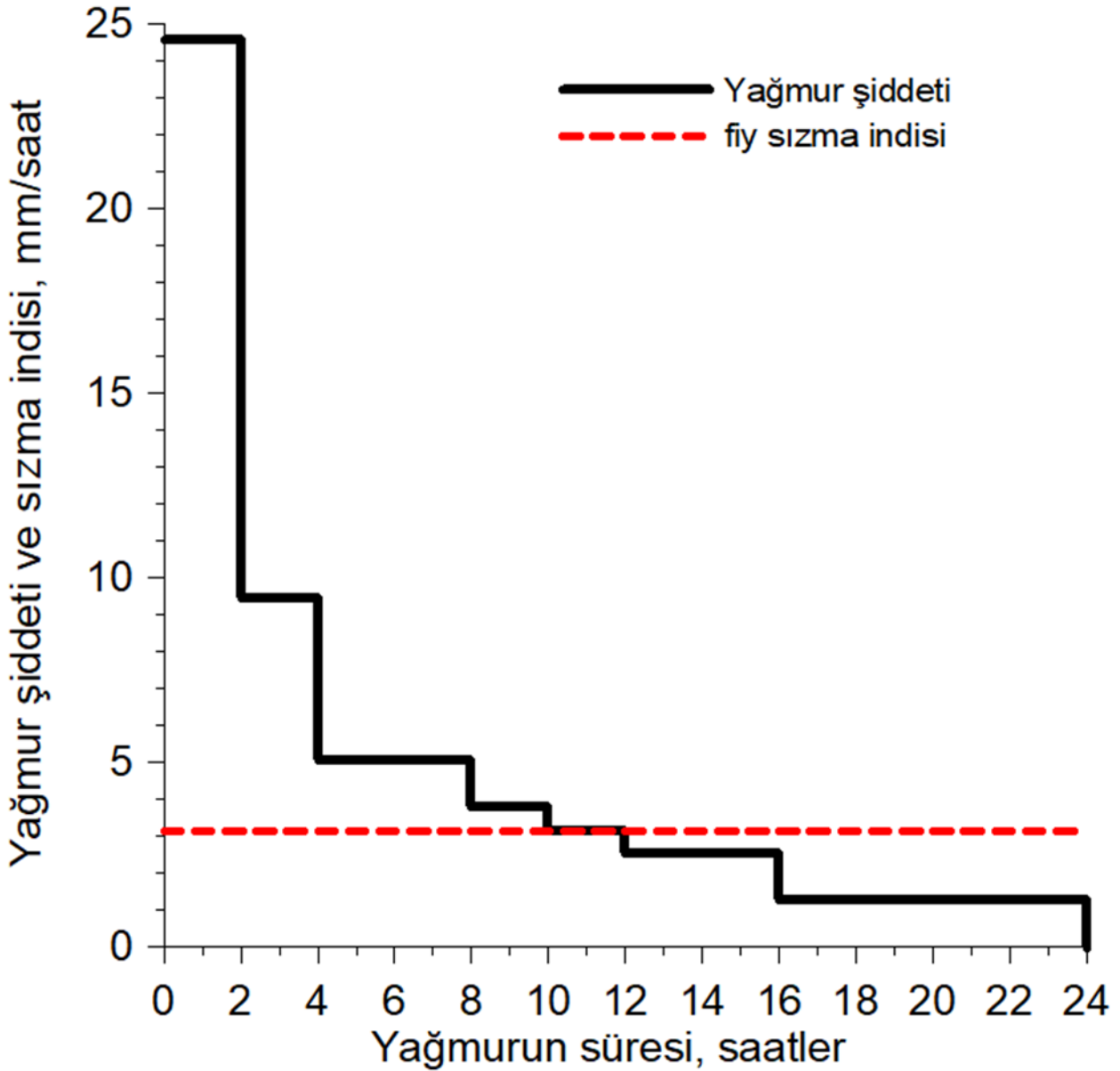
DSİ yaklaşımına göre Yamula Barajı havzasının büyük bir kısmı A bölgesindedir [15]. Toplam 24 saatlik yağmur süresi ikişer saatlik 12 adet dilime bölünmüştür. Böylece 2 saat süreli 1 cm derinliğindeki artık yağışın oluşturduğu Birim Hidrograf hesaplanmış ve tasarım yağmurundan oluşan tasarım hidrografı da elde edilen Birim Hidrograf'a bağlı olarak belirlenmiştir.

126 mm olarak hesaplanan 10 Bin yıl ortalama tekerrürlü 24 saat süreli ekstrem yağmur miktarının zamana göre dağılımı aşağıdaki Çizelge 3'te sunulmuştur. Havzada ara yağışların toplam yağışa olan oranları ve ikişer saatlik ara dilimlerdeki toplam ve artık yağışlar A Bölgesi için Çizelge 3'te verildiği şekilde hesaplanmıştır.

Çizelge 3. Yamula Barajı havzası için hesaplanan 126 mm'lik toplam yağmurun DSİ Yöntemine göre A Bölgesi için tasarım hiyetografı.

Zamanın toplam zamana oranı	Yağışın toplam yağışa oranı	Ara artım oranlar	Toplam yağış(mm)	Efektif yağış(mm)
2/24=0.0833	0.39	0.39	49.1	42.9
4/24=0.1667	0.56	0.15	18.9	12.6
6/24=0.25	0.64	0.08	10.1	3.8
8/24=0.3333	0.72	0.08	10.1	3.8
10/24=0.4167	0.78	0.06	7.6	1.3
12/24=0.50	0.83	0.05	6.3	0.0
14/24=0.5833	0.87	0.04	5.0	0.0
16/24=0.6666	0.91	0.04	5.0	0.0
18/24=0.75	0.94	0.03	3.8	0.0
20/24=0.8333	0.96	0.02	2.5	0.0
22/24=0.9167	0.98	0.02	2.5	0.0
24/24=1.0	1.00	0.02	2.5	0.0

Şekil 3'te yukarıdaki çizelgede hesaplanan tasarım hiyetografinin şekli verilmektedir.



Şekil 3. Yamula Barajı havzası için 10-Bin yıl ortalama tekerrürlü 24 saat süreli toplam yağışın tasarım hiyetografı ve havzanın ortalama sızma indisi.

2.2.5 Snyder-Gama Sentetik Birim Hidrograf Hakkında Özet

2-parametrelı gama dağılımı olasılık yoğunluk fonksiyonunun ölçeklendirilmiş biçiminin sentetik birim hidrograf olarak kullanılması Nash tarafından teklif edilmiştir [16]. Sonradan, bazı araştırmacılar bunu sentetik birim hidrograf olarak uygulamıştır [17, 19, 20]. Sentetik birim hidrografın pik debisinin, Q_p , ve pik debi zamanının, t_p , Snyder yöntemi formülleriyle hesaplanmasından sonra bu sentetik birim hidrografın şeklinin tamamı için ölçeklendirilmiş 2-parametrelı gama dağılımı olasılık yoğunluk fonksiyonunun adapte edilmesi ise yakın geçmişte ülkemizde ve dünyada birçok sentetik birim hidrograf için uygun olduğu gösterilmiştir [21]. Q_p ve t_p Snyder formülleriyle hesaplandıktan sonra 2-parametrelı gama dağılımı olasılık yoğunluk fonksiyonundan oluşan aşağıdaki denklemin kökü Snyder-Gama sentetik birim hidrografın analitik ifadesinin şekil parametresini (n) vermektedir [21].

$$\ln(n-1) + (n-1) \times [\ln(n-1) - 1] - \ln[\Gamma(n)] + \ln(A/0.36) - \ln(t_p) - \ln(Q_p) = 0 \quad (3)$$

Burada, $\Gamma(n)$: gama fonksiyonun n argümanı için verdiği nümerik değer, A : havzanın drenaj alanı (km^2), t_p : Snyder yöntemi ile hesaplanmış pik debi zamanı (saat), Q_p : Snyder yöntemi ile hesaplanmış pik debidir (m^3/s). Sonra, ölçek parametresi, K , gama dağılımı modunun analitik özelliğini yansıtan aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$K = t_p / (n-1) \quad (4)$$

Şekil ve ölçek parametreleri elde edildikten sonra, Snyder-Gama sentetik birim hidrografın herhangi bir t saatteki debisi aşağıdaki ifade ile hesaplanmaktadır.

$$Q = (A/0.36) \times (1/K) \times (t/K)^{n-1} \times \exp(-t/K) / \Gamma(n) \quad (5)$$

Burada, Q, artık yağmurun başından itibaren t saatteki debidir (m³/s).

3. Bulgular

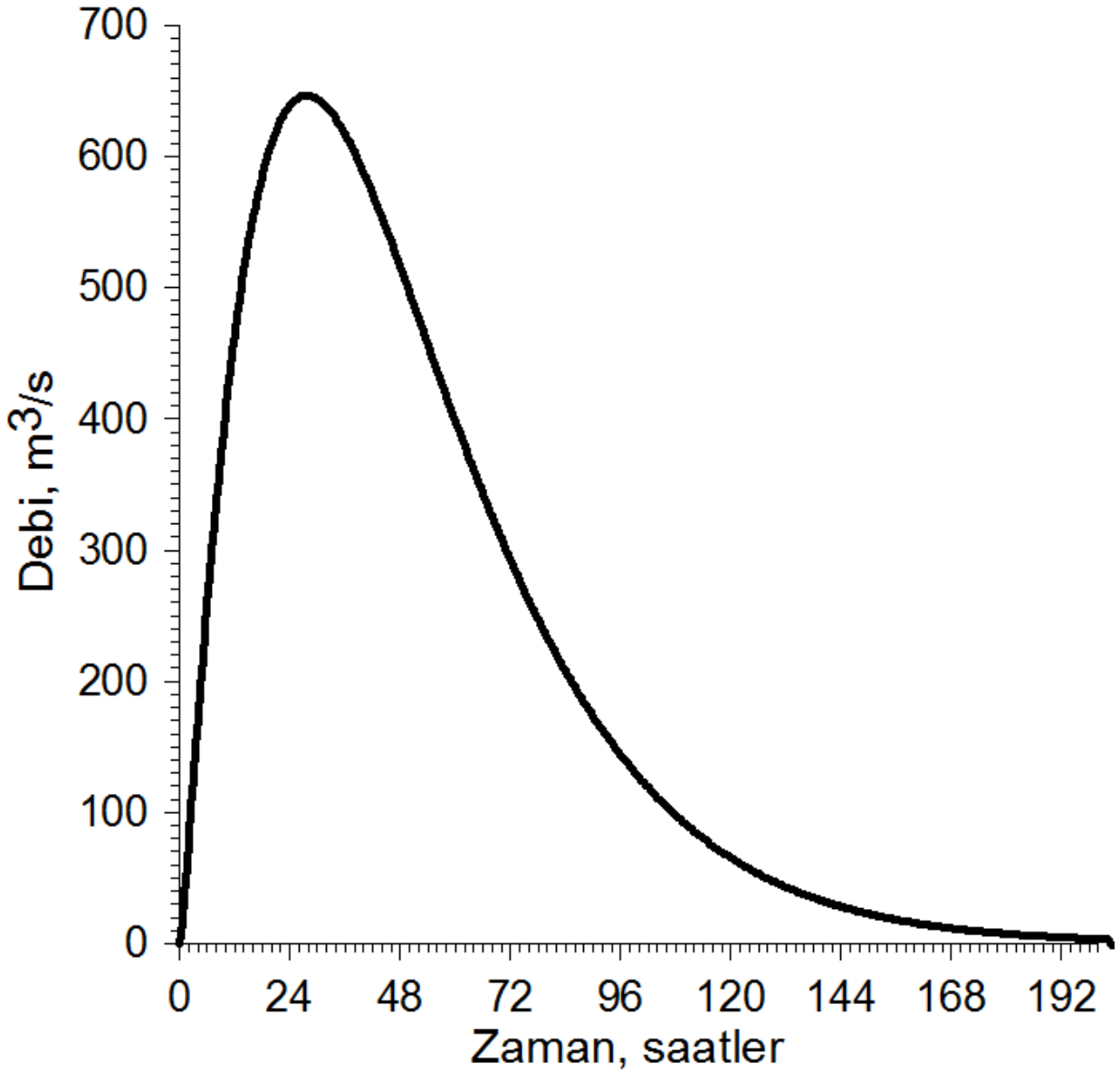
3.1 Yamula Barajı Havzası için 2-saatlik Snyder-Gama Sentetik Birim Hidrograf Hesabı

Tasarım hiyetografi 2-şer saatlik dilimlerde hesaplanmıştır. Bunun oluşturacağı yüzey akımı hidrografının hesabı için Yamula Barajı havzasının 2-saatlik birim hidrografi gerekmektedir. Yamula Barajı aksına çok yakın bulunan 1501-Yamula Akım Rasat İstasyonunda gözlenmiş taşkın hidrografları elde edilemediği için bu çalışmada yakın geçmişte sunulmuş olan [21] Snyder-Gama sentetik birim hidrografi yöntemiyle 2-saatlik birim hidrograf hesabı yapılmıştır.

'Giriş' bölümünde birkaç örnekle özetlendiği gibi Türkiye'miz akarsuları için Snyder Sentetik Birim Hidrograf yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Snyder yöntemi için o havzanın drenaj özelliklerini yansıtan Ct ve Cp olarak sembolize edilen iki adet katsayıya ihtiyaç bulunmaktadır. Hidrograf hesaplarında, yağmurdan sonraki en önemli parametrelerinden birisi olan ve çoğunlukla A ile sembolize edilen drenaj alanı da gerekmektedir. Ayrıca, ana akarsu kolunun toplam uzunluğu (L, km) ve ana kolun havza ağırlık merkezine en yakın kesiti ile havza çıkış kesiti arasındaki uzunluğu da (Lc, km) gerekmektedir. Google-earth sitesinden indirilen haritadan, L = 374 km, Lc = 178 km olarak belirlenmiştir. Yamula Barajı havzasının alanı (A) ise 15582 km² olarak belirlenmiştir.

Geçmiş yıllarda gözlenmiş hiyetograf-hidrograf verileri kullanılarak yapılan bir çalışmada, Kızılırmak Havzasına güneyden komşu olan Seyhan Havzasındaki Göksu Irmağı üstünde bulunan 1801-Himmetli akım gözlem istasyonu havzasında, Ct ve Cp sırasıyla, 1.3 ve 0.2 olarak hesaplanmıştır. Aynı çalışmada, Seyhan Nehrinin batısındaki bitişik 17 nolu havzada 1714-Kayraktepe akım gözlem istasyonu havzasında, Ct ve Cp sırasıyla 1.5 ve 0.4, Seyhan Nehrinin doğusundaki bitişik 20 nolu havzada 2010-Kürtleravşarı akım gözlem istasyonu havzasında ise bu değerler sırasıyla 1.4 ve 0.2 olarak hesaplanmıştır [17]. Bu nümerik değerler göz önünde bulundurularak pik debi zamanının çok erken olmaması ve pik debi değerinin çok küçük olmaması amaçlanarak, Yamula Barajı havzası için Snyder katsayılarının (Ct ve Cp) sırasıyla 1.3 ve 0.4 olarak alınmasına karar verilmiştir.

Yamula Barajı havzası için A = 15582 km², L = 374 km, Lc = 178 km, Ct = 1.3, Cp = 0.4 değerleri ile 2-saatlik Snyder-Gama Sentetik Birim Hidrograf hesaplanmıştır. Bu sentetik birim hidrograf Şekil 4'te verilmiştir.

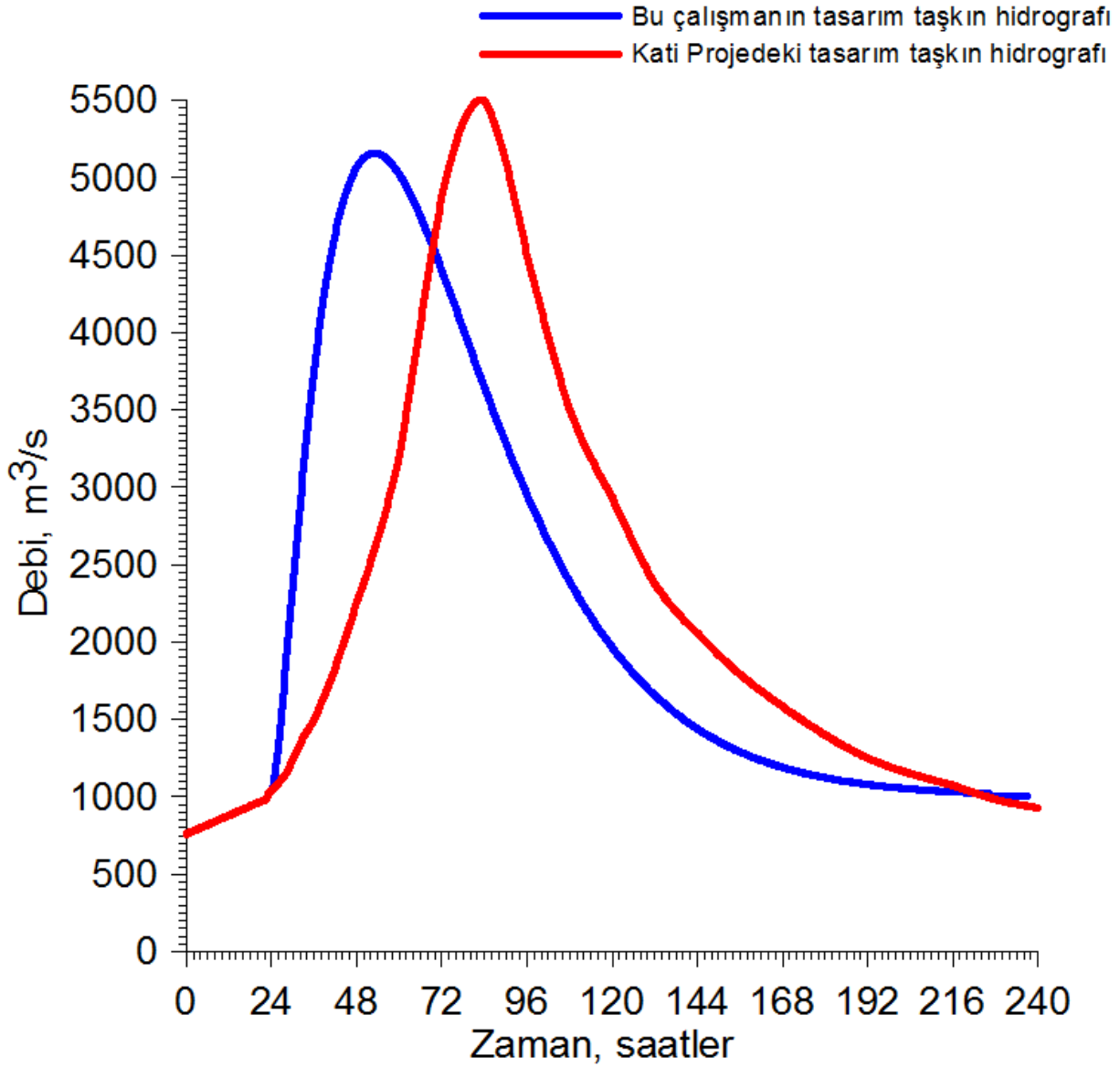


Şekil 4. Yamula Barajı havzasında 2-saatlik Snyder-Gama sentetik birim hidrograf.

3.2 Yamula Barajı Havzası Tasarım Taşkın Hidrografı Hesabı

Çalışmada, 2-saatlik Snyder-Gama sentetik birim hidrograf, yukarıda ilgili alt bölümde özetlendiği biçimde hesapladığımız tasarım hiyetografına uygulanarak Yamula Barajına gelmesi olası yüzey akımının oluşturduğu tasarım taşkın hidrografı hesaplanmıştır. Yamula Barajı Kati Projesinde, yüzey akımı hidrografına ilaveten, baştan 760 m³/s'lik bir debi ile başlayan ve 24 saat içinde 1000 m³/s'ye artan bir kar erimesi artı yeraltı suyu katkısı hidrografı verilmektedir. Bu çalışmada hesaplanan yüzey akımı hidrografı, Yamula Barajı kati projesinde verilen kar erimesi + yeraltı suyu katkısı hidrografı ile toplanarak, toplam tasarım taşkın hidrografı oluşturulmuştur. Böylece hesaplanan tasarım taşkın hidrografı, Yamula Barajı Kati Projesinde verilen tasarım taşkın hidrografı ile karşılaştırılmıştır. [23] nolu kaynakta verilen Yamula Barajı Kati Projesindeki tasarım taşkın hidrografının nümerik değerleri aynen alınarak bu çalışmada hesaplanan tasarım taşkın hidrografı ile birlikte Şekil 5'te verilmektedir. Yamula Barajının Kati Projesindeki tasarım hidrografının pik debisi 5500 m³/s'dir [23]. Bu çalışmadaki tasarım taşkın hidrografının pik debisi 5160 m³/s'dir. Hidrografların en önemli özelliği olan pik debilerde sadece % 6 kadar bağıl fark vardır. Şekil 5'te görüldüğü gibi Kati Projedeki hidrografın pik debi zamanı bu çalışmada hesaplanandan bir gün kadar daha sonra oluşmaktadır. Duyarlı sonuç alma amacıyla bu çalışmada, Yamula Barajı havzası için 2'şer saat dilimlerine bölünmüş 24 saatlik tasarım yağmur hiyetografı Türkiye'de konuyla ilgili DSİ'nin 'Uygulamalı Taşkın Hidrolojisi' kitabında [15] verilen yöntemle hesaplanmıştır. Şekil 3'te görüldüğü gibi, bu yöntem ile yağmurun büyük bir kısmı ilk 2 saatlik dilimde düşmektedir. Çalışmamız hidrografı pik debi zamanının Kati Projedekinden önce olmasının nedeni bu olabilir. Kati Projede Yamula Barajı tasarım taşkın hidrografının nasıl hesaplandığına dair bilgi bulunmamaktadır. Kati Proje 1995 tarihlidir. Bu çalışmada öncelikle, Yamula Barajı Havzası içinde ve yakın civarında yedi adet yağmur gözlem istasyonunda 2010 yılı dahil Meteoroloji Genel Müdürlüğüne ölçülmüş ekstrem yağmur verileri ile frekans analizleri sonucu 10 Bin yıl

ortalama tekerrürlü havza ortalaması yağmur değeri hesaplanmıştır. Yukarıda ilgili Bölümlerde özetlendiği üzere, Snyder katsayıları için ve havza ortalaması sızma indisi için ilgili kaynaklardan yararlanarak makul değerler alınmıştır. Burada kullanılan Snyder-Gama Sentetik Birim Hidrografının daha önce yayınlanan bir çalışmada ülkemizde çok sayıda havzaya uygulanarak başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür [21].



Şekil 5. Yamula Barajı için çalışmada hesaplanan 10Bin yıl ortalama tekerrürlü 24 saat süreli ekstrem yağışın oluşturduğu tasarım taşkın hidrografı ve Yamula Barajı Kati Projesinde [23] verilen tasarım taşkın hidrografı.

Tartışma ve Sonuç

Henüz yeni olan Snyder-Gama sentetik birim hidrografı yöntemi ile Yamula Barajı havzası için 2-saat süreli 1 cm'lik artık yağışın oluşturacağı birim hidrograf hesaplanmıştır. Bu birim hidrograf, 24-saat süreli 10-Bin yıl ortalama tekerrürlü ekstrem yağmurun tasarım hiyetografına uygulanarak Yamula Barajı için olası maksimum taşkın hidrografı hesaplanmıştır. Bu tasarım taşkın hidrografının, Yamula Barajı kati projesinde verilen tasarım taşkın hidrografına çok yakın olduğu görülmüştür. Kati projede hidrolojik hesapların açıklaması bulunmamaktadır. Burada özetlenen biçimde Snyder-Gama sentetik birim hidrografı kullanarak hesaplanan tasarım taşkın hidrografının barajın kati projesindeki yakını çıkması yakın Snyder-Gama Sentetik Birim Hidrografı yönteminin makul birim hidrograf verdiğine bir doğrulama olarak değerlendirilebilir.

Teşekkür

Kızılırmak havzası içinde ve civarındaki meteoroloji istasyonlarında gözlenmiş olan standart süreli ekstrem yağmur verileri serilerini sağladığı için Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne teşekkür ederim.

Kaynakça

- [1] WMO. 2009. Guide to Hydrological Practices, Volume II, Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices. WMO-No. 168 (Chapter 6 – Modeling of Hydrologic Systems). Sixth edition, World Meteorological Organization, P.O. Box 2300, CH-1211, Geneva 2, Switzerland.
- [2] HEC. 2008. Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Applications Guide. Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers, 441 G St., NW Washington, DC 20314-1000, USA.
- [3] Environment Agency. 2020. Flood Estimation Guidelines – Technical Guidance 197_08. National Flood Hydrology Team, Environment Agency, Government of UK.
- [4] Central Water Commission. 2010. Development of Hydrological Design Aids (Surface Water) under Hydrology Project II - State of The Art Report. Central Water Commission, Ministry of Water Resources, Government of India.
- [5] Ball, J., Babister, M., Nathan R., Weeks, W., Weinmann, E., Retallick, M., Testoni, I., (Editors). 2019. Australian Rainfall and Runoff: A Guide to Flood Estimation, © Commonwealth of Australia (Geoscience Australia).
- [6] DSİ. 1987. Çatalan Barajı ve HES Kati Projesi, Kadastral Taşkın, Pafta no.43. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Etüt ve Plan Dairesi Başkanlığı, Yücepe, Ankara.
- [7] DSİ. 2008. Ilisu Barajı ve Hidroelektrik Santrali, Taşkın Hidrolojisi ve Sediment Taşınımı, REP.0542/002-t-Rev.1. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Barajlar ve Hidroelektrik Santraller Dairesi Başkanlığı, Yücepe, Ankara.
- [8] Temelsu. 2007. Bayramhacılı Barajı ve HES Kesin Projesi (İnşaat). Temelsu Uluslararası Mühendislik Hizmetleri A.Ş., Çankaya, Ankara.
- [9] Sanko. 2007. Yedigöze Barajı ve HES Kesin Fizibilite (Cilt: 1/2 Rapor). Sanko Mühendislik ve Danışmanlık A.Ş. Çetin Emeç Bulvarı, 6.ncı Cadde, No: 61/7, 06520, Balgat/Ankara.
- [10] Wang, J., Hong, Y., Li, L., Gourley, J. J., Khan, S. I., Yilmaz, K. K., Adler, R. F., Policelli, S. F., Habib, S., Irwin, D., Limaye, A. S., Korme, T., Okello, R. 2011. The coupled routing and excess storage (CREST) distributed hydrological model. Hydrological Sciences Journal, 56(1), 84–98, doi: 10.1080/02626667.2010.543087
- [11] Chow, V.T., Maidment, D. R., Lays, L. W. 1988. Applied Hydrology. McGraw-Hill, New York.
- [12] Singh, P. K., Mishra, S. K., Jain, M. K. 2014. A review of the synthetic unit hydrograph: from the empirical UH to advanced geomorphological methods, Hydrological Sciences Journal, 59(2), 239-261, DOI: 10.1080/02626667.2013.870664
- [13] Usul, N. and Birhan, T. 1995 Determining synthetic unit hydrographs and parameters for four Turkish basins. Journal of Soil and Water Conservation, 50(2), 170–173.
- [14] Snyder, F. F. (1938) Synthetic Unit-Graphs, Transactions, American Geophysical Union, 19(1), 447–454.
- [15] Özdemir, H. 1978. Uygulamalı Taşkın Hidrolojisi. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Yücepe, Ankara.
- [16] Nash, J. E. 1959. Systematic determination of unit hydrograph parameters. Journal of Geophysical Research, 64(1), 111–115.
- [17] Haktanır, T. and Sezen, N. 1990. Suitability of two-parameter gamma and three-parameter beta distributions as synthetic unit hydrographs in Anatolia. Hydrological Sciences Journal, 35(2), 167–184.
- [18] Nadarajah, S. 2007. Probability models for unit hydrograph derivation. Journal of Hydrology, 344, 185–189.
- [19] Patil, P. R., Mishra, S. K., Sharma, N., Swar, A. K. 2012 Two-Parameter Gamma-Based SUH Derivation. International Journal of Environmental Science and Development, 3(5), 427–432.
- [20] Naghibi, S. E., Vafakhah, M., Nia, A. M., Eslamian, S. 2018. Evaluation of some distribution functions for derivation of unit hydrograph in the Bar Watershed, Iran. International Journal of Hydrology Science and Technology, 8(2), 134–147.
- [21] Açıkanal, N. 2021. Snyder-Gamma synthetic unit hydrograph. Arabian Journal of Geosciences, 14: 271. doi: 10.1007/s12517021065317

- [22] Fang, X., Thompson, D. B., Cleveland, T. G., Pradhan, P., Malla, R. 2008. Time of Concentration Estimated Using Watershed Parameters Determined by Automated and Manual Methods. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 134(2), doi: 10.1061/ASCE073394372008134:2202
- [23] Kayseri Elektrik Üretim Sanayi ve Ticaret A.Ş. ve Aydınlar İnşaat 1995 Yamula Hydroelectric Project, Volume 4. Kayseri.

Değişken Gecikmeli Sinir Ağları için Geliştirilmiş Niteliksel Kriterler

Osman Tunç*

*₁ Department of Computer, Başkale Vocational School, Van Yuzuncu Yil University, 65080, Van-Turkey.

(Alınış / Received: 08.07.2021, Kabul / Accepted: 03.08.2021, Online Yayınlanma / Published Online: 31.08.2021)

Anahtar Kelimeler

Gecikmeli Sinir Ağları,
Lyapunov–Krasovskii
Fonksiyoneli,
Zamanla Değişen Gecikme,
Asimptotik Kararlılık,
Integrallenebilirlik,
Sınırlılık

Öz: "Phys. Lett. A 374 (2010), no. 7, 938–943" makalesinde Tian ve Xie [1, Teorem 1] değişken gecikmeli sinir ağlarının bir sistemini ele aldı. [1]'de, ele alınan gecikmeli sinir ağları sisteminin orijinin global asimptotik kararlı olması için, araştırmacılar tarafından yeni şartlar elde edildi. [1]' de bazı yeni ve az kısıtlayıcı gecikme bağımlı global asimptotik kararlılık şartları elde etmek için, ispat tekniği yeni bir Lyapunov fonksiyonelinin tanımına bağlıdır. İzlenimlerimize göre, Tian ve Xie [1, Teorem 1]'nin global asimptotik kararlılık kriterleri ilginç olmasına rağmen, bu kriterlerin kısıtlayıcı olduğu ve uygulamalar sırasında bu kriterlerin sağlatılması zor olabilir. Bu çalışmada, biz uygun ve yeni bir Lyapunov – Krasovskii fonksiyoneli tanımlayarak, bu fonksiyonel yardımı ile Tian ve Xie [1, Teorem 1]'nin asimptotik kararlılık kriterlerini daha az kısıtlayıcı koşullar altında elde etmekteyiz. Bununla birlikte çözümlerin integrallenebilirlik ve sınırlılık durumlarını incelemekteyiz. Bu çalışma ile değişken gecikmeli sinir ağlarının niteliksel teorisine yeni katkılar yapmayı amaçlıyoruz.

Improved Qualitative Criteria for Neural Networks with Variable Delays

Keywords

NNs,
LKF,
Time-varying delay,
Asymptotic stability,
Integrability,
Boundedness

Abstract: In the paper "Phys. Lett. A 374 (2010), no. 7, 938–943", Tian and Xie [1, Theorem 1] considered a system of neural networks (NNs) with variable delay. In [1], new global asymptotic stability criteria for the considered system of NNs are obtained. In [1], the technique of the proof depends upon the definition of a candidate Lyapunov functional to obtain some new and weaker delay-dependent global asymptotic stability criteria. To the best of the information, we would like to claim that in spite of the global asymptotic stability criteria in Tian and Xie [1, Theorem 1] are very interesting, however they are very strong and satisfactions of them during applications may be difficult. In this work, we define a novel suitable Lyapunov – Krasovskii functional (LKF) and establish less conservative global asymptotic stability criteria than those given in Tian and Xie [1, Theorem 1] as well as we investigate the integrability and boundedness of solutions. By this way, we aim to do new contributions to the qualitative theory of NNs with time-varying delays.

*Corresponding Author, email: osmantunc89@gmail.com

1. Introduction

It follows from relevant literature that in last years the stability of numerous systems of NNs with time-varying delay(s) has been extensively studied, because of their very effective roles in sciences, engineering, medicine and so on. For example, systems of NNs with time-varying delay(s) can appear during application prospective in pattern recognition, engineering systems, image processing, biological systems, fault diagnosis, economical systems, associative memories and so forth (see, the papers [2, 4-6, 9-13] and the references therein).

We now outline a few related works on the stability problems of various NNs with time-varying delays.

In [3], Hua et al. investigated the behavior of continues NNs with variable delay given by

$$\frac{dx}{dt} = -Cx(t) + Af(x(t)) + Bf(x(t-d(t))) + I$$

with

$$0 \leq d(t) \leq d, \quad \frac{d}{dt}d(t) \leq \mu.$$

In [3], a theorem on the asymptotic stability of this system is proved via an LKF and linear matrix inequalities (LMIs) by the authors. By the given examples, it is obtained upper bounds for the constant d .

Afterwards, Sun et al. [6] considered the following NNs with variable delay:

$$\frac{dx}{dt} = -Cx(t) + Ag(x(t)) + A_1g(x(t-\tau(t))) + u$$

with

$$0 \leq \tau(t) \leq h, \mu_2 \leq \frac{d}{dt}\tau(t) \leq \mu_2 < 1.$$

In [6], the stability of the above NNs with time-varying delay is investigated via constructing a new LKF, which includes a triple-integral term. Here, using the free-weighting matrices method, some delay-dependent stability criteria are derived in terms of LMIs. Indeed, in [6], a theorem, which includes sufficient conditions on the asymptotic stability of the above NNs, is proved. The rate-range of the delay, i.e., upper bounds of h for different μ is also obtained.

Kwon and Park [4] considered an uncertain NNs with discrete time-varying delays. Here, the problem of stability analysis for the considered NNs with time-varying delays is investigated. By constructing a new LKF, a new delay-dependent stability criterion for the considered NNs is established in terms of LMIs. Numerical examples are included to show the effectiveness of proposed criterion.

Kwon et al. [5] considered the following NNs with time-varying delay, $h(t)$:

$$\frac{dy}{dt} = -Ay(t) + W_0g(y(t)) + W_1g(y(t-h(t))) + b$$

with

$$0 \leq h(t) \leq h_U, -\infty < \frac{d}{dt}h(t) \leq h_D.$$

In Kwon et al. [5], certain sufficient conditions to satisfy the asymptotic stability of the above NNs are established in terms of LMIs via definition of an LKF and some novel techniques.

In 2009, 2010, 2011 and 2015, Tian and Xu [7], Tian and Xie [1], Tian and Zhong [8], Tian and Liu [9] considered the following system of NNs with time-varying delay, $\tau(t)$:

$$\frac{dx}{dt} = -Cx(t) + Ag(x(t)) + Bg(x(t-\tau(t))) + \mu, \tag{1}$$

where $t \in \mathbb{R}^+$, $\mathbb{R}^+ = [0, \infty)$, $x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T \in \mathbb{R}^n$ is the neuron state vector, $g(x) = [g_1(x_1(t)), g_2(x_2(t)), \dots, g_n(x_n(t))]^T \in \mathbb{R}^n$ denotes the neuron activation, $g(x(t-\tau(t))) = [g_1(x_1(t-\tau(t))), g_2(x_2(t-\tau(t))), \dots, g_n(x_n(t-\tau(t)))]^T \in \mathbb{R}^n$ and $\mu = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n]^T \in \mathbb{R}^n$ is a constant input vector. Next, $A, B \in \mathbb{R}^{n \times n}$ are the connection weight matrix and the delayed connection weight matrix, respectively. $C = \text{diag}(C_{11}, C_{22}, \dots, C_{nn})$ with $C_{ii} > 0, i = 1, 2, \dots, n$, and $\tau(t)$ is time-varying delay function and satisfies the following conditions:

$$\tau(t) \in C^1(\mathbb{R}^+, (0, \infty)), \mathbb{R}^+ = [0, \infty), 0 \leq \tau(t) \leq h, 0 \leq \tau'(t) \leq h_0 < 1,$$

where h and h_0 are constants. In addition, it is assumed that each neuron activation function in system (1), i.e. $g_i(x(\cdot))$, satisfies the following condition:

$$\gamma_i \leq \frac{g_i(x) - g_i(y)}{x - y} \leq \sigma_i \text{ for all } x, y \in \mathbb{R}, i = 1, 2, \dots, n, \tag{2}$$

where γ_i, σ_i are positive constants.

We assume that $x^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*]^T$ is the equilibrium point of system(1). Using the transformation $z(\cdot) = x(\cdot) - x^*$, then the system of NNs (1) can be converted to the following system of delay differential equations (DDEs):

$$\frac{dz}{dt} = - Cz(t) + Af(z(t)) + Bf(z(t - \tau(t))), \tag{3}$$

where

$$z(t) = [z_1(t), z_2(t), \dots, z_n(t)]^T \in \mathbb{R}^n, f(z) = [f_1(z_1(t)), f_2(z_2(t)), \dots, f_n(z_n(t))]^T \in \mathbb{R}^n \text{ and } f_i(z_i(t)) = g_i(z_i(t) + z_i^*) - g_i(z_i^*), i = 1, 2, \dots, n.$$

In view of the inequality (2), we can derive that

$$\gamma_i \leq \frac{f_i(z_i(t))}{z_i(t)} \leq \sigma_i, f_i(0) = 0, i = 1, 2, \dots, n . \tag{4}$$

It is worth to mention that, in the present literature, there are numerous and interesting papers on the various stability problems related the system of NNs (3) with time-varying delays and its modified different forms. In fact, here, our aim is not to focus on the details of those works. However, we would like to attract the attentions of researchers to a different point such as the positive effect of proper LKFs during the investigation of stability problems of NNs with time-varying delays. Next, we should mention that, in the above mentioned papers, one of the important aim of the researchers is to obtain weaker stability criteria on the upper bound of the time variable delays of the considered NNs in terms of LMIs, using LKF method, free-weighting matrices method, convex optimization approach, reciprocally convex approach and so on. In all of the above mentioned papers, the technique of the proofs is based on construction of various different LKFs. For illustrative aims, in particular cases, some numerical examples are also provided to demonstrate the obtained criteria and to show applications of them therein. Here, for the sake of the brevity, we would not like to give more details on the subject.

In this paper, we also consider the system of NNs (1) with time-varying delay and its equivalent system of DDEs (3). Indeed, we take into account the paper of Tian and Xie [1] as a reference paper. The above mentioned papers can also be taken as the references papers, however, for the sake of the suitability, we would not to do that ones. Here, we define a very different LKF from those are available in the above mentioned papers and literature. We aim to show the positive effect of this LKF to get weaker and more suitable conditions. Here, we would not obtain the upper bound of the variable time delay in a general form. This fact can be specified according to proper stability problems. In this paper, we would not like to discuss this case.

Now, from above discussion, it can be seen that the stability problem related to the equilibrium point x^* of the system of NNs (1) with time-varying delay can be transformed into the stability of the origin of the system of DDEs (3) with time-varying delay. Hence, instead of the investigation of stability of the system of NNs (1) with time-varying delay, it can be investigated the stability problem of the origin of the system of DDEs (3). In this paper, we also do the same, i.e., under the above assumptions and transform, instead of the stability problem of the system of NNs (1), we investigate the stability of the system of DDEs (3) with time variable delay.

2. Material and Method

In this paper, the technique of the proofs is based on the Lyapunov-Krasovskiĭ functional method. When we use this method, it is needed to construct or to define a suitable LKF.

3. Results

Consider the following system of DDEs:

$$\frac{dz}{dt} = F(z_t), z_t(\theta) = z(t + \theta), -r \leq \theta \leq 0, \tag{5}$$

where $z \in \mathbb{R}^n$. We assume that $C = C([-r, 0], \mathbb{R}^n)$ is the space of continuous functions from $[-r, 0]$ into \mathbb{R}^n and $F : C \rightarrow \mathbb{R}^n$ is continuous and $F(0) = 0$. Let C_H be the open H -ball in C ; $C_H := \{\phi \in C([-r, 0], \mathbb{R}^n) : \|\phi\| < H\}$. Let S be the set of $\phi \in C$ such that $\|\phi\| \geq H$, denote by S^\bullet the set of all functions $\phi \in C$ such that $|\phi(0)| \geq H$, where H is large enough.

Let $z(t) = z(t, t_0, \phi)$ be a solution of (5) on $[t_0 - \tau, t_0]$, $t_0 \geq 0$, such that $z(t) = \phi(t)$ on $[t_0 - \tau, t_0]$, where $\phi : [t_0 - \tau, t_0] \rightarrow \mathbb{R}^n$ is a continuous initial function (see, Burton [10] and Yoshizawa [11]).

Definition 1. (Burton [10].) The zero solution of DDE (5) is asymptotically stable if it is stable if for each $t_1 \geq t_0 \geq 0$, there is an $\eta > 0$ such that $[\phi \in C(t_1), \|\phi\| < \eta]$ imply that $z(t, t_1, \phi) \rightarrow 0$ as $t \rightarrow \infty$. If this is true for every $\eta > 0$, then $x = 0$ is asymptotically stable in the large or globally asymptotically stable.

Lemma 1. (Sinha [12, Lemma 1].) Suppose $F(0) = 0$. Let V be a continuous LKF defined on C_H with $V(0) = 0$ and let $u(s)$ be a function, non-negative and continuous for $0 \leq s < \infty$, $u(s) \rightarrow \infty$ as $s \rightarrow \infty$ with $u(0) = 0$. If for all ϕ in C , $u(\phi(0)) \leq V(\phi)$, $V(\phi) \geq 0$, $\frac{d}{dt}V(\phi) \leq 0$, then the zero solution of the system of DDEs (4) is stable.

Let $\Omega \subset C_H$ be a set of all functions $\phi \in C_H$, where $V'(\phi) = 0$. If $\{0\}$ is the largest invariant set in Ω , then the zero solution of the system of DDEs (5) is asymptotically stable.

Theorem 1. (Smith [13, Theorem 5.17].) If V is a LKF on the set $\Omega \subset C$ and $x_t(\phi)$ is a bounded solution such that $x_t(\phi) \in \Omega$ for $t \geq 0$, then $\omega(\phi)$ is contained in the largest invariant subset of $E \equiv \{\psi \in \bar{\Omega} : \frac{d}{dt}V(\psi) = 0\}$.

Remark 1. If the largest invariant set contained in E is $\{0\}$, then the zero solution of (3) is globally asymptotically stable (see Graef and Tunç [14, Theorem 2.1]).

Let $z \in \mathbb{R}^n$ and norm $\|\cdot\|$ be defined by

$$\|z\| = \sum_{i=1}^n |z_i|.$$

Next, let $M \in \mathbb{R}^{n \times n}$. Then, the norm of this matrix is defined by

$$\|M\| = \max_{1 \leq j \leq n} \left(\sum_{i=1}^n |m_{ij}| \right).$$

We should note that, in some places, it will be written \mathcal{Z} instead of $\mathcal{Z}(t)$, without mention.

For any $\phi \in C$, let

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

and

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

We should note that the neural system (3) with time variable delay is a particular case of the system of DDEs (5).

Let us give the main result of Tian and Xie [1, Theorem 1].

Theorem 2. (Tian and Xie [1, Theorem 1]). For given scalars $\Gamma = \text{diag}(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n)$, $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n)$, $u \geq 0$, $h \geq 0$, the origin of the NNs (3) with time variable delay is globally asymptotically stable if there exist symmetric positive matrices P, Q_1, Q_2 , $\begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ * & X_{22} \end{bmatrix}$, $\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ * & Y_{22} \end{bmatrix}$, positive diagonal matrices $T_1, T_2, \Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$, $D = \text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_n)$ and any matrices $P_1, P_2, N_i, M_i, L_i, S_i$, ($i = 1, 2, \dots, 7$), with appropriate dimensions, such that the following LMIs hold:

$$E_1 = \begin{bmatrix} \bar{E} & -\frac{h}{2}N \\ * & -\frac{h^2}{4}Q_1 \end{bmatrix} < 0,$$

$$E_2 = \begin{bmatrix} \bar{E} & -\frac{h}{2}L \\ * & -\frac{h^2}{4}Q_1 \end{bmatrix} < 0,$$

$$\Phi_1 = \begin{bmatrix} \bar{\Phi} & -\frac{h}{2}M \\ * & -\frac{h^2}{4}Q_2 \end{bmatrix} < 0,$$

$$\Phi_2 = \begin{bmatrix} \bar{\Phi} & -\frac{h}{2}S \\ * & -\frac{h^2}{4}Q_2 \end{bmatrix} < 0.$$

Remark 2. For the details of some the other terms included in this theorem, see, Tian and Xie [1, Theorem 1]. In fact, this theorem includes the terms formulated as $E_{11} - E_{17}$, $E_{22} - E_{27}$, $E_{33} - E_{37}$, $E_{44} - E_{47}$, $E_{55} - E_{57}$, $E_{66} - E_{67}$, E_{77} , $\Phi_{11} - \Phi_{17}$, $\Phi_{22} - \Phi_{27}$, $\Phi_{33} - \Phi_{37}$, $\Phi_{44} - \Phi_{47}$, $\Phi_{55} - \Phi_{57}$, $\Phi_{66} - \Phi_{67}$ and Φ_{77} . These terms can lead very stronger stability conditions.

3.1. New Qualitative Analyses

In this section, we obtain the global asymptotic stability result of Tian and Xie [1, Theorem 1] under less conservative conditions and also establish two new qualitative results for the system of DDEs (3).

The first new result of this paper is on the global asymptotic stability of the origin and given by the following theorem, Theorem 2.

Theorem 2. We assume the following conditions, (C1), (C2), hold:

(C1) There is a positive constant f_0 such that

$$f(0) = 0, \|f(u)\| \leq f_0 \|u\| \text{ for all } u \in \mathbb{R}^n.$$

(C2) There are constants C_0 , h_0 , $0 < h_0 < 1$, and Δ_0 such that

$$C = \text{diag}(C_{11}, C_{22}, \dots, C_{nn}) \text{ with } C_{ii} > 0,$$

$$C_0 = \sum_{i=1}^n C_{ii}$$

and

$$C_0(1 - h_0) - f_0(1 - h_0)\|A\| - f_0\|B\| \geq \Delta_0.$$

Then the origin of the system of DDEs (3) is globally asymptotically stable.

Proof. For the poof of this theorem, we define a LKF $W = W(z(t))$ by

$$\begin{aligned} W(z(t)) &:= \|z(t)\| + \gamma \int_{t-\tau(t)}^t \|f(z(s))\| ds \\ &= |z_1(t)| + \dots + |z_n(t)| + \gamma \int_{t-\tau(t)}^t |f_1(z_1(s))| ds + \dots + \gamma \int_{t-\tau(t)}^t |f_n(z_n(s))| ds, \end{aligned} \tag{6}$$

where $\gamma > 0$, $\gamma \in \mathbb{R}$, and γ will be chosen later in the proof.

As for the next step, it follows that

$$W(0) = 0, |z_1(t)| + \dots + |z_n(t)| \leq W(z(t)).$$

Calculating the time derivative of the LKF W in (6) along the trajectories of the system of DDEs (3) and using the condition $0 \leq \tau'(t) \leq h_0 < 1$, we obtain

$$\frac{d}{dt}W(z(t)) = z'(t) \text{sgn } z(t+0) + \gamma \|f(z(t))\| - \gamma \|f(z(t-\tau(t)))\| (1 - \tau'(t))$$

$$\leq \sum_{i=1}^n z'_i(t) \operatorname{sgn} z_i(t+0) + \gamma \|f(z(t))\| - \gamma(1-h_0) \|f(z(t-\tau(t)))\|. \quad (7)$$

According to the first term in (7), using condition (C2), we derive

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \operatorname{sgn} z_i(t+0) z'_i(t) &\leq -\sum_{i=1}^n C_{ii} |z_i(t)| \\ &\quad + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |a_{ij}| |f_j(z(t))| + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |b_{ij}| |f_j(z(t-\tau(t)))| \\ &= -\sum_{i=1}^n C_{ii} |z_i(t)| + \|A\| \|f(z(t))\| + \|B\| \|f(z(t-\tau(t)))\| \\ &= -C_0 \|z(t)\| + \|A\| \|f(z(t))\| + \|B\| \|f(z(t-\tau(t)))\| \end{aligned}$$

with $C_0 = \sum_{i=1}^n C_{ii}$.

From (7) and the above discussion, it follows that

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} W(z(t)) &\leq -C_0 \|z(t)\| + \|A\| \|f(z(t))\| + \|B\| \|f(z(t-\tau(t)))\| \\ &\quad + \gamma \|f(z(t))\| - \gamma(1-h_0) \|f(z(t-\tau(t)))\|. \end{aligned}$$

Let $\gamma = \frac{\|B\|}{1-h_0}$. Then, according to the condition (C1), we have

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} W(z(t)) &\leq -C_0 \|z(t)\| + \|A\| \|f(z(t))\| + \frac{\|B\|}{1-h_0} \|f(z(t))\| \\ &\leq -C_0 \|z(t)\| + f_0 \|A\| \|z(t)\| + \frac{f_0 \|B\|}{1-h_0} \|z(t)\| \\ &= -\left(C_0 - f_0 \|A\| - \frac{f_0 \|B\|}{1-h_0} \right) \|z(t)\| \\ &= -\frac{1}{1-h_0} \left[C_0(1-h_0) - f_0(1-h_0) \|A\| - f_0 \|B\| \right] \|z(t)\| \\ &\leq -\frac{\Delta_0}{1-h_0} \|z(t)\| \\ &= -M_0 \|z(t)\|, \end{aligned}$$

where $M_0 = \frac{\Delta_0}{1-h_0}$. Hence, we have

$$\frac{d}{dt}W(z(t)) \leq -C_0 \|z(t)\| \leq 0. \tag{8}$$

Next, we define a set E such that $E \equiv \{\psi \in \bar{\Omega} : \frac{d}{dt}W(\psi) = 0\}$. Hence, it is derived from (8) that

$$\frac{d}{dt}W(z) = 0 \text{ if and only if } z = 0.$$

From this point of view, we can obtain that the largest invariant subset of the set E is the set $\{0\}$. From the discussion of the proof, we conclude the origin of the system of DDEs (3) is globally asymptotically stable (see, [1, 3, 14]).

The next new result of this paper is related to the integrability of the solutions and given by Theorem 3 below.

Theorem 3. The norm of solutions of the system of DDEs (3) are integrable in the sense of Lebesgue on \mathbb{R}^+ if the conditions (C1) and (C2) hold.

Proof. The main tool to prove Theorem 3 is the LKF $W = W(z(t))$ defined by (6). According to the conditions (C1) and (C2), we have the inequality (8). Since the LKF $W(z(t))$ is decreasing, integrating the inequality (8), we get

$$C_0 \int_{t_0}^t \|z(s)\| ds \leq W(\phi(t_0)) - W(z(t)) \leq W(\phi(t_0)) = W_0, \text{ (a positive constant).}$$

According to this result, we can conclude that

$$\int_{t_0}^{\infty} \|z(s)\| ds < \infty,$$

which proves Theorem 3.

The last new result of this paper is on the boundedness of the solutions and given by the following theorem, Theorem 4.

Theorem 4. The solutions of the system of DDEs (3) are bounded if the conditions (C1) and (C2) hold.

Proof. As for the proof of Theorem 4, again we consider the LKF $W = W(z(t))$ defined by (6). Indeed, from the conditions (C1), (C2) and (8), it follows that

$$\frac{d}{dt}W(z(t)) \leq 0. \tag{9}$$

By the integration of the inequality (9), we have

$$W(z(t)) \leq W(\phi(t_0)) = W_0. \tag{10}$$

To this end, the relations (6) and (10) readily imply the inequality:

$$\|z(t)\| \leq \|z(t)\| + \gamma \int_{t-\tau(t)}^t \|f(z(s))\| ds \leq W_0,$$

i.e., we find

$$\|z(t)\| \leq W_0 \text{ for all } t \geq t_0 \geq 0.$$

Thus, we have arrived at the solutions of the nonlinear system of DDEs (3) are bounded. Hence, the proof of Theorem 4 is complete.

4. Discussion and Conclusion

We now explain the contributions of Theorems 2-4 to the qualitative properties of the system of DDEs (3), the topic and the former literature on the subject.

1⁰) We consider the same system of DDEs of Tian and Xie [1, Theorem 1], the system of DDEs (3). Tian and Xie [1, Theorem 1] investigated global asymptotic stability of the origin of the system of DDEs (3). Here, we also study the global asymptotic stability of the origin of the system of DDEs (3) as well as integrability and boundedness of solutions of the system of DDEs (3). We obtain the global asymptotic stability result of Tian and Xie [1, Theorem 1] under very weaker and suitable conditions via a suitable LKF, which is different from that in [1]. Next, to the best of our information, the integrability and boundedness of the system of DDEs (3) were not investigated in the literature yet. This is the first paper that investigates the integrability and boundedness of the system of DDEs (3). By this way, we added two new results to those of Tian and Xie [1, Theorem 1]. These are contributions to the work of the Tian and Xie [1, Theorem 1], the qualitative theory of for neural networks with time-varying delays and the relevant literature.

2⁰) The proof of the result of Tian and Xie [1, Theorem 1] was completed by the LKF defined as the following:

$$V(z) = V_1(z) + V_2(z) + V_3(z) + V_4(z), \text{ where } z = z(t),$$

with

$$V_1(z) = z^T Pz + 2 \sum_{i=1}^n \left\{ \int_0^{z_i(t)} \lambda_i (f_i(s) - \gamma_i s) ds + \int_0^{z_i(t)} d_i (\sigma_i s - f_i(s)) ds \right\},$$

$$V_2(z) = \int_{t-\frac{h}{2}}^t \begin{bmatrix} z(s) \\ z(s-\frac{h}{2}) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ * & X_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z(s) \\ z(s-\frac{h}{2}) \end{bmatrix} ds,$$

$$V_3(z) = \int_{t-\tau(t)}^t \begin{bmatrix} z(s) \\ f(z(s)) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ * & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z(s) \\ f(z(s)) \end{bmatrix} ds$$

and

$$V_4(z) = \frac{h}{2} \int_{-\frac{h}{2}}^0 \int_{t+\theta}^t \dot{z}^T(s) Q_1 \dot{z}(s) ds d\theta + \frac{h}{2} \int_{-\frac{h}{2}}^0 \int_{t+\theta}^t \dot{z}^T(s) Q_2 \dot{z}(s) ds d\theta. \tag{11}$$

The time derivative of this LKF $V(z)$ along the trajectory of system of DDEs (3) was calculated in [8] as follows:

$$\dot{V}(z) = \dot{V}_1(z) + \dot{V}_2(z) + \dot{V}_3(z) + \dot{V}_4(z),$$

where

$$\dot{V}_1(z) = 2z^T P \dot{z} + 2[f^T(z) - z^T \Gamma] \Lambda \dot{z} + 2[z^T (\Sigma - f^T(z))] D \dot{z},$$

$$\dot{V}_2(z) = \begin{bmatrix} z(t) \\ z(t - \frac{h}{2}) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ * & X_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z(t) \\ z(t - \frac{h}{2}) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} z(t - \frac{h}{2}) \\ z(t - h) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ * & X_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z(t - \frac{h}{2}) \\ z(t - h) \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_3(z) \leq & \begin{bmatrix} z(t) \\ f(z(t)) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ * & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z(t) \\ f(z(t)) \end{bmatrix} \\ & - (1-u) \begin{bmatrix} z(t - \tau(t)) \\ f(z(t - \tau(t))) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ * & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z(t - \tau(t)) \\ f(z(t - \tau(t))) \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$\dot{V}_4(z) = \left(\frac{h}{2}\right)^2 \dot{z}^T(t) (Q_1 + Q_2) \dot{z}(t) - \frac{h}{2} \int_{t-\frac{h}{2}}^t \dot{z}^T(s) Q_1 \dot{z}(s) ds - \frac{h}{2} \int_{t-h}^{t-\frac{h}{2}} \dot{z}^T(s) Q_2 \dot{z}(s) ds.$$

In [1], via some calculations, it was obtained the following estimates, respectively:

$$\dot{V}(z(t)) \leq \zeta^T(t) E \zeta(t),$$

where

$$\zeta(t) = [z^T(t) \quad z^T(t - \tau(t)) \quad z^T(t - \frac{h}{2}) \quad z^T(t - h) \quad \dot{z}^T(t) \quad f^T(z(t)) \quad f^T(z(t - \tau(t))) \quad V_1^T \quad V_2^T],$$

$$E = \begin{bmatrix} \bar{E} & -(\frac{h}{2} - \tau(t))N & -\tau(t)L \\ * & -\frac{h}{2}(\frac{h}{2} - \tau(t))Q_1 & 0 \\ * & * & -\frac{h}{2}\tau(t)Q_1 \end{bmatrix}$$

and

$$\dot{V}(z(t)) \leq \xi^T(t) \Phi \xi(t),$$

where

$$\xi(t) = [z^T(t) \quad z^T(t - \tau(t)) \quad z^T(t - \frac{h}{2}) \quad z^T(t - h) \quad \dot{z}^T(t) \quad f^T(z(t)) \quad f^T(z(t - \tau(t))) \quad U_1^T \quad U_2^T],$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} \bar{\Phi} & -(h - \tau(t))M & -(\tau(t) - \frac{h}{2})S \\ * & -\frac{h}{2}(h - \tau(t))Q_2 & 0 \\ * & * & -\frac{h}{2}(\tau(t) - \frac{h}{2})Q_2 \end{bmatrix}.$$

Since $E < 0$ and $\Phi < 0$, it is proved that the origin of the system (3) is asymptotically stable.

In this paper, instead of the LKF (11), we define completely a different LKF:

$$W(z(t)) := \|z(t)\| + \gamma \int_{t-\tau(t)}^t \|f(z(s))\| ds. \tag{12}$$

The time derivative of this LKF along the trajectories of the system of DDEs (3) is given by

$$\frac{d}{dt}W(z(t)) = z'(t) \operatorname{sgn} z(t+0) + \gamma \|f(z(t))\| - \gamma \|f(z(t - \tau(t)))\|(1 - \tau'(t))$$

Next, depending on the conditions (C1) and (C2), some clear and simple calculations implies that

$$\frac{d}{dt}W(z(t)) = -\frac{1}{1-h_0} [C_0(1-h_0) - f_0(1-h_0)\|A\| - f_0\|B\|] \|z(t)\|.$$

When we compare the LKFs (11) and (12), it can be seen that in spite of our LKF (12) has two terms, however the LKF (11) of Tian and Xie [1, Theorem 1] has numerous terms and includes five matrices. Indeed, naturally, these data leads very stronger asymptotic stability conditions as seen in Theorem 1. Namely, the given LKFs have to be positive definite and their derivatives along the trajectories of the system of DDEs (3) have to be negative definite. According to the qualitative theory of the functional differential equations, suitable LKFs can lead very less conservative and suitable conditions. This fact can be seen when we compare the conditions of Tian and Xie [1, Theorem 1], which has been stated above, and those of our theorem, Theorem 2. Hence, it follows that the conditions of Theorem 2 are very convenient, less conservative and more optimal for applications. Here, we would not like to give more details for the sake of the brevity. These are the novelty, originality and contributions of this paper. These are also desirable facts for a proper scientific work on the qualitative theory of solutions of various kind of differential equations.

In this paper, a system of NNs with time-varying delays is considered. New sufficient conditions are obtained on the asymptotic stability of the origin and as well as on the integrability and boundedness of solutions of the considered system of NNs. Here, the technique of the proof is based on the LKF method. Hence, depending upon the definition of a new and suitable LKF, the result of Tian and Xie [1, Theorem 1] can be obtained under very less restrictive and more suitable conditions. In addition, to the best of knowledge, here, the results of the integrability and boundedness of solutions are new and they did not discussed for the considered system of NNs with time-varying delays in the literature by this time. As a result, the results of this paper have new contributions to theory of the system of NNs and the relevant literature.

References

[1] Tian, J., Xie, X. 2010. New asymptotic stability criteria for neural networks with time-varying delay. *Phys. Lett. A*, 374(2010), 938–943.
 [2] Gao, Z.M., He, Y., Wu, M. 2019. Improved stability criteria for the neural networks with time-varying delay via new augmented Lyapunov- Krasovskii functional. *Appl. Math. Comput.*, 349(2019), 258–269.

- [3] Hua, C., Long, C., Guan, X. 2006. New results on stability analysis of neural networks with time-varying delays. *Phys. Lett. A*, 352(2006), 335–340.
- [4] Kwon, O. M., Park, J. H. 2009. Improved delay-dependent stability criterion for neural networks with time-varying delays. *Phys. Lett. A*, 373(2009), 529–535.
- [5] Kwon, O. M., Park, M. J., Park, J. H., Lee, S. M., Cha, E.J. 2013. Improved approaches to stability criteria for neural networks with time-varying delays. *J. Franklin Inst.*, 350(2013), 2710–2735.
- [6] Sun, J., Liu, G. P., Chen, J., Rees, D. 2009. Improved stability criteria for neural networks with time-varying delay. *Phys. Lett. A*, 373(2019), 342–348.
- [7] Tian, J., Xu, D. 2009. New asymptotic stability criteria for neural networks with time-varying delays. *Chaos Solitons Fractals*, 41(2009), 1916–1922.
- [8] Tian, J., Zhong, S. 2011. Improved delay-dependent stability criterion for neural networks with time-varying delay. *Appl. Math. Comput.*, 217(2011), 10278–10288.
- [9] Tian, J., Liu, Y. 2015. Improved delay-dependent stability analysis for neural networks with interval time-varying delays. *Math. Probl. Eng.*, (2015), 10.
- [10] Burton, T. A. 2005. *Stability and periodic solutions of ordinary and functional differential equations*, Corrected version of the 1985 original, Dover Publications, Inc., Mineola, NY.
- [11] Yoshizawa, T. 1966. *Stability theory by Liapunov's second method*, Publications of the Mathematical Society of Japan, No. 9, The Mathematical Society of Japan, Tokyo.
- [12] Sinha, A. S. C. 1973. On stability of solutions of some third and fourth order delay-differential equation. *Information and Control*, 23(1973), 165–172.
- [13] Smith, H. 2011. *An introduction to delay differential equations with applications to the life sciences*, Texts in Applied Mathematics, 57, Springer, New York.
- [14] Graef, J. R., Tunç, C. 2015. Global asymptotic stability and boundedness of certain multi-delay functional differential equations of third order. *Math. Methods Appl. Sci.*, 38(2015), 3747–3752.

Effects of Bendiocarb Insecticide on Lipid Peroxidation, Antioxidant Enzymes and DNA Damage in Human Leukocytes

İsrafil DOĞANYİĞİT¹, Fatma ÖZTÜRK KÜP^{2*}

¹Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Kayseri, TURKEY

²Erciyes University, Faculty of Science, Department of Biology, Kayseri, TURKEY

(Alınış / Received: 31.08.2020, Kabul / Accepted: 31.08.2021, Online Yayınlanma / Published Online: 31.08.2021)

Keywords

Bendiocarb,
Genotoxicity,
Comet Assay,
Pesticides,
Antioxidant Enzymes

Abstract: In this study, we aimed to determine the toxic effect of increasing doses of Bendiocarb, an insecticide from the carbamate group, on human blood cells *in vitro* via by Comet test, determination of total antioxidant capacity, antioxidant enzyme activity and malondialdehyde (MDA) level. Leukocyte isolation was performed from blood samples taken from six healthy male individuals who did not smoke and use alcohol and were not exposed to any chemicals in the working environment, and then their leukocytes exposed to increasing doses of Bendiocarb (20, 40, 80, 160 µg / mL). Comet test, iron reduction antioxidant capacity (FRAP), 2-2'azinobis 3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid (ABTS/TEAC) analysis with superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), glutathione peroxidase (GPx) and MDA were evaluated. At the end of the study, it was determined that antioxidant enzyme levels decreased significantly due to dose increase, whereas MDA levels increased significantly in all doses (p<0.05). According to FRAP and TEAC methods, the antioxidant capacity of blood cells decreased significantly in increasing doses of Bendiocarb compared to the control group (p<0.05). In the Comet test, DNA tail percentage, length and moment were increased significantly in increasing doses of Bendiocarb and DNA damage was detected (p<0.05). This study is a preliminary study on this subject, and it has been shown in our study that the uncontrolled use of Bendiocarb pesticide in nature will have harmful effects on the environment and living things. We believe that the research will contribute to the literature and shed light on future comprehensive studies.

Bendiokarb İnsektisitinin İnsan Lökositlerinde Lipid Peroksidasyonu, Antioksidan Enzimler ve DNA Hasarı Üzerindeki Etkileri

Anahtar Kelimeler

Bendiocarb,
Genotoksisite,
Komet Testi,
Pestisit,
Antioksidan Enzimler

Özet: Bu çalışma da karbamat grubundan bir insektisit olan Bendiokarb'ın artan dozlarının insan kan hücreleri üzerine *in vitro* koşullarda toksik etkisini komet testi, total antioksidan kapasite tayini, antioksidan enzim aktivitesi ve malondialdehit (MDA) seviyesini değerlendirmek suretiyle belirlemeyi amaçladık. Sigara ve alkol kullanmayan, çalıştığı ortamda herhangi bir kimyasal maddeye maruz kalmayan sağlıklı altı erkek bireyden heparinli tüplere alınan kan örneklerinden lökosit izolasyonu yapılmış ve lökositleri artan dozlarda Bendiokarb'a (20, 40, 80, 160 µg/mL) maruz bırakılmıştır. Komet testi, demir indirgeme antioksidan kapasitesi (FRAP), 2-2'azinobis 3-ethylbenzotiazolin-6-sülfonik asit (ABTS/TEAC) analizleri ile antioksidan enzimler olan süperoksit dismutaz (SOD), katalaz (CAT), glutatyon peroksidaz (GPx) ve lipid peroksidasyon göstergesi olan MDA düzeyleri üzerine etkileri değerlendirilmiştir. Çalışma sonunda antioksidan enzim düzeylerinin doz artışına bağlı olarak anlamlı azaldığı, tüm dozlarda ise MDA düzeylerinin anlamlı olarak arttığı belirlenmiştir (p<0.05). FRAP ve TEAC yöntemlerine göre, kan hücrelerinin antioksidan kapasitesi, kontrol grubuna göre artan Bendiokarb dozlarında anlamlı olarak azalmıştır (p<0.05). Comet testinde artan Bendiokarb dozlarında DNA kuyruk yüzdesi, uzunluğu ve momenti anlamlı olarak artmış ve DNA hasarı tespit edilmiştir (p <0.05).

Bu çalışma bu konuda yapılmış bir ön çalışma niteliği taşımakta olup, çalışmamızda Bendiokarb pestisitinin doğada kontrolsüz kullanımının çevreye ve canlılara zararlı etkileri olacağı gösterilmiştir. Araştırmanın literatüre katkı sağlayacağı gibi bundan sonraki kapsamlı çalışmalara da ışık tutacağı düşünülmektedir.

*Corresponding Author, email: fozturk@erciyes.edu.tr

1. Introduction

Pesticides, which are widely used in agriculture, especially in the world, the residues left in the environment and foods become a serious public health problem. If the residual levels of pesticides in food exceed the daily acceptable limits, this can cause acute and chronic poisoning, as well as teratogenic effects, as well as very serious health problems such as mutagenic and carcinogenic effects [1].

Pesticides are chemicals used to reduce the destructive effects of living forms such as insects, rodents, weeds, fungi that reduce or damage nutritional values during production, storage and consumption of food sources living on or around humans, animals and plants, and because of their toxic effects on all organisms. They cause serious harmful effects in the ecosystem [2, 3].

Bendiocarb carbamate group is an insecticide [4]. Bendiocarb, whose commercial name is Ficam W and synonyms such as Garvo[®], Seedox[®], Turcam[®], Multamat[®], Niomil[®], Tattoo[®], Ent-27695, OMS 1394, NC 6897, was first prepared in 1967 at Chesterford Park Research Station, Fisons Agrochemical Division (UK) (5). It is in solid white crystalline form and its chemical formula is C₁₁H₁₃NO₄ and its molecular weight is 223.25 kDa [6].

Carbamate insecticides enter the bodies of both insects and mammals through contact, respiration and stomach. The LD₅₀ dose of bendiocarb has been reported as 40 mg/kg orally in rats [7]. Symptoms of bendiocarb poisoning are weakness, blurred vision, headache, drop in blood pressure, irregular heartbeat, loss of reflexes and dizziness [4,8]. In many studies, it is revealed that Bendiocarb increases lymph-related tumors such as lymphoid and lymphosarcoma [9]. Although it is widely used worldwide, there are a limited number of studies on Bendiocarb use. In the literature review, studies related to DNA damage and oxidative stress caused by Bendiocarb in blood tissue are also extremely limited.

In this study, we aimed to determine the toxic effect of increasing doses of Bendiocarb on human blood cells *in vitro* conditions by evaluating comet test, total antioxidant capacity determination, antioxidant enzyme activity (SOD, CAT and GPx) and malondialdehyde (MDA) level.

2. Material and Methods

2.1. Chemicals

In the study, Bendiocarb was used in increasing doses (20, 40, 80, 160 µg/mL). Bendiocarb, chemicals used in biochemical analysis and comet test were obtained from Sigma-Aldrich (Germany).

2.2. Leukocyte isolation and treatment of Bendiocarb

Venous blood samples of approximately 20 ml were obtained in heparinized dry tubes from each of six male volunteers (range 25–30 years). All volunteers were healthy, had no drugs, no smoking, and none were exposed to any chemicals. Lymphocytes were isolated using the Biocoll (Source BioScience, Nottingham, U.K.) separating solution [10].

The samples were divided into two groups as control group (n = 6) and application group (n = 6). The application group is also divided into four groups and exposed to Bendiocarb for 1 hour at the determined doses. These;

Group 1: 20 µg / mL Bendiocarb applied group (n = 6),

Group 2: 40 µg / mL Bendiocarb applied group (n = 6),

Group 3: 80 µg / mL Bendiocarb applied group (n = 6),

Group 4: 160 µg / mL Bendiocarb applied group (n = 6),

2.3. Biochemical Analysis

MDA content, antioxidant enzyme activity and total antioxidant capacity analysis were determined by measuring the absorbance of the samples in a spectrophotometer. Protein concentration was determined according the method described by Lowry [11] using bovine serum albumin (BSA) as a standard.

Malondialdehyde (MDA) is one of the last products of polyunsaturated fatty acids peroxidation in the cells and is a very toxic molecule. A rise in free radicals causes overproduction of MDA. Malondialdehyde level is mostly known as a marker of oxidative stress. For the determination of MDA levels cells were incubated with thiobarbituric acid (TBA) at 95°C (pH 3.4). MDA reacts with TBA to form a colored complex. MDA levels were determined as a result of the measurements made in the spectrophotometer at a wavelength of 532 nm [12].

The activity of SOD was determination assaying the autooxidation and elucidation of pyrogallol by the method of Marklund and Marklund [13]. This analysis was observed at 440 nm. One unit of SOD activity was calculated as the amount of protein that caused 50% pyrogallol autooxidation prevention.

CAT activity was measured according to the method described by Aebi [14] via assaying the hydrolysis of H_2O_2 and the resulting decrease in absorbance at 240 nm over a 3 min period at 25°C. For CAT activity samples were diluted with TritonX-100. Changes in absorbance per unit time using the constant number, ϵ_{240} : 0.0394 mM / cm, were taken as the measurement of catalase activity.

GPx activity was determined with H_2O_2 as a substrate. Analysis mixtures included reduced glutathione, glutathione reductase, NADPH and Tris-HCl. GPx activity was measured as the alter in absorbance at 340 nm [15]. GPx activity (ϵ_{340} : 6220 M/cm) was calculated as the amount of NADPH spent by 1 mg of protein in 1 minute and the specific activity of its enzyme was determined.

The FRAP analysis was done by measuring changes in absorbance at 593 nm due to the production of FeII-triprididyltriazine compound from the oxidized form of FeIII. The FRAP reaction was prepared by stir 300 mmol/L acetate buffer with 10 mmol/L 2,4,6 tripyridyl-s-triazine in 40 mmol/L HCl and with 20 mmol/L ferric chloride [16].

The TEAC analysis is based on the prevention of the absorbance of the ABTS by tested antioxidant [17]. Solution of ABTS was diluted with phosphate buffer saline (PBS) to an absorbance of 0.70 (\pm 0.02) at 734 nm. ABTS was mixed with biological samples and kept for 6 minutes. Then at 734 nm, the decrease in absorbance was measured.

2.4. Determination of DNA Damage by Comet Method

10 μ L of blood tissue that was exposed to Bendiocarb for 1 hour in increasing doses in the tubes was taken and centrifuged by adding RPMI. Supernatant was thrown and agarose was added to the pellet and smeared on the slide. Slides are covered with coverslips and incubated at 4 C for 1 hour. Then, it was kept in electrophoresis diluted from stock for 1 hour [18]. Preparations were placed in an electrophoresis tank and carried out at 200 volts. The resulting preparations were stained after cleaning with pure water and examined under a fluorescent microscope. Data were analyzed using BS 200 ProP with software image analysis. As a result of imaging, tail DNA percentage, tail length and tail moment were determined for 50 comet cells and the differences between the groups were calculated statistically.

2.6. Statistical analysis

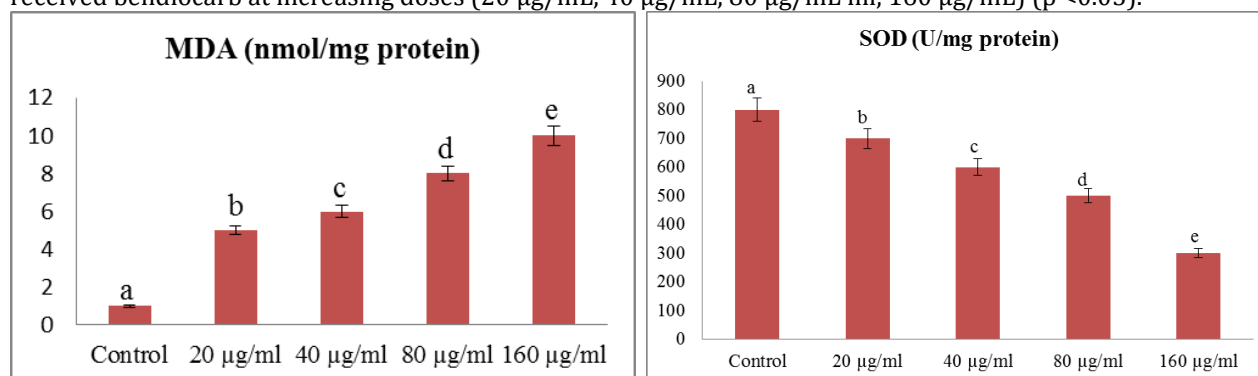
All of the statistical analyzes were done with one-way variance analysis (ANOVA) and Tukey test in Windows SPSS 11.5 computer program. $P < 0.05$ value was considered statistically significant.

3. Results

3.1. Biochemical Results

MDA levels in blood cells were measured and results are given as nmol/Hb and nmol/protein for blood cells. The results obtained in determining the level of MDA in erythrocytes are shown in Figure 1. When the groups with increased doses of Bendiocarb and the control group were compared, it was observed that there was a statistically significant increase in MDA level due to dose increase ($p < 0.05$).

When compared to the control group, there was a statistically significant decrease in SOD enzyme activity due to dose increase in the groups that received bendiocarb at increasing doses (20 μ g/mL, 40 μ g/mL, 80 μ g/mL, 160 μ g/mL) ($p < 0.05$). (Figure 1). Compared to the control group, a statistically significant decrease in CAT enzyme activity was found in groups that received bendiocarb at increasing doses (20 μ g/mL, 40 μ g/mL, 80 μ g/mL, 160 μ g/mL) ($p < 0.05$). (Figure 1). GPx enzyme activity results in blood tissue erythrocytes are shown in Figure 1. Compared to the control group, a statistically significant decrease in GPx enzyme activity was found in groups that received bendiocarb at increasing doses (20 μ g/mL, 40 μ g/mL, 80 μ g/mL ml, 160 μ g/mL) ($p < 0.05$).



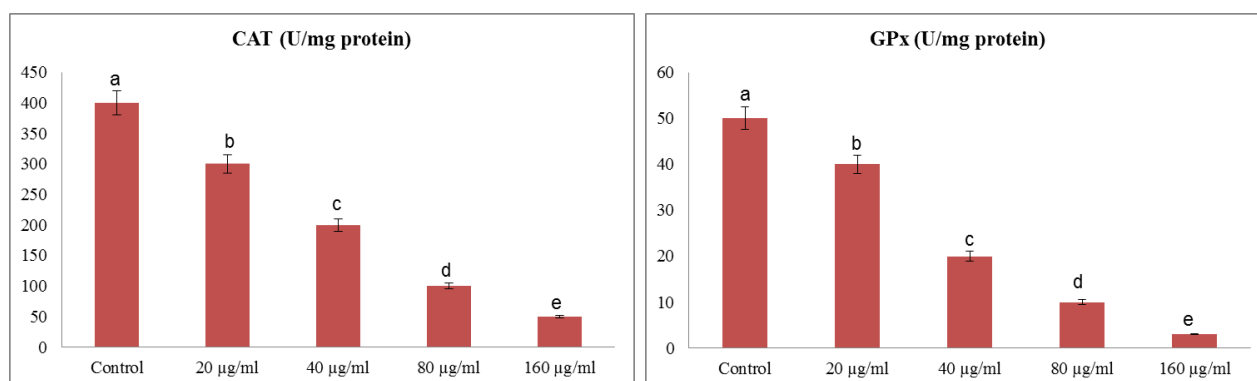


Figure 1. Biochemical analyses results (MDA, SOD, CAT, and GPx) ($P < 0.05$).

FRAP and TEAC values of the control and Bendiocarb application groups were calculated to determine antioxidant capacity changes in blood tissue and the results are shown in Figure 2. According to the FRAP and TEAC methods, the antioxidant capacity of blood cells decreased statistically significantly in increasing doses of Bendiocarb compared to the control group ($p < 0.05$) (Figure 2).

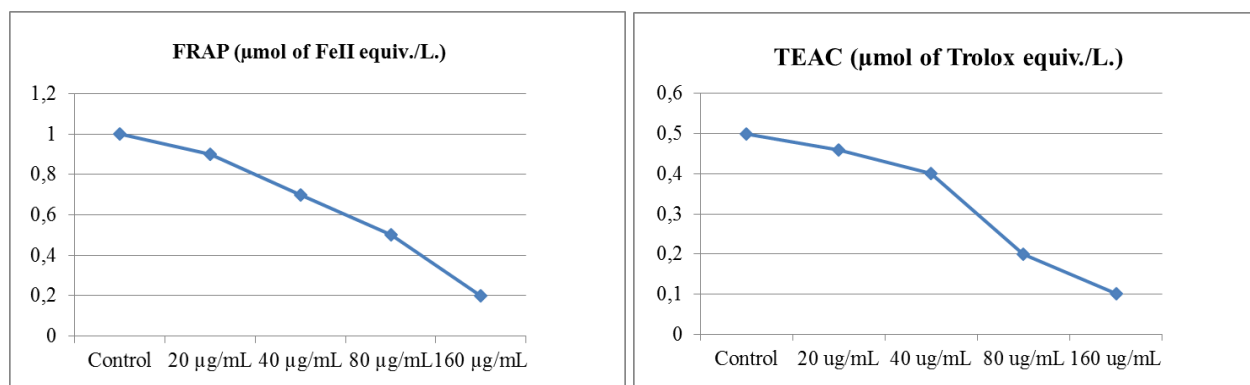


Figure 2. FRAP and TEAC results of human leukocyte cells exposed to increasing doses of bendiocarb.

3.2. Comet Assay Results

DNA tail percentage, tail length and tail moment values of the control group and application groups that we use to determine DNA damage in blood tissue are given in Table 1. When the control group and increasing doses of Bendiocarb application groups were compared in the Comet test, DNA tail percentage, tail length and tail moment were significantly increased in the increasing doses of Bendiocarb and DNA damage was detected (Figure 3).

Table 1. Average values of % DNA, tail length and tail moment of DNA damage (\pm SD) of human leukocyte cells

Doses	Tail% DNA \pm SD	Tail Length \pm SD	Tail Moment \pm SD
Control	45.09 \pm 1.68 ^a	12.18 \pm 3.44 ^a	5.49 \pm 0.05 ^a
20 µg/mL	48.45 \pm 7.35 ^a	14.25 \pm 8.12 ^a	6.94 \pm 0.59 ^a
40 µg/mL	74.12 \pm 5.22 ^b	35.62 \pm 3.12 ^b	26.40 \pm 0.16 ^b
80 µg/mL	92.56 \pm 15.45 ^c	52.12 \pm 5.45 ^c	48.24 \pm 0.84 ^c
160 µg/mL	109.20 \pm 22.15 ^d	75.22 \pm 3.42 ^d	82.14 \pm 0.75 ^d

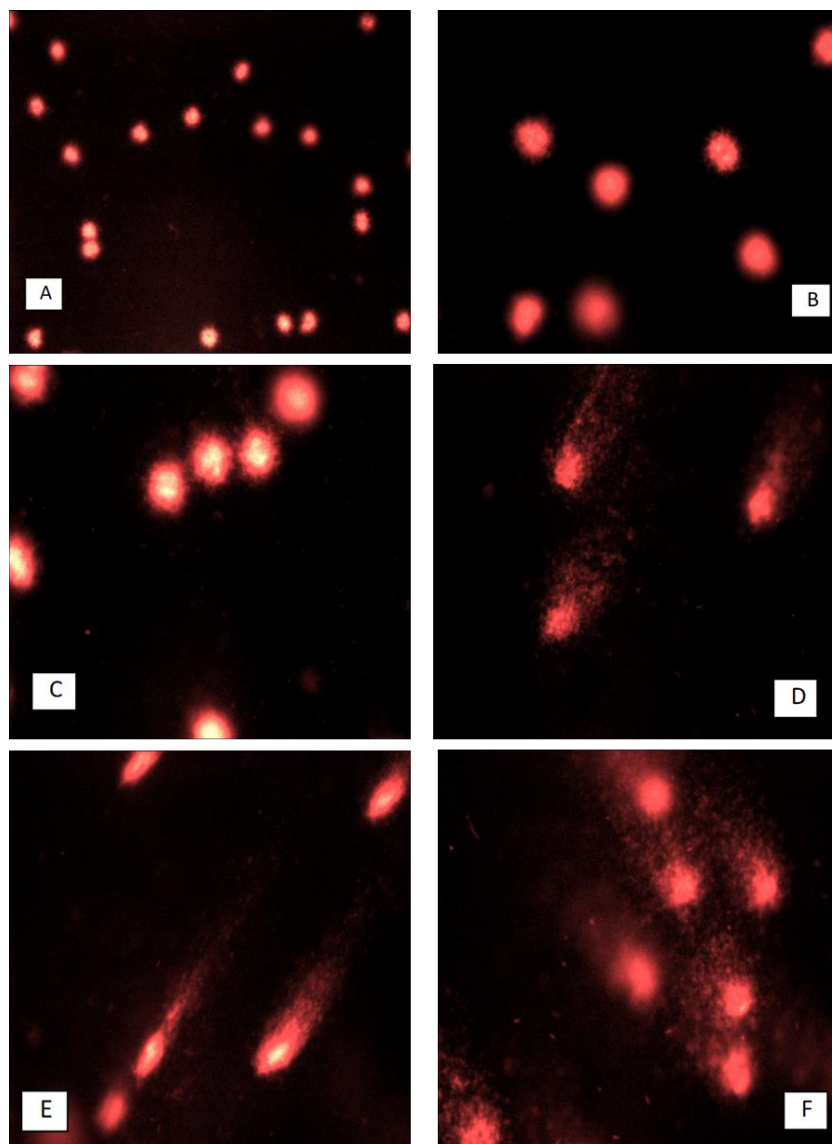


Figure 3. Comet analysis of the effect of increasing doses of Bendiocarb on the DNA of human leukocyte cells. (A-B) control, (C) 20 µg/mL, (D) 40 µg/mL, (E) 80 µg/mL, (F) 160 µg/mL.

As a result of incubation of bendiocarb with leukocytes, DNA damage at a concentration of 20 µg/mL was determined to be low and close to the control group ($p < 0.05$). DNA damage at 40, 80 and 160 µg/mL concentrations was statistically significant ($p < 0.05$) and higher than the control group. In addition, the highest percentage of Tail DNA was determined as 100% at a concentration of 160 µg/mL.

4. Discussion and Conclusion

Pesticides are frequently used in agriculture and applied to the environment to control pests. Since they are permanent in the environment, their toxicity must be known and risk assessments must be made.

Carbamate insecticides are carbamic acid derivatives used in agriculture in previous years due to their wide biological activity and low mammalian toxicity. Bendiocarb belongs to the class of carbamate insecticides and is effective against a wide range of agricultural pests. Bendiocarb is toxic for a lot of organisms, fish, birds and bees [19]. Determining pesticides left on air, soil and surface are essential to provide the grade and security of the products and reduce the risk to the health of people or other living things [20].

Agrochemical manufacturers, practitioners and people who consume pesticide agricultural products in the last link of the chain are exposed to pesticides at different rates, either acute or chronic. Pesticides entering the organism in various ways affect the nervous system, endocrine system, immune system, liver, heart and muscle tissues negatively. One of the most important systems among these negatively affected systems is the defense system, that is, the antioxidant system. There are various defense mechanisms in the body to prevent the formation

of ROS and the damage caused by them. These classes are known as 'antioxidant defense systems' and 'antioxidants'; They neutralize free radicals and help repair damage caused by free radicals and minimize the body's exposure to free radicals or restore the body's renewal [21].

In our study, changes in CAT, SOD and GPx activity, which are antioxidant defense enzymes, were investigated in human leukocytes exposed to increasing concentrations of Bendiocarb, the carbamate group insecticide. In line with the results obtained from the study, it was determined that the activity of CAT, SOD and GPx enzymes decreased with increasing concentration of bendiocarb.

In addition to antioxidant enzyme activity, FRAP and TEAC values of the control and Bendiocarb application groups were calculated to determine antioxidant capacity changes in blood tissue. According to the results obtained, the antioxidant capacity of blood cells decreased significantly with increasing doses of Bendiocarb compared to the control group ($P < 0.05$).

In addition, in our study, MDA levels in blood cells were measured and the results were given as nmol/protein for blood cells. The results obtained in determining the MDA level of leukocytes from blood tissue elements are shown in Figure 1. When increasing doses of Bendiocarb and control group were compared, it was observed that there was a statistically significant increase in MDA level due to dose increase ($P < 0.05$).

Sobekov et al. [22] investigated SOD, CAT, GSHPx, glutathione reductase (GR), glutathione-S-transferase (GST) and thiobarbituric acid (TBARs) activities in rabbit liver and kidneys after exposure to bendiocarb. They found that SOD, CAT and GR activity in liver tissue was not affected by bendiocarb, SOD activity in the kidney increased significantly, new MnSOD isoenzymes were formed and CAT and GSHPx-H₂O₂ activities decreased significantly in experimental groups. In addition, the TBARs content in the kidney was not affected by bendiocarb. They showed that the response of organs to bendiocarb is different and may depend on specific organ damage and protective abilities. Changes in the anti-cocci defense system have shown that the toxic effect of bendiocarb may be related to the production of ROS in addition to acetylcholine esterase inhibition.

Sakr and Al-Amoudi [23] studied histopathological changes in the kidney tissues of mammals exposed to deltamethrin to investigate the protective effect of basil against deltamethrin. As a result of these examinations, they observed a significant increase in the concentration of malondialdehyde (MDA) in kidney tissues of mammals exposed to deltamethrin, a decrease in superoxide dismutase (SOD) and catalase activity.

Although there are restrictions on the use of pesticides, it should be remembered that they can harm human health due to their chemical structure, biological activity and misuse. For this reason, most studies have been investigating their mutagenic effects in recent years, and for this purpose studies have been conducted with *Bacillus subtilis* and *Salmonella typhimurium* test strains [24], and fewer studies on their direct effects on DNA. DNA damage determination studies have been investigated in recent years in vivo and in vitro and especially in human lymphocyte cells by the Comet technique [25-27].

Comet technique is preferred in the evaluation of genotoxic effect because it is sensitive, economical, easy and in a short time, and it is possible to detect DNA damage in a single cell. The genotoxic effects of chemicals in the lymphocytes of human and experimental animals can be monitored with this method [28].

In our study, Comet test was used to investigate the genotoxic effects of bendiocarb on leukocytes, and it was determined that increased DNA breaks occurred at increasing levels depending on the dose. As a result of incubation of bendiocarb with leukocytes, DNA damage at a concentration of 20 µg/mL was determined low and close to the control group. DNA damage at 40, 80 and 160 µg/mL concentrations was statistically significant ($P < 0.05$) and higher than the control group. Also, the highest tail DNA at 160 mg/mL concentration was determined to be 100 %.

DNA damage was investigated by adding 3, 10, 30 and 100 µg/mL to lymphocytes and MDCK (Mine-Darby Canine Kidney) cells of aminocarb, carbaryl, methiocarb, promecarb and propoxur, in a similar project study with our study. It has been observed that pesticides at a concentration of 100 µg / mL are highly toxic in MDCK cells, in particular, carbaryl and methiocarb cause the death of almost all cells at this concentration. DNA damage in lymphocyte and MDCK cells of pesticides at concentrations of 10 and 30 µg/mL has been investigated, and it has been observed that methiocarb and carbaryl cause DNA damage in the 4th degree at a concentration of 30 µg/mL for 16 hours. Carbamate pesticides caused significant DNA damage to lymphocytes, while causing lower damage to MDCK cells (30 µg / mL concentration and 1st degree damage to carbaryl, methiocarb and promecarb in 48 hours). Low genotoxicity in MDCK cells suggests that DNA damage repair mechanisms may be effective as a result of active cleavage [29].

In another study, human peripheral lymphocytes of 10, 50, 100 and 200 µg/mL dimethoate, methylparathion, propoxur, pirimicarb were applied to human peripheral lymphocytes and DNA damage was investigated in vitro by Comet technique. As in our study, a dose-dependent examination was made and DNA damage was found to be high. [30].

Swiss albino mice were administered orally 0.28 and 8.96 mg/kg chlorpyrifos ethyl, 12.25 and 392.00 mg/kg acephate. DNA damage was examined with Comet technique at 24, 48, 72 and 96 hours after the application. It was reported that a significant increase in Comet tail length was observed at 24 and 48 hours after the application and that the DNA damage was dose dependent. It has been reported that DNA damage gradually decreases 48 hours after application and Comet tail length decreases to the levels of the control group 96 hours later [31].

In another study, genotoxic effects, oxidative stress parameters and AChE activities were investigated in the production of organophosphorus pesticides for 21 workers and 21 control groups working for an average of 97 months. In erythrocytes, lipid peroxidation levels, catalase, superoxide dismutase and glutathione peroxidase activities were measured as oxidative stress biomarkers, and AChE activity as toxicity biomarkers. To determine DNA damage, Comet tail length was measured in leukocytes. As a result of chronic exposure to organophosphorus pesticides, catalase, superoxide dismutase and glutathione levels were observed, while no statistically significant difference was observed in lipid peroxidation levels and AChE activity [32].

It has been determined that Bendiocarb insecticide has a toxic effect in all doses applied on blood tissue. Bendiocarb increased MDA levels in blood tissues at all doses administered, and decreased total antioxidant capacity and SOD, CAT, GPX levels statistically significantly in this study.

Our study demonstrates that Bendiocarb causes damage on DNA due to the increase in dose in all doses applied. We think Bendiocarb has all these negative effects by causing oxidative stress. Based on these data, uncontrolled use of Bendiocarb pesticide in nature has been shown to have harmful effects on the environment and living things. However this study is a preliminary study on this subject, we believe that it will contribute to the existing literature and shed light on further studies.

Acknowledgment

We would like to thank Prof. Dr. Dilek Pandır, a faculty member of the biology department of the science and literature faculty of Bozok University, for her help in our study.

References

- [1] Çiftçiöğlü, G., Issa, G. 2006. Çevre ve Gıdalardaki Pestisit Kalıntılarının Halk Sağlığına Etkisi. İstanbul Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi, 32(3), 91-96.
- [2] Alp, H., Aytakin, İ., Atakişi, O. 2011. Ratlardaki Akut Malathion Toksisitesinin Neden Olduğu Oksidatif Stres Üzerine Kafeik asit Fenil Ester ve Elarjik Asitin Etkileri. Atatürk Üniversitesi, Veteriner Bilimleri Dergisi, 6, 117-24.
- [3] Öztürk, D. 2009. Cyprinus carpio'da Malathion Etkisinde Lipit Peroksidasyonu ve Serum Steroid Hormon Düzeylerindeki Değişimler. Çukurova Üniversitesi, Adana, Yüksek Lisans Tezi, 64s, Adana.
- [4] Petrovova, E., Purzyc, H., Mazensky, D. Torma, N., Sopoliga, I., Sedmera, D. 2015. Morphometric Alterations, Steatosis, Fibrosis and Active Caspase-3 Detection in Carbamate Bendiocarb Treated Rabbit Liver. Environmental Toxicology, 30(2), 212-22.
- [5] Bonsall, J.L., Goose, J. 1986. The safety evaluation of Bendiocarb, a residual insecticide for vector control, Toxicology Letter, 33(1-3), 45-49.
- [6] WHO-Pesticide residues in food-Evaluations, 1982, Report sponsored jointly by FAO and WHO, p: 57-75.
- [7] Pazarbaşı, A., Kasap, M., Kasap, H. 1999. Çukurova'da Sivrisinek Mücadelesinde Kullanılan Bendiocarb'ın Memelilere (Sıçanlara) Dermal Etkisi. Turkish Journal of Zoology, 23, 303-308.
- [8] Almasiova, V., Holovska, K., Tarabova, L., Cigankova, V., Lukacinova, V., Nistiari, F. 2012. Structural and ultrastructural study of the rabbit testes exposed to carbamate insecticide. Journal of Environmental Science Health, 47, 1319-1328.
- [9] Dorko, F., Danko, J., Flesarova, S., Boros, E., Sobekova, A. 2011. Effect of pesticide Bendiocarbamate on distribution of acetylcholine- and butyrylcholine-positive nerves in rabbit's thymus. European Journal of Histochemistry, 55, 206-209.

- [10] Yilmaz, S., Unal, F., Yuzbasioglu, D., Celik, M. 2014. DNA damage in human lymphocytes exposed to four food additives in vitro. *Toxicology and Industrial Health*, 30, 926-37.
- [11] Lowry, OH., Rosebrough, N. J., Farr, AL, 1951. Protein measurement with the Folin phenol reagent. *Journal of Biological Chemistry*, 19, 265.
- [12] Ohkawa, H., Ohishi, N., Yagi, K. 1979. Assay for lipid peroxides in animal tissues by thiobarbituric acid reaction, *Analytical Biochemistry*, 95,351 - 358.
- [13] Marklund, S., Marklund, G. 1974. Involvement of the superoxide anion radical in the autoxidation of pyrogallol and a convenient assay for superoxide dismutase. *European Journal of Biochemistry*, 47,469-474.
- [14] Aebi, H. 1984. Catalase in vitro. *Methods Enzymology*, 105,121-126.
- [15] Paglia, DE., Valentine, WN. 1987. Studies on the quantative and qualitative characterization of glutathione peroxidase. *Journal of Laboratory Medicine*, 70,158-165.
- [16] Benzie, I.F., Strain, J.J. 1996. The Ferric Reducing Ability of Plasma (FRAP) As a Measure of Antioxidant Power Q the FRAP Assay, *Analytical Biochemistry*, 239, 70–76.
- [17] Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., Rice-Evans, C. 1999. Antioxidant Activity Applying An Improved ABTS Radical Cation Decolorization Assay, *Free Radical Biology and Medicine*, 26, 1231–1237.
- [18] Özkan, D., Yüzbaşıoğlu, D., Ünal, F., Yilmaz, S., Aksoy, H. 2009. Evaluation of the cytogenetic damage induced by the organophosphorous insecticide acephate. *Cytotechnology*, 59, 73-80.
- [19] Dikshith, T.S.S, 2011. *Handbook of Chemicals and Safety*, CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- [20] Ghorabaa, Z., Aibaghia, B., Soleymanpoura, A., 2018. Ultrasound-assisted dispersive liquid-liquid microextraction followed by ion mobility spectrometry for the simultaneous determination of Bendiocarb and azinphos-ethyl in water, soil, food and beverage samples. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 165, 459–466.
- [21] Ames, B.N., Shigenaga, M.K., Hagen, T.M., 1993. Oxidants, Antioxidants and the Degenerative Diseases of Aging, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 90, 7915-7922.
- [22] Sobekova, A., Holovska, K., Lenartova, V. 2009. The another toxic effect of carbamate insecticides. *Acta Biologica Hungarica*, 60(1), 45–54.
- [23] Sakr, S.A., Al-Amoudi, W.M., 2012. Effect of leave extract of *Ocimum basilicum* on deltamethrin induced nephrotoxicity and oxidative stress in albino rats. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 2(5), 22-27.
- [24] Shiau, S.Y., Huff, R.A., Wells, B.C, 1980. Mutagenicity and DNA-damaging activity for several pesticides tested with *Bacillus subtilis* mutants. *Mutation Research*, 71,169-179.
- [25] Piperakis, S.M., Kontogianni, K., Siffel, C. 2006. Measuring the effects of pesticides on occupationally exposed humans with the comet assay. *Environmental Toxicology*, 21, 355-359.
- [26] Kisby, GE., Muniz, JF., Scherer, J., Lasarev, MR., Koshy, M., Kow, YW., McCauley, L., 2009. Oxidative stress and DNA damage in agricultural workers. *Journal of Agromedicine*, 14(2), 206-214.
- [27] Castillo-Cadena, J., Tenorio-Vieyra, LE., Quintana-Carabia, AI., Garcia-Fabila, MM., Ramirez-San Juan, E., Madrigal-Bujaidar, E. 2006. Determination of DNA damage in floriculturists exposed to mixtures of pesticides. *Journal of Biomedicine and Biotechnology*, 1-12.
- [28] Dikilitaş, M., Koçyiğit, A, 2010. Canlılarda “Tek Hücre Jel Elektroferez” Yöntemi İle DNA Hasar Analizi, Comet Analiz Yöntemi, *Harran Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 14(2), 77- 89.
- [29] Yurdun, T., Turan, K., 2002. Pestisitlerin genotoksik etkilerinin araştırılması. M.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyon Başkanlığı. Proje No: SAĞ-061/131102.
- [30] Ündeğer Ü, Başaran N. 2005. Effects of pesticides on human peripheral lymphocytes in vitro: induction of DNA damage. *Archives of Toxicology*, 79,169-176.
- [31] Rahman, MF., Mahboob, M., Danadevi, K., Banu, BS., Grover, P., 2002. Assessment of genotoxic effects of chlorpyrifos and acephate by the comet assay in mice leucocytes. *Mutation Research*, 516,139-147.
- [32] Shadnia, A., Azizi, E., Hosseini, R., Khoei, S., Fouladdel, S., Pajoumand, A., Jalali, N., Abdollahi, M., 2005. Evaluation of oxidative stress and genotoxicity in organophosphorus insecticide formulations. *Human & Experimental Toxicology*, 24(9), 439-445.

Numerical Investigation of Wind Loads on Building with Various Turbulence Models

Hacımurat DEMİR*¹ 

*¹ Aksaray University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, AKSARAY

(Alınış / Received: 07.06.2021, Kabul / Accepted: 23.07.2021, Online Yayınlanma / Published Online: 31.08.2021)

Keywords

Building aerodynamics,
Wind load,
Turbulence model,
CFD

Abstract: In this study, wind load on a building having irregular geometry was investigated numerically. In order to evaluate flow structures around the building in terms of the distributions of velocity, pressure and turbulent kinetic energy, three types of RANS models including Spalart-Allmaras one-equation, transition SST four-equation and k- ω SST two-equation models were utilized for simulation. It was evidently seen from the distributions of pressure coefficient (C_p) around surfaces of the building that positive C_p value was revealed on the west-facing of the building while north-, south-, and east-facing of the building had negative C_p for all simulation cases. By the virtue of the vortex formation in the northeast of the building, after the position of $x/L=0.7$ there was an abrupt and steep increment in C_p while on the way to the east of the building. Furthermore, it was seen from northern facing of building that suction effect was more sensitive for transition SST turbulence model compared with the others. Besides, the local highest C_p value (west-facing) was 1.364 for Spalart-Allmaras, and the maximum local suction (north-facing) was -0.892 for transition SST. Flow recirculation zone in the east-facing part of the building was the most extended for Spalart-Allmaras compared to transition SST and k- ω SST models. Looking at the positions of the spiral nodes and saddle points, there was a distinguishable difference when Spalart-Allmaras model was compared to the other models (transition SST and k- ω SST) with regard to the size of the vortex formed.

Bina Üzerindeki Rüzgar Yüklerinin Farklı Türbülans Modelleriyle Sayısal Olarak İncelenmesi

Anahtar Kelimeler

Bina aerodinamiği,
Rüzgar yükü,
Türbülans modeli,
CFD

Öz: Bu çalışmada, karmaşık geometriye sahip bir bina üzerindeki rüzgar yükü sayısal olarak incelenmiştir. Bina çevresindeki akış yapılarını hız, basınç ve türbülanslı kinetik enerji dağılımları açısından değerlendirmek için tek denklemlilik Spalart-Allmaras, dört denklemlilik transition SST ve iki denklemlilik k- ω SST olmak üzere üç tip RANS modeli simülasyon için kullanılmıştır. Tüm simülasyon durumları için bina yüzeyleri etrafındaki basınç katsayısı (C_p) dağılımlarından binanın batıya bakan cephelerinde pozitif; kuzey, güney ve doğu cephelerinde ise negatif C_p değeri olduğu açıkça görülmüştür. Binanın kuzeydoğusundaki girdap oluşumu neticesinde $x/L=0.7$ konumundan sonra binanın doğusuna doğru ilerlerken C_p değerinde ani ve dik bir artış olmuştur. Ayrıca, binanın kuzey cephesinde emme etkisinin transition SST türbülans modelinde diğerlerine göre daha duyarlı olduğu görülmüştür. Ek olarak, Spalart-Allmaras için yerel en yüksek C_p değeri (batıya bakan kısımda) 1.364 ve transition SST için maksimum yerel emme (kuzeye bakan kısımda) -0.892'ye eşittir. Binanın doğuya bakan kısmındaki akış resirkülasyon bölgesi, transition SST ve k- ω SST modellerine kıyasla Spalart-Allmaras için en geniş haldedir. Spiral düğümlerin ve semer noktalarının konumlarına bakıldığında, Spalart-Allmaras modeli diğer modellerle (transition SST ve k- ω SST) karşılaştırıldığında, oluşan girdabın boyutu açısından ayırt edici bir fark vardır.

*Corresponding Author, email: hmdemir@aksaray.edu.tr

1. Introduction

Computational fluid dynamics (CFD) is a computer-based mathematical modeling implement capable of relating to fluid flow issues and estimating physical fluid flow, heat and mass transfer, chemical reactions, and correlative phenomena by working out the mathematical equations (such as the Navies-Stokes equations) which govern these treatments utilizing numerical methods. Moreover, CFD is a combination of physics, fluid mechanics, mathematics, and computer applications. The analysis of CFD has been widely executed in numerous engineering areas where fluid behavior is an important factor, including mechanical, biomedical, wind and aerospace engineering for various applications. The utilization areas of CFD have been continuing to increase day by day. Nowadays, CFD simulations have been intensively used to perform exhaustive analyses of the interior and exterior wind environment of buildings. The branch of science in which such analyzes are conducted is called building aerodynamics. Even though the experimental surveys of the building for various wind conditions can be challenging (time, cost and scale issues and also hard to repeat in the same dynamic similarity), a full-scale model of the building modeled and analyzed in CFD provides more accurate and rapid predictions in point of various parameters such as wind flow and load. Estimations of wind pressures and forces on buildings are vital for safe and economic design. It could be a logical approach to clutch the flow around bluff body to understand the behavior of a building exposed to wind load. Because, a building has most probably the shape of a bluff body (non-streamline shape) which has sharp and flattened fronts. It is considerably executed in various engineering areas like aerospace, environment and construction, which has greater differential pressure resistance in proportion to streaklines in the event of airplane, automobiles, bridges, and building structures, etc., and also is a conventional branch in the investigation area of fluid mechanics. Highly unstable and turbulent vortices originate around the separation layers due to the sharp corners. Instabilities of pressure on bluff bodies, like buildings in natural turbulent boundary layer flows generated by intense winds, have a complicated transient and spatial structure, incurring from unstable turbulent flows in nearing wind and flow separations on the body. [1-3]

In recent years, the numbers of scientific surveys focusing on wind load behavior for low-, medium-, and complicated tall-rise buildings have been increased by researchers. Researchers have been calculated the wind load on the building utilizing various simulation techniques. It was clearly noticed that the larger part of these studies put emphasis on RANS, which is predominantly due to its well-developed specifications, less computational cost and gratifying efficiency in the industrial fields. The numerical prediction of wind flow around a rectangular plan shape building was done successfully by Mou et al [4] using RNG $k-\epsilon$ turbulent model and the distribution of the pressure around the building was investigated. The obtained result was compared with the CAARC standard models. The simulation of atmospheric boundary conditions was very much important for the wind flow around the building. Oliveira and Younis [5] had been simulated wind flow around a full-scale low-rise building with a gable roof to identify the precision of the solutions to diverse estimations. Conducting these computations with the assumption of 2D flow throughout a mid-length plane excited crucial overestimation of roof suction loads. Additionally, no separation was observed in the standard $k-\epsilon$ model, whereas Re stress closure allowed the anticipation of flow separation on the windy side of roof. Ozmen et al. [6] examined turbulent flow fields on low rise buildings with gabled roofs having varied angles both experimentally and numerically. It was seen that regions of recirculation observed on the behind of the model and leeward side of roofs because of flow separation. The numerical results indicated that for the mean pressures coefficients, standard $k-\omega$ model exhibited preferable consequences than the realizable $k-\epsilon$ turbulence model. Lien et al. [7] performed numerical simulation using various of the $k-\epsilon$ turbulence-closure model exerted with wall functions, to calculate disturbed mean flow for 2-D buildings. It was obtained that the non-linear $k-\epsilon$ model provided the ideally result between all other turbulence models investigated. Kim et al. [8] investigated the impacts of ascending amount of cross-section parts on the structural response of building models exposed to wind. It was stated that the influences of helical shape on the response characteristics reduced with rising side number, and it abated when the number of sides was 5 or more. Dagnev and Bitsuamlak [9] evaluated wind induced aerodynamic loads on CAARC building model considering the impact of neighboring building. A convenient agreement has been observed mean pressure coefficients between wind tunnel and numerical results.

Sharma et al. [10] comprehensively reviewed both minor and major aerodynamic modifications broadly. Structures having bluff shape were more tender to heavy wind-induced stimulations and could be handled with modifications such as aerodynamic or structural. It was seen that these modifications altered the wake dynamics and vortex shedding incident. Chamfering, corner cut and rounding modifications cultivated the reattachment of shear layer and attenuated the wake width on back side of the building. Further, the researchers continued with the detailed review of shape modifications in buildings such as curve corners and major modifications such as altering the building shape and elevation. Xie [11] asserted a convenient approximation to determine efficacy of aerodynamic methods employed to reduce effect of wind such as tapering, twisting and stepping. Daemei et al. [12] investigated wind aerodynamics and flow behaviours of triangular models with various aerodynamic variations including rounded, recessed and chamfered corners numerically. It was found that rounded-corners, tapered led to drag coefficient decline of the building. Tanaka et al. [13] investigated the effect of various aerodynamic modifications on a square shaped tall building to measure aerodynamic forces and wind pressures

experimentally. Bhattacharya and Dalui [14] performed both numerical and experimental studies for the dispersion of pressure on E-shaped plan under wind excitation. They obtained that in order to calculate mean pressure coefficients, as a result of comparison, SST $k-\omega$ turbulence model gave better results than the $k-\epsilon$ turbulence model. At skew wind angles, the maximal positive and negative mean pressures of some faces of the building are supplied. Zhao Liu et al [15] performed a twisted wind flow on a square mega tall building using wind tunnel test and the results of pressure distribution are studied. Tamura and Miyagi [16] investigated the effect of various corner modifications on a square cylinder considering laminar and turbulent flow conditions experimentally in order to establish physical mechanism of the decline in wind load on high-rise building. They stated that rounded and chamfered corners decreased drag forces, due to the reduction in width of wake. Tominaga et al. [17] performed both numerically and experimentally study about airflow around buildings having isolated gable roof with various pitches. There was good agreement between the CFD results and measured values for the streamwise velocity. The focus of the recirculation eddy back the roof proceeded uphill and wander away the building with an ascent in the pitch of roof. For all of the roof pitches, the maximum value of turbulent kinetic energy observed around the downstream eaves. Increase in pitches of the roof caused to decrease in these values.

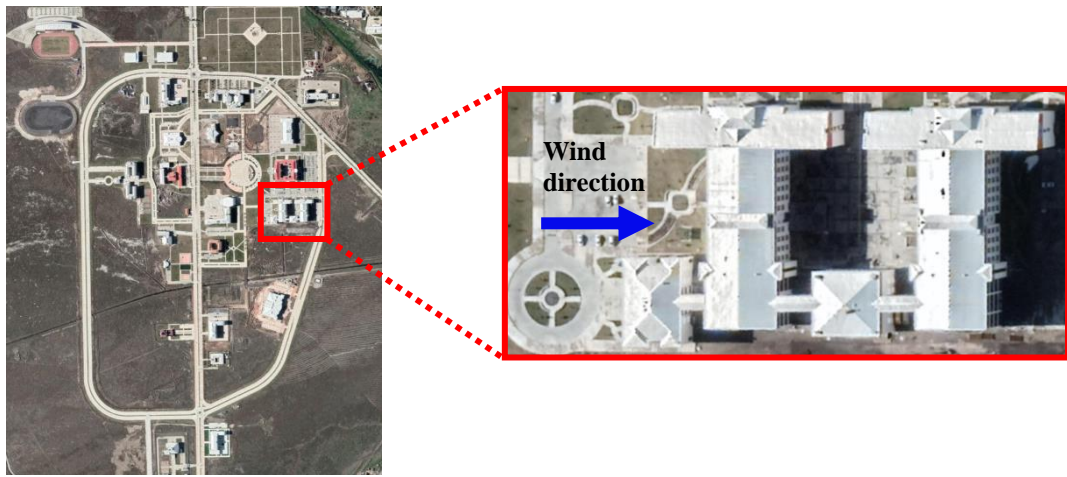
Özkan et al. [18] and Blocken et al. [19] focused on the wind load and wind speed distributions. For various passage widths, Blocken et al. [19] investigated wind speed situations in passages between parallel buildings. In order to examine flow around the building, $k-\epsilon$ turbulence model was selected and applied. Obtained results from the simulation demonstrated that the rise of wind speed in passages was only noticed at the pedestrian level and that the flow rate across the passage was chiefly 8% greater than the flow rate of the free field. The impacts of side ratio on wind-induced pressure distribution on rectangular shape buildings were examined by Amin and Ahuja [20]. It was stated that the distribution and magnitude of wind pressure on sidewalls and leeward walls were noticeably influenced by the side ratio of building. However, it had a tiddly effect on windward walls as wind direction was parallel to the roof ridge. Nozawa and Tamura [21] performed a numerical study to investigate flow around the low-rise building immersed in turbulent boundary layers. It was stated that the elusion from minimum pressure on the roof and the sides was vigorously influenced by the turbulence of nearing flows.

When the existing literature regarding this study is surveyed, it is noticed that while the studies investigating the flow fields on building models with simple geometry stand out, there are not many studies that examine the wind flow in complex and irregular-shaped buildings using different turbulence models. In this context, this study mainly focuses on the wind load around an irregular-shaped building under the wind flow using various turbulence models.

2. Material and Method

2.1. Numerical Method

The two-dimensional, steady-state, numerical simulation has been performed with solving Reynolds Averaged Navier-Stokes Equation (RANS) equations by using the ANSYS Fluent software for existing building of the Engineering Faculty located in Aksaray University. COUPLED algorithm scheme was utilized to solve discretized equations for the pressure-velocity coupling. On spatial discretization, in order to compute the gradient, the least-squares cell-based method has been selected besides the second-order upwind method has been employed for all further parameters. Figure 1 shows the top view of the main campus environment of Aksaray University from Google Earth and Figure 1b shows the zoomed-in layout of the Engineering Faculty's building which is selected for the simulation. Figure 2 delineates the computational domain of CFD simulation and its dimensions with regard to length of the building. In order to construct computational domain properly according to the recommendation given by Bartzis et al. [22] and Franke et al. [23], the building was positioned to $5L$ far from the inlet and $15L$ from the outlet. Furthermore, the clearances of north and south directions were situated five times the length of the building. In the present numerical study, quadrilateral dominant type mesh was constructed (as can be seen in Figure. 3) and three different mesh types were used to obtain grid-independent results, and approximately 0.4 million computational grids were chosen for comprising the simulation circumstances in line with the results given in Table 1. Boundary layer was constructed considering smooth transition with growth factor 1.2 and total layer is 5. Convergence of the computations was obtained for both continuity and momentum equations when residuals were lower than 10^{-5} .



a) b)
Figure 1. Overview of the Aksaray University campus buildings.
 a) main campus b) building of Engineering Faculty

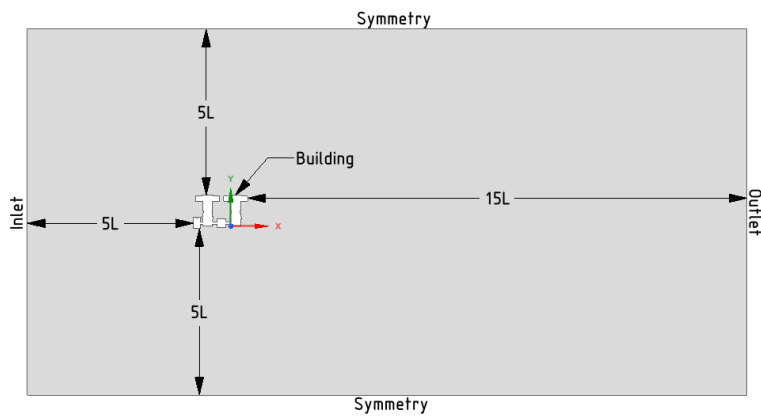


Figure 2. Dimensions of computational domain and boundary conditions.

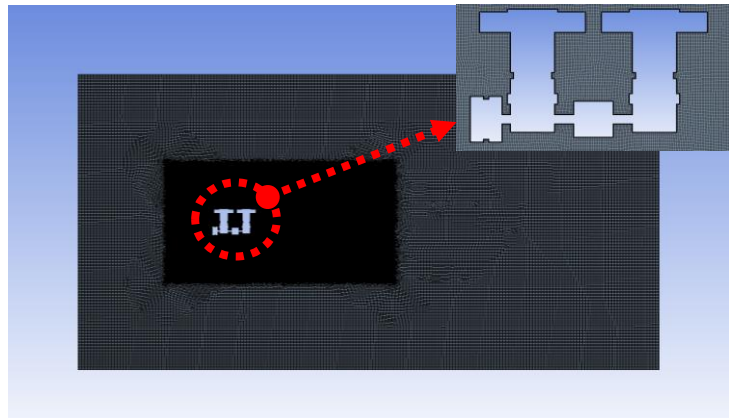


Figure 3. Mesh structure around the building.

Table 1. Details of different mesh schemes

Mesh scheme	Number of nodes	C_D
1	0.38 million	1.7047601
2	0.40 million	1.7188737
3	0.52 million	1.7189921

3. Results

3.1. Pressure Distribution around the Building

In order to evaluate wind loads on the structures, knowledge of external distribution is vital. The distributions of pressure around the building are investigated for various turbulence models in this study. The pressure coefficient (C_p) is a nondimensional parameter, found using equation 1.

$$C_p = \frac{P - P_0}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (1)$$

where ρ is density of air, P is the local pressure on the building surface, P_0 is the far upstream pressure and U is velocity of wind.

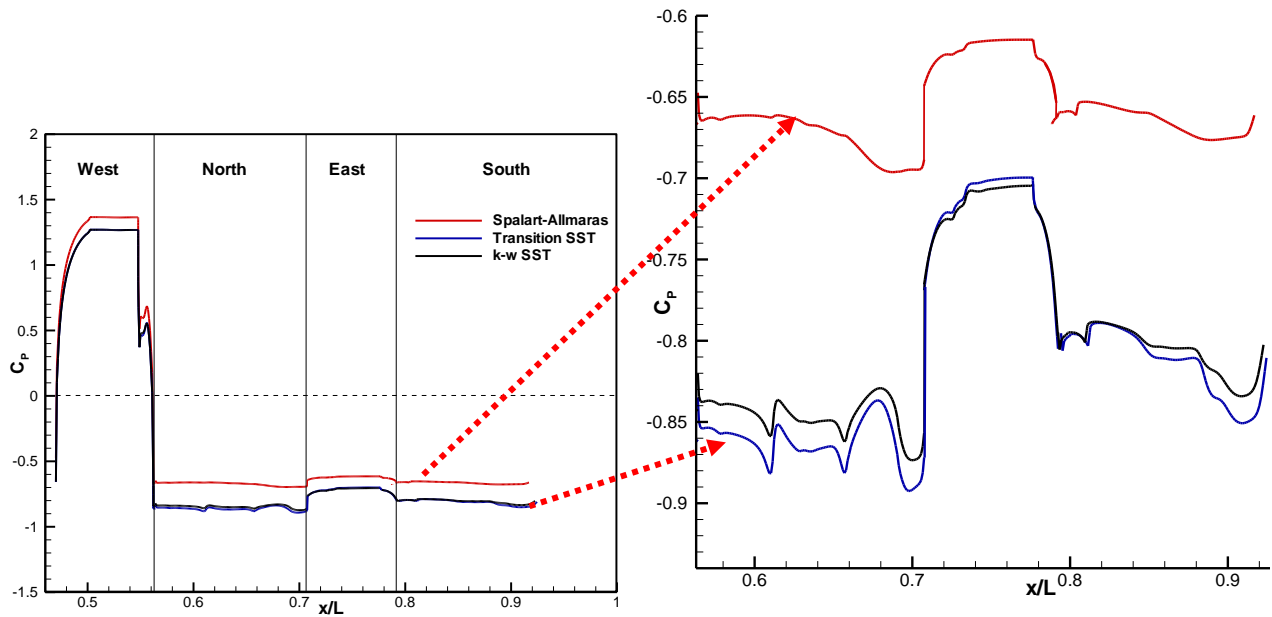


Figure 4. Distributions of pressure coefficients for the building obtained by different turbulence models.

Figure 4 represents the distributions of pressure coefficient (C_p) around surfaces of the building at 1 m/s wind speed are given comparatively with the results of Spalart-Allmaras, transition SST and k- ω SST turbulence models. When the variations of C_p around the building calculated using different turbulence models are examined, it can be seen that there is similar characteristic behavior of the variations of C_p . West-facing of the building is exposed to positive C_p , whereas north-, south-, and east-facing are exposed to negative C_p . As shown in Figure 4, pressure distributions on west-facing of the building are almost the same in each case while the pressure distributions on the other directions from $x/L=0.56$ to 0.92 are different for each case with 1m/s. In order to examine the differences and similarities between the C_p values for all three cases, the graphic lines are magnified and the pressure distributions on the north, south and east facing parts of the building are more clearly visible. As can be seen from the study of Mou et al. [4], it is interesting to note that wind pressures on east-facing of the building (leeward wall) were quite stable, lying in a horizontal line. Furthermore, wind pressures on the north- and south-facing of building happened considerable fluctuations, in order to make a slow transition from the north- and south-facing (sides) to east facing (leeward) in negative pressure. Additionally, it is seen that there is a sudden and steep increase in the pressure coefficient while moving to the east of the building due to the vortex occurring in the northeast of the building after the position of $x/L=0.7$. In general, when the pressure coefficient values calculated around the building are examined due to the 1 m/s wind blowing from the west of the building, it is seen that the Spalart-Allmaras model is larger than other turbulence models. Besides, it is seen from northern facing of building that suction effect is more critical for transition SST turbulence model compared with the others. From the analysis of wind C_p of building, it is stated that the local highest C_p value (west-facing) is 1.364 for Spalart-Allmaras, and the maximum local suction (north-facing) is -0.892 for transition SST.

3.2. Drag Coefficient around the Building

Wind is a horizontal air movement generated by pressure differences between air masses and air flows from high pressure region to low pressure region. In other words, wind can be defined as main force acting on structures, buildings etc. horizontally, that is proportionate to the drag coefficient. For structural and aerodynamic designs, drag coefficient is considerable parameter. In order to measure the drag coefficient of buildings experimentally is both time-consuming and expensive. In this study, drag coefficients are computed by using CFD for a building in Aksaray University considering the actual geometry of building.

To evaluate the drag quantity (drag force) or resistance of an object against a fluid flow such as air or water, a dimensionless parameter drag coefficient which is indicated as C_D in fluid dynamics is addressed. C_D is calculated using below equation;

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U^2 A} \quad (2)$$

where ρ is density of air; F_D is average drag force; and A is the reference area of the building.

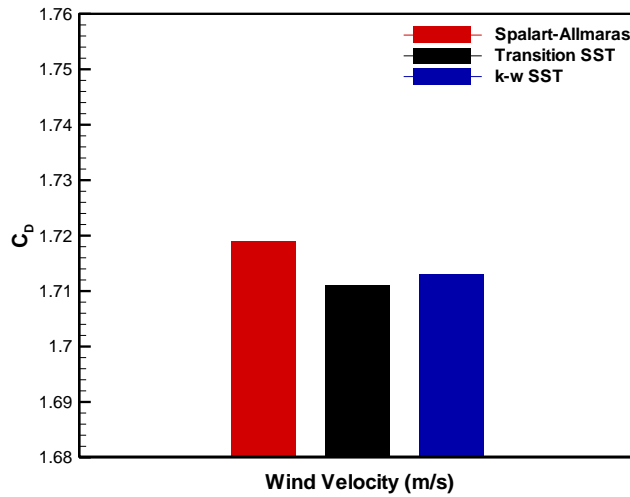


Figure 5. Comparison of drag coefficient obtained by numerical simulation.

Figure 5 shows the drag coefficient (C_D) obtained from numerical study at constant wind velocity of 1m/s for three different turbulence models. It was computed as 1.719 by the Spalart-Allmaras, 1.711 by the transition SST model, and 1.713 by k- ω SST model, respectively. By the virtue of decline in wake width, drag force exerted on the building decreased.

3.3. Flow Field Visualization

Figure 6 shows the streamlines superimposed onto the non-dimensional velocity contours. The velocity contours with streamline resulting from each turbulence model investigated in this work are depicted for the whole wind flow field around the building as can be seen in Figure 6. It is clear that all three cases share the same streamline profile, including two symmetrically rotating vortices in clockwise and counterclockwise directions. These vortices that were formed in the east-facing part of the building include spiral nodes (F_1 and F_2) and one saddle point (S). In Figure 6a, for the Spalart-Allmaras case, the saddle point (S) that represents the location of end point of the circulation zone of the vortex is located at $x/L = 11.95$ and a pair of recirculation nodes centered at $x/L = 7.81$. Similarly, Figure 6b, presents a saddle point at $x/L=7.87$ and a pair of recirculation nodes at $x/L=5.48$ for transition SST case. On the other hand, saddle point equals to $x/L=7.91$ and location of recirculation is at $x/L=5.58$ for k- ω SST case. Looking at the positions of the spiral nodes and saddle points, there is a distinguishable difference when Spalart-Allmaras model is compared to the other models (transition SST and k- ω SST) with regard to the size of the vortex formed. Flow recirculation zone in the east-facing part of the building is the largest for Spalart-Allmaras case comparing with other cases. As stated before, drag force exerted on the building diminished as a result of reduction in wake width.

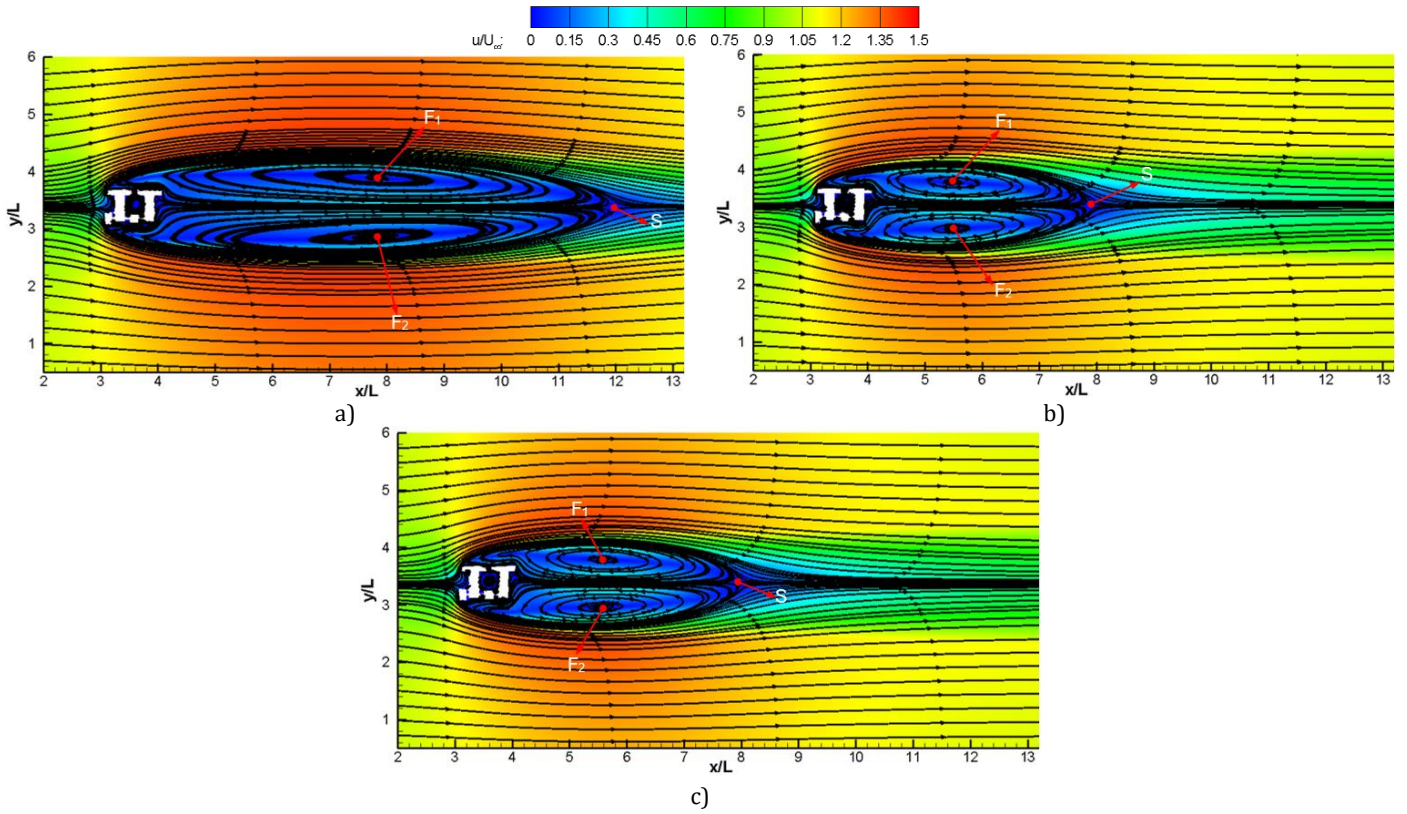
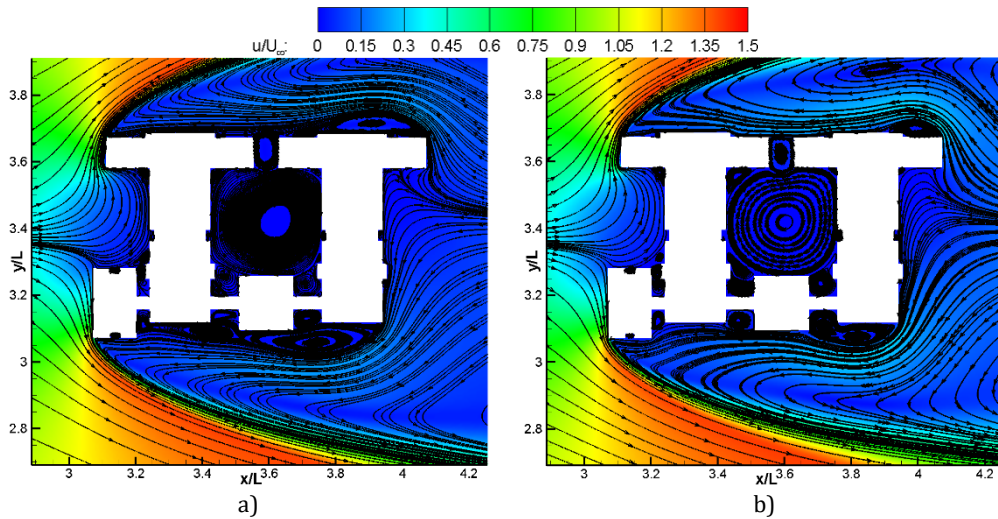


Figure 6. Non-dimensional velocity distribution contour together with streamlines for different turbulence models. a) Spalart-Allmaras b) transition SST c) $k-\omega$ SST



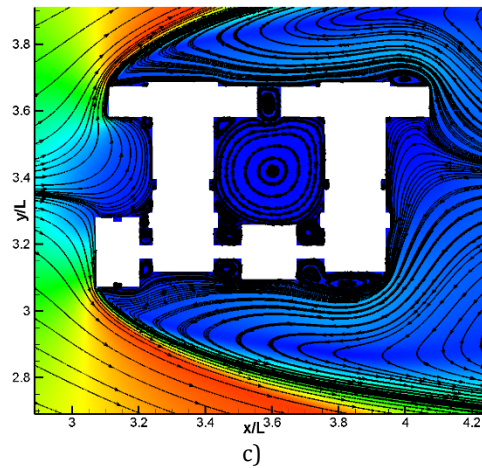


Figure 7. A close-up view of the flow patterns around the building.
 a) Spalart-Allmaras b) transition SST c) k- ω SST

It can be observed that the major parts of wind flow pattern around the building are similar, which are demonstrated in Figure 7 for Spalart-Allmaras, transition SST and k- ω SST turbulence models, respectively. A few unusual behaviours are observed at northeast-facing of and south-facing of the building; the size of secondary vortex is the largest for Spalart-Allmaras case. Additionally, it is seen that the wind flow coming from the western part of the building turns north and south from the stop point and separates from the corners of the west-facing part of the building. Small-scale eddies occurred on the north and south-facing surfaces parallel to the flow. The flow diverging from the north-facing part of the building caused the formation of a small counterclockwise vortex at the north-right corner of the building. The behaviors of the flow that occurred in the middle of the building were similar to lid-driven cavity flow. As can be seen from Figure 7, as large clockwise-rotating primary vortices formed in the geometric center of the interior of the building, counter-clockwise rotating secondary eddies occurred at the three corners of the bottom left, bottom right, and top left. Additionally, the clockwise-rotating small tertiary eddies formed at the top right corner of the building.

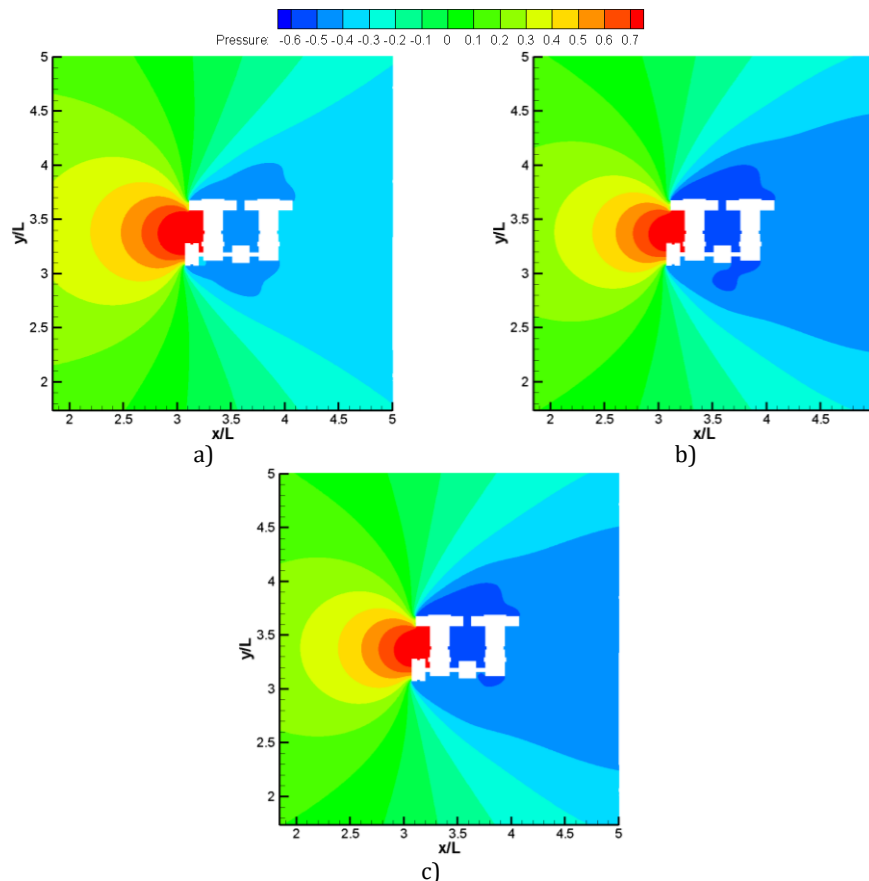


Figure 8. Pressure distribution contour for different turbulence models.
 a) Spalart-Allmaras b) transition SST c) k- ω SST

The distributions of wind pressure coefficients (C_p) of the building resulting from each turbulence model are shown in Figure 8. As seen from the contours of C_p on the building for all turbulence models are similar; the only remarkable distinction is their shape which acts the pressure distribution over the southern facing of building. Since the structure of the building is dissymmetrical, the pressure distribution of this building differs in every direction and the maximum value of C_p is observed at the west-facing (stagnation point) of the building.

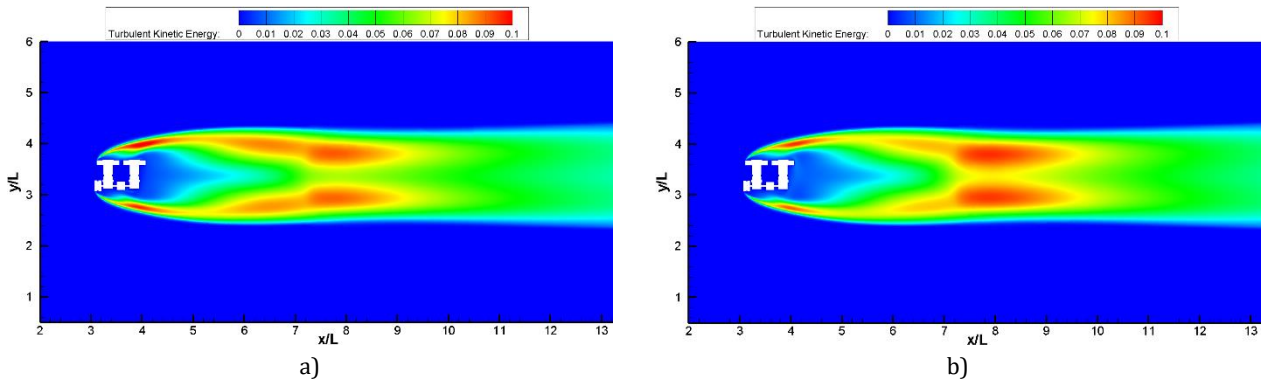


Figure 9. The turbulent kinetic energy distributions around the building.
a) transition SST b) $k-\omega$ SST

In the following section, the comparison of turbulent kinetic energy (TKE) in the flow field is depicted. The contours show that the generation of TKE is about the shear in the flow arising from the building. The distribution of the turbulent quantities is found clearly symmetric along the $y/H=3.4$ axis. It is clear that the peak value of TKE appears at the shear layer and lies streamwise between the end of the vortex formation region and wake recirculation region, particularly around the saddle point. In fact, as observed in Figure 9, TKE has no considerable deviation between transition SST and $k-\omega$ SST. Only one difference is the maximum region of TKE value located behind the end of the recirculation area for transition SST is smaller than $k-\omega$ SST in the wake region.

4. Discussion and Conclusion

In this study, the numerical simulation has been carried out to evaluate the wind load on the selected irregular shape building using Spalart-Allmaras, transition SST and $k-\omega$ SST turbulence models under the same condition and constant wind velocity. As a consequence of pressure distributions given in Figure 4, one can realize that pressure coefficients (C_p) occurring along the building obtained by using Spalart-Allmaras is greater than those obtained with other turbulence models. It is observed that the pressure distribution on the west-facing of building is similar for all the turbulence models studied. The wind pressures on east-facing of the building were quite stable, lying in a horizontal line. Wind pressures on the north- and south-facing of building happened considerable fluctuations, in order to make a slow transition from the north- and south-facing to east facing in negative pressure. Considering the results obtained for the northern facade of the building, it was understood that the suction effect is more sensitive in the transition SST turbulence model compared to other models. Besides, the maximum local suction value of C_p (north-facing) is equal to -0.892 for transition SST whereas the maximum local value of C_p (west-facing) is equal to 1.364 for Spalart-Allmaras. In addition to this, the drag coefficient (C_D) was computed as 1.711 by the transition SST model, 1.713 by $k-\omega$ SST model, and 1.719 by the Spalart-Allmaras, respectively. It is obvious that the same streamline profile occurred which has two symmetrically rotating vortices in clockwise and counterclockwise directions for all three cases. Flow recirculation zone in the east-facing part of the building is the most extended for Spalart-Allmaras situation compared to other situations. Additionally, there is a remarkable distinction in point of size of vortices formed in the Spalart-Allmaras model is compared to transition SST and $k-\omega$ SST models. It was also revealed that the generation of TKE caused by the shear in the flow arising from the building was found clearly symmetric along the $y/H=3.4$ axis. It is concluded that the ultimate value of TKE appears at the shear layer and lies streamwise between the end of the vortex formation region and the wake recirculation region, especially around the saddle point. As stated before in Fig. 9, the maximum region of TKE value located behind the end of the recirculation zone for transition SST is less than $k-\omega$ SST in the wake region.

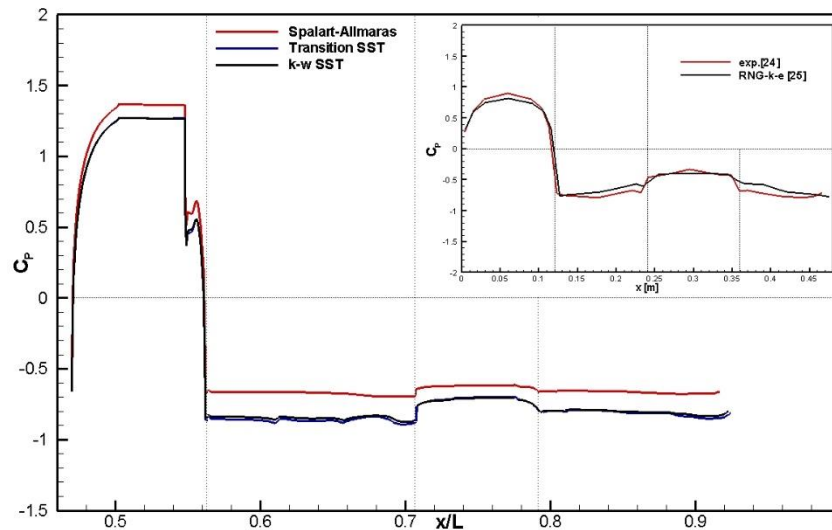


Figure 10. Comparison of the C_p distributions around the building.

In connection with the variation of C_p , when comparing the findings of this study with the literature of [24] and [25], although both the wind value and the shape of buildings are not exactly same, C_p distributions around the building indicate similar trends. At the same time, it is concluded from this comparison graph that the positive pressure coefficients occurred on the windward wall (west-facing in this study), which was directly exposed to the wind flow, due to the pushing effect, and negative pressure coefficients occurred on the side (north and south facing) and leeward (east-facing) walls because of the suction effect as illustrated in Figure 10.

Acknowledgment

The author would like to thank all his colleagues in Wind Engineering and Aerodynamics Research Group (WEAR) at Erciyes University for allowing the use of ANSYS software.

References

- [1] Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. 2007. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method. Pearson education.
- [2] Holmes, J. D. 2018. Wind loading of structures. CRC press. New York: Taylor & Francis Group
- [3] Zhao, M. 2021. Prediction and Validation Technologies of Aerodynamic Force and Heat for Hypersonic Vehicle Design. Springer Nature.
- [4] Mou, B., He, B. J., Zhao, D. X., & Chau, K. W. 2017. Numerical simulation of the effects of building dimensional variation on wind pressure distribution. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 11(1), 293-309.
- [5] Oliveira, P. J., & Younis, B. A. 2000. On the prediction of turbulent flows around full-scale buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 86(2-3), 203-220.
- [6] Ozmen, Y., Baydar, E., & Van Beeck, J. P. A. J. 2016. Wind flow over the low-rise building models with gabled roofs having different pitch angles. *Building and Environment*, 95, 63-74.
- [7] Lien, F. S., Yee, E., & Cheng, Y. 2004. Simulation of mean flow and turbulence over a 2D building array using high-resolution CFD and a distributed drag force approach. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 92(2), 117-158.
- [8] Kim, Y. C., Bandi, E. K., Yoshida, A., & Tamura, Y. 2015. Response characteristics of super-tall buildings—Effects of number of sides and helical angle. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 145, 252-262.
- [9] Dagnev, A. K., & Bitsuamlak, G. T. 2010. LES evaluation of wind pressures on a standard tall building with and without a neighboring building. *The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010) Chapel Hill, North Carolina, USA May 23-27.*

- [10] Sharma, A., Mittal, H., & Gairola, A. 2018. Mitigation of wind load on tall buildings through aerodynamic modifications. *Journal of Building Engineering*, 18, 180-194.
- [11] Xie, J. 2014. Aerodynamic optimization of super-tall buildings and its effectiveness assessment. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 130, 88-98.
- [12] Daemei, A. B., Khotbehsara, E. M., Nobarani, E. M., & Bahrami, P. 2019. Study on wind aerodynamic and flow characteristics of triangular-shaped tall buildings and CFD simulation in order to assess drag coefficient. *Ain Shams Engineering Journal*, 10(3), 541-548.
- [13] Tanaka, H., Tamura, Y., Ohtake, K., Nakai, M., & Kim, Y. C. 2012. Experimental investigation of aerodynamic forces and wind pressures acting on tall buildings with various unconventional configurations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 107, 179-191.
- [14] Bhattacharyya, B., & Dalui, S. K. 2020. Experimental and numerical study of wind-pressure distribution on irregular-plan-shaped building. *Journal of Structural Engineering*, 146(7), 04020137.
- [15] Liu, Z., Zheng, C., Wu, Y., Flay, R. G., & Zhang, K. 2019. Investigation on the effects of twisted wind flow on the wind loads on a square section megatall building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 191, 127-142.
- [16] Tamura, T., & Miyagi, T. 1999. The effect of turbulence on aerodynamic forces on a square cylinder with various corner shapes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 83(1-3), 135-145.
- [17] Tominaga, Y., Akabayashi, S. I., Kitahara, T., & Arinami, Y. 2015. Air flow around isolated gable-roof buildings with different roof pitches: Wind tunnel experiments and CFD simulations. *Building and Environment*, 84, 204-213.
- [18] Özkan, R., Sen, F., & Ballı, S. 2020. Evaluation of wind loads and the potential of Turkey's south west region by using log-normal and gamma distributions. *Wind and Structures*, 31(4), 299-309.
- [19] Blocken, B., Carmeliet, J., & Stathopoulos, T. 2007. CFD evaluation of wind speed conditions in passages between parallel buildings-effect of wall-function roughness modifications for the atmospheric boundary layer flow. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95(9-11), 941-962.
- [20] Amin, J. A., & Ahuja, A. K. 2013. Effects of side ratio on wind-induced pressure distribution on rectangular buildings. *Journal of Structures*.
- [21] Nozawa, K., & Tamura, T. 2002. Large eddy simulation of the flow around a low-rise building immersed in a rough-wall turbulent boundary layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90(10), 1151-1162.
- [22] Bartzis, J. G., Vlachogianis, D., & Stefanos, A. 2004. Best Practice Advice for Environmental Flows. TA5 QNET CFD network Newsletter, 2(4).
- [23] Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, H., & Carissimo, B. 2007. Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment. COST action 732. Quality Assurance and Improvement of Meteorological Models. University of Hamburg, Meteorological Institute, Center of Marine and Atmospheric Sciences.
- [24] Hunte, S. 2010. Testing the application of CFD for building design. Delft University of Technology, Master Thesis, Netherland.
- [25] Özmen, Y., & Kaydok, T. 2014. Kare kesitli bir yüksek bina üzerindeki türbülanslı akışın sayısal olarak incelenmesi. *Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences*, 17(2), 15-25.