

NÖHÜ MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ NOHU JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

ISSN: 2564-6605

Cilt: 10 Sayı: 2 2021
Volume: 10 Issue: 2 2021



www.ohu.edu.tr/muhendislikfakultesi
www.ohu.edu.tr/facultyofengineering

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh>
<https://dergipark.org.tr/en/pub/ngumuh>



Dergi Sahibi/Journal Owner

Prof. Dr. Kutsi Savaş Erduran

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dekanı, Türkiye/Niğde Ömer Halisdemir University, Dean of Engineering Faculty, Turkey

Baş Editör/Editor-in-Chief

Prof. Dr. Mustafa Sarıdemir

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/Niğde Ömer Halisdemir University, Turkey

Yardımcı Editörler/Associate Editors

Prof. Dr. Mustafa Korkaç

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/Niğde Ömer Halisdemir University, Turkey

Dr. Öğr. Üyesi/Assist. Prof. Dr. Ahmet Şakir Dokuz,

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/Niğde Ömer Halisdemir University, Turkey

Dr. Öğr. Üyesi/Assist. Prof. Dr. Firdevs Uysal

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/Niğde Ömer Halisdemir University, Turkey

Yayın Danışma Kurulu/Editorial Advisory Board

Prof. Dr. Adnan Görür

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/Niğde Ömer Halisdemir University, Turkey

Prof. Dr. Metin Yıldırım

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/Niğde Ömer Halisdemir University, Turkey

Prof. Dr. Murat Gökçek

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye/Niğde Ömer Halisdemir University, Turkey

Prof. Dr. Fahrettin Öztürk

Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Türkiye/Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Turkey

Prof. Dr. Muhammad Imran Asghar

Hubei Üniversitesi, Çin/Hubei University University of Hubei, China

Prof. Dr. Ceyhan Karpuz

Pamukkale Üniversitesi, Türkiye/Pamukkale University, Turkey

Prof. Dr. Cengiz Duran Atış

Erciyes Üniversitesi, Türkiye/Erciyes University, Turkey

Prof. Dr. Okan Karahan

Erciyes Üniversitesi, Türkiye/Erciyes University, Turkey

Prof. Dr. Mustafa Alçı

Erciyes Üniversitesi, Türkiye/Erciyes University, Turkey

Prof. Dr. Kenan Danışman

Erciyes Üniversitesi, Türkiye/Erciyes University, Turkey

Prof. Dr. Kezban Candoğan

Ankara Üniversitesi, Türkiye/Ankara University, Turkey

Prof. Dr. Mustafa İlbaş

Gazi Üniversitesi, Türkiye/Gazi University, Turkey

Prof. Dr. Farid Abed

Sharjah Amerikan Üniversitesi, B.A.E./ Sharjah American University, U.A.E.

Prof. Dr. Ghassan Abu-Lebdeh

Sharjah Amerikan Üniversitesi, B.A.E./ Sharjah American University, U.A.E.

Prof. Dr. Serter Atabay

Sharjah Amerikan Üniversitesi, B.A.E./ Sharjah American University, U.A.E.

Doç. Dr. Kazi Fattah

Sharjah Amerikan Üniversitesi, B.A.E./ Sharjah American University, U.A.E.

Prof. Dr. Süreyya Meriç Pagano

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Türkiye/Tekirdağ Namık Kemal University, Turkey

Prof. Dr. Filipe Figueiredo

Aveiro Üniversitesi, Portekiz/Aveiro University, Portugal



Editör Kurulu/ Editorial Board

Prof. Dr. Mustafa Sarıdemir (Baş Editör/ <i>Editor-in-Chief</i>)	İnşaat Mühendisliği <i>Civil Engineering</i>
Prof. Dr. Mustafa Korkanç (Yardımcı Editör/ <i>Co-Editor</i>)	Jeoloji Mühendisliği <i>Geological Engineering</i>
Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Şakir Dokuz (Yardımcı Editör/ <i>Co-Editor</i>)	Bilgisayar Mühendisliği <i>Computer Engineering</i>
Dr. Öğr. Üyesi Firdevs Uysal (Yardımcı Editör/ <i>Co-Editor</i>)	İnşaat Mühendisliği <i>Civil Engineering</i>
Prof. Dr. Fehiman Çiner	Çevre Mühendisliği <i>Environmental Engineering</i>
Prof. Dr. Hakan Erdem	İnşaat Mühendisliği <i>Civil Engineering</i>
Prof. Dr. Saffet Ayasun	Elektrik-Elektronik Mühendisliği <i>Electrical Electronics Engineering</i>
Prof. Dr. Zeliha Yıldırım	Gıda Mühendisliği <i>Food Engineering</i>
Prof. Dr. Yonca Yüceer	Gıda Mühendisliği <i>Food Engineering</i>
Prof. Dr. Emel Kızılkaya Aydoğan	Endüstri Mühendisliği <i>Industrial engineering</i>
Prof. Dr. Murat Barut	Elektrik-Elektronik Mühendisliği <i>Electrical Electronics Engineering</i>
Prof. Dr. Maciej Dutkiewicz	İnşaat Mühendisliği <i>Civil Engineering</i>
Prof. Dr. Seval Kutlu Akal Solmaz	Çevre Mühendisliği <i>Environmental Engineering</i>
Doç. Dr. Yasin Kabalcı	Elektrik-Elektronik Mühendisliği <i>Electrical Electronics Engineering</i>
Doç. Dr. Bora Timurkutluk	Makine Mühendisliği <i>Mechanical Engineering</i>
Doç. Dr. Ali Özgün Ok	Geomatik Mühendisliği <i>Geomatics Engineering</i>
Doç. Dr. Kutalmış Gümüş	Harita Mühendisliği <i>Geomatics Engineering</i>
Doç. Dr. Aydın Yeşildirek	Mekatronik Mühendisliği <i>Mechatronics Engineering</i>
Doç. Dr. Serkan Çayırılı	Maden Mühendisliği <i>Mining Engineering</i>
Doç. Dr. Rahim Hassanzadeh	Makine Mühendisliği <i>Mechanical Engineering</i>
Dr. Öğr. Üyesi Ehsan Noroozinejad	İnşaat Mühendisliği <i>Civil Engineering</i>
Dr. Öğr. Üyesi Hatice Sinem Şaş Çaycı	Üretim Mühendisliği <i>Manufacturing Engineering</i>
Dr. Öğr. Üyesi Casen Panaitescu	Petrol ve Doğalgaz Mühendisliği <i>Petroleum and Natural Gas Engineering</i>

Mizanpaj Editörleri/*Composition Layout Editors*

Arş. Gör. Alper Ecemiş	Bilgisayar Mühendisliği <i>Computer Engineering</i>
Arş. Gör. Kıvanç Karacan	Mekatronik Mühendisliği <i>Mechatronics Engineering</i>
Arş. Gör. Metehan Bulut	İnşaat Mühendisliği <i>Civil Engineering</i>
Arş. Gör. Emre Uçar	Makine Mühendisliği <i>Mechanical Engineering</i>
Arş. Gör. Kübra Nur Gül	Elektrik-Elektronik Mühendisliği <i>Electrical Electronics Engineering</i>
Arş. Gör. Katibe Sinem Coruk	Gıda Mühendisliği <i>Food Engineering</i>



Yazışma Adresi

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi Yayın Koordinatörlüğü, 51240 Niğde/Türkiye

Correspondence Address

Niğde Ömer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences Publishing Coordinatorship, 51240 Niğde/Turkey

E-posta/E-mail: mbergisi@ohu.edu.tr

İnternet sayfası/Web page: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ngumuh>

Dergi Bilgisi

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi (NÖHÜ) Mühendislik Bilimleri Dergisi, NÖHÜ Mühendislik Fakültesi tarafından 2012 yılından beri Türkçe veya İngilizce olarak yazılmış Orijinal Araştırma Makaleleri ve Derleme Makaleleri yayınlayan hakemli bir dergidir. Dergi, hiçbir aşamada yayın ücreti talep etmemektedir ve DergiPark sistemi üzerinden ücretsiz erişimli bir dergidir.

Publication information

Niğde Ömer Halisdemir University (NOHU) Journal of Engineering Sciences is a peer-reviewed journal that has published Original Research Articles and Review Articles written in Turkish or English since 2012 by NOHU Faculty of Engineering. The journal does not require any publication fee at any stage and is a free access journal from the DergiPark system.

Özetlenme, Dizinlenme/Abstracting, Indexing



Erişilebilirlik /Accessibility





İÇİNDEKİLER/CONTENTS

Bilgisayar Mühendisliği / Computer Engineering

Sosyal medyada otomatik halk sağlığı takibi: Güncel bir derleme (Derleme Makalesi)

Automatic public health monitoring on social media: A recent survey (Review Article)

Doğan Küçük, Nursal Arıcı, Emine Ela Küçük

439-499

Web sitesi tabanlı ortalama saldırılarının adli analizi (Araştırma Makalesi)

Forensic analysis of web-based phishing attacks (Research Article)

İlker Kara

450-455

Çevre Mühendisliği / Environmental Engineering

Aklime edilmiş aktif çamur mikroorganizmaları ile sürekli sistem yukarı akışlı dolgulu kolonda 2,4- diklorofenol gideriminin incelenmesi (Araştırma Makalesi)

Investigation of 2,4- dichlorophenol removal in continuous system upflow filled column with activated sludge microorganisms (Research Article)

Ece Ümmü Deveci

456-464

Elektrik ark ocağı ile üretim yapan bir demir-çelik tesisinin mevcut en iyi teknikler kapsamında değerlendirilmesi (Araştırma Makalesi)

Evaluation of an iron and steel mill producing by electric arc furnace in the scope of best available technics (Research Article)

Gülizar Gökcecik, Hakan Dulkadiroğlu

465-471

Evsel katı atık oluşum miktarlarının küresel ve yerel mekânsal otokorelasyon yöntemleri ile incelenmesi (Araştırma Makalesi)

Investigation of generation of municipal solid waste with global and local spatial autocorrelations (Research Article)

Gülden Gök, Orhan Atakan Gürbüz

472-478

Hibrit olarak alüminyum ve demir elektrotlar kullanarak elektrokoagülasyon prosesleri ile sulu çözeltilerden salisilik asit gideriminin araştırılması (Araştırma Makalesi)

Removal of salicylic acid from aqueous solutions by electrocoagulation processes using hybrid electrode (Research Article)

Fuat Özyonar, Ömür Gökkuş

479-486



Acid Blue 264 azo boyasının Fenton ve ultrases-Fenton oksidasyon yöntemleri ile renk ve KOİ gideriminin araştırılması (Araştırma Makalesi)

Investigation of color and COD removal of Acid Blue 264 azo dye by Fenton and ultrasound-Fenton oxidation methods (Research Article)

Dilan Toprak, Savaş Şener

487-494

Organize sanayi bölgesine ait atıksu arıtma tesisinde ECAM modellemesiyle karbon emisyonu değerlendirilmesi (Araştırma Makalesi)

Assessment of carbon emission from a wastewater treatment plant of an organized industrial district by ECAM modelling (Research Article)

Cansu Mıstıklar, Süreyya Meriç

495-504

SBR sisteminin antibiyotik (tetrasiklin/klortetrasiklin) ve ağrı kesici (parasetamol) etkisinde nitrifikasyon ve denitrifikasyon performansının belirlenmesi (Araştırma Makalesi)

Determination of nitrification and denitrification performance in antibiotic (tetracycline/chlortetracycline) and pain relief (paracetamol) effect in the SBR system (Research Article)

Aytekin Çelik

505-510

Sivas havzasındaki Eosen volkanizmasından kaynaklanan arsenik kirliliği: Yalıncağ köyü (Hafik, Sivas) eski içme suyu kaynağı (Araştırma Makalesi)

Arsenic pollution caused by Eocene volcanism in the Sivas basin: The old drinking water source of the Yalıncağ village (Hafik, Sivas) (Research Article)

Birsen F. Biçgel, Mehmet A. Kurt, Ümit Yıldırım, Cüneyt Güler, Onur Güven

511-519

Evsel elektrik ihtiyacının hibrit yenilenebilir enerji sistemleriyle karşılanması: Bursa örneği (Araştırma Makalesi)

Providing domestic electricity need with hybrid renewable energy systems: Bursa case study (Research Article)

Sümeyye Adalı, Melike Yalılı Kılıç

520-526

Elektrik-Elektronik Mühendisliği / Electrical-Electronic Engineering

Indirect field oriented control and direct torque control comparison with/without artificial neural networks on asynchronous motors (Research Article)

Asenkron motorlarda yapay nöral ağlar ile/olmadan dolaylı alan yönlendirmeli kontrol ve doğrudan tork kontrolünün karşılaştırması (Araştırma Makalesi)

Yavuz Üser, Haydar Can Acar

527-534

Hekzakooper insansız hava aracı için eşdeğer bozucu etki tahmini kullanılarak bozucu etki önleyici denetleyici tasarımı (Araştırma Makalesi)

Anti-disturbance controller design for a hexacopter unmanned aerial vehicle using equivalent disturbance estimation (Research Article)

Hasan Başak, Emre Kemer

535-544



Asenkron motorların iyileştirilmiş anahtarlamalı-GKF tabanlı alan yönlendirmeli kontrolü (Araştırma Makalesi)

Improved switching-EKF based field oriented control of induction motors (Research Article)

Yunus Emre Altınışık, Rıdvan Demir, Murat Barut

545-552

0-500 μ A sürekli DC kontrollü dental iyontoforez sistemi tasarımı ve performans incelemesi (Araştırma Makalesi)

Design and performance review of 0-500 μ A continuous DC controlled dental iontophoresis system (Research Article)

Serkan Dışlitaş

553-562

Real-time monitoring and operation of power generation in a solar power plant with three phase central inverter topology (Research Article)

Üç fazlı merkezi invertör topolojisine sahip güneş enerjisi santralinde güç üretiminin gerçek zamanlı izlenmesi ve işletimi (Araştırma Makalesi)

Ali Unluturk, Fatih Sulan

563-568

Dik açılı dördün genlik modülasyonu ve L-kollu MRC tekniğine dayalı bir kablosuz haberleşme sisteminin Fisher-Snedecor F sönümlü kanallardaki performansı (Araştırma Makalesi)

Performance of a wireless communication system based on rectangular quadrature amplitude modulation and L-branch MRC schemes over Fisher-Snedecor F fading channels (Research Article)

Nuri Kapucu

569-575

Endüstri Mühendisliği / Industrial Engineering

Process improvement applications for a cargo company (Research Article)

Bir kargo şirketi için süreç iyileştirme çalışmaları (Araştırma Makalesi)

Sevgi Yılmaz, Nazlıcan Arslan, Murat Oturakçı

576-581

Analitik hiyerarşi prosesi (AHP) yöntemi ile çalışan performansının değerlendirilmesi (Araştırma Makalesi)

Evaluation of employee performance by the analytical hierarchy process (AHP) method (Research Article)

Emine Elif Nebati, Gülser Narin Sağanda, Hayriye Erol, Sümeyye Reyhan Subaşı, Tuğçe Esmâ Göz

582-590

Gıda Mühendisliği / Food Engineering

Gıdalardan biyoaktif bileşiklerin ekstraksiyonunda derin ötektik çözücülerin kullanımı (Derleme Makalesi)

Utilization of deep eutectic solvents in the extraction of bioactive compounds from food materials (Review Article)

Naciye Kutlu, Merve Silanur Yılmaz, Aslı İşci, Özge Şakıyan

591-597

Some physicochemical, rheological and sensory properties of flavored ice cream (Research Article)

Aromalı dondurmaların bazı fizikokimyasal, reolojik ve duyuşsal özellikleri (Araştırma Makalesi)

Bedia Şimşek, İlhan Gün

598-605

Some physicochemical, textural properties and acrylamide contents of chips produced from the teleme of white cheese (Research Article)

Beyaz peynir telemesinden üretilen cipslerin fizikokimyasal, tekstürel özellikleri ve akrilamid içerikleri (Araştırma Makalesi)

Sümevra Uğur, Bedia Şimşek

606-614

İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering

Modeling approach for estimation of ultimate load capacity of concrete-filled steel tube composite stub columns based on relevance vector machine (Research Article)

Beton-dolgu çelik tüplü kompozit kısa kolonların nihai yük taşıma kapasitesinin ilgililik vektör makinesine dayalı tahmini için modelleme yaklaşımı (Araştırma Makalesi)

Çiğdem Avcı Karataş

615-626

Yapay sinir ağları ile Marshall stabilite değerinin tahmini (Araştırma Makalesi)

Evaluation of RC shear walls in terms of different construction materials (Research Article)

Recep Koray Kıyıldı

627-633

Silindirik beton numunelerde boy/çap oranı değişiminin basınç dayanımına etkisi (Araştırma Makalesi)

The effect of length/diameter ratio change of cylinder concrete specimens on compressive strength (Research Article)

Uğur Durak

634-639

Kaolin esaslı geopolimer harçlarda silis dumanı ve mikro SiO₂ katkısının dayanım özellikleri üzerine etkisi (Araştırma Makalesi)

The effect of silica fume and micro SiO₂ additive on the strength properties in kaolin based geopolymer mortars (Research Article)

Mehmet Kaya

640-647

Mevcut okul türü bir binanın deprem performansının 2007 ve 2018 deprem yönetmeliklerine göre değerlendirilmesi (Araştırma Makalesi)

An evaluation on seismic performance of an existing school building according to the 2007 and 2018 Turkish Seismic Codes (Research Article)

Mehmet Yalın, Hakan Ulutaş

648-661



İnşaat sektöründe oluşan iş değişikliği taleplerini azaltacak bir proje yönetim sistemi önerisi (Araştırma Makalesi)

A project management system proposal to reduce change orders in the construction industry (Research Article)

Betül Temel, Gürkan Emre Gürcanlı, Senem Bilir Mahçiçek

662-673

Dönel kavşaklarda meydana gelen dengesiz akımlara bir çözüm önerisi olarak kısmi denetimli sinyalizasyon dönel kavşaklar: Bir literatür araştırması (Derleme Makalesi)

Roundabout metering as a solution proposal to roundabouts with unbalanced flows: A literature study (Review Article)

Hakan Ordu, Ufuk Kırbaş

674-683

Coğrafi bilgi sistemleri ile Niğde-Kayseri arası hızlı tren hattı önerisi ve maliyet değerlendirilmesi (Araştırma Makalesi)

High speed rail route proposing using GIS and evaluation of approximate cost between Niğde-Kayseri (Research Article)

Yusuf Kağan Demir, Murat Çoşkun

684-694

Mansapta trapez daralma olması durumunda baraj yıkılması taşkın dalgası yayılımının sığ su denklemleri ile modellenmesi (Araştırma Makalesi)

Modelling of dam break flood wave propagation in case trapezoidal contraction on downstream using SWEs (Research Article)

Selahattin Kocaman, Kaan Dal, Ada Yılmaz

695-703

Bacillus sp. ile iyileştirilmiş zeminlerin donma çözülme etkisindeki davranışı (Araştırma Makalesi)

The behavior of Bacillus sp. improved soils under freeze-thaw effect (Research Article)

Baki Bağrıaçık, Fatıma Masume Uslu, Esra Sunduz Yiğittekin, Anıl Delik, Sadık Dinçer

704-711

Kimya Mühendisliği / Chemical Engineering

Ağır metal iyonlarının tarımsal atıklar ile biyosorpsiyonunun araştırılması (Araştırma Makalesi)

Investigation of biosorption of heavy metal ions by the agricultural wastes (Research Article)

Elif Hatice Gürkan

712-722

Kavun çekirdeği pirolizine ait kinetik parametrelerin ve termodinamik özelliklerin belirlenmesi (Araştırma Makalesi)

Determination of kinetic parameters and thermodynamic properties of melon seed pyrolysis (Research Article)

Korkut Açıkahn, Güzde Gözke

723-736



Maden Mühendisliği / Mining Engineering

Garp linyitleri işletmesi (GLİ) Tunçbilek göletlerinde bulunan tesis artıklarının karakterizasyonu (Araştırma Makalesi)

Characterization of the waste materials in the ponds of western lignite company (WLC) at Tunçbilek (Research Article)

Nezihat Ediz, Sevgi Karaca, Oktay Şahbaz, İ. Göktay Ediz, Ali Uçar

737-745

Alçıtaşı üretiminde delme – patlatma yöntemi yerine mekanik kazı yönteminin kullanılabilirliğinin araştırılması (Araştırma Makalesi)

Investigation of the usability of mechanical excavation method instead of the drilling-blasting method in the production of gypsum (Research Article)

Ramazan Çomaklı

746-752

Makine Mühendisliği / Mechanical Engineering

PV-T Kollektör kaynaklı bir ısı pompası sisteminin enerji ve ekserji analizi (Araştırma Makalesi)

Energy and exergy analysis of a PV-T collector welded heat pump system (Research Article)

Mehmet Altınkaynak, Recep Demirekin, Ali Kemal Yakut

753-762

YLD 2000 akma fonksiyonu parametrelerinin belirlenmesinde ardışık kuadratik programlama ve aktif set metodlarının performanslarının incelenmesi (Araştırma Makalesi)

Investigation of performances of sequential quadratic programming and active-set methods in the determination of YLD2000 yield function parameters (Research Article)

Bora Şener

763-769

CETP kompozitlerin ağaç matkabıyla delinme performanslarının deneysel incelenmesi (Araştırma Makalesi)

Experimental investigation of CETP composites with wooden drilling performance (Research Article)

Murat Koyunbakan, Ali Ünüvar, Volkan Eskizeybek, Ahmet Avcı

770-776

An experimental study on interlaminar shear strength and fracture toughness: Carbon fiber reinforced epoxy composites enhanced with the CaCO₃ nanoparticles (Research Article)

Tabakalararası kayma mukavemeti ve kırılma tokluğu üzerine deneysel bir çalışma: CaCO₃ nanoparçacıkları ile iyileştirilmiş karbon fiber takviyeli epoksi kompozitler (Araştırma Makalesi)

Halil Burak Kaybal

777-783

Finite element stress analysis of three-stage gearbox (Research Article)

Üç kademeli bir dişli kutusunun sonlu elemanlar ile gerilme analizi (Araştırma Makalesi)

Mehmet Sarıtaş, Özgür Gölbol, Paşa Yayla

784-790



A similarity approach to boundary layer equations of a non-Newtonian fluid: Carreau-Yasuda model (Research Article)

Bir non-Newtonyen akışkanının sınır tabakası denklemleri için benzerlik yaklaşımı: Carreau-Yasuda modeli (Araştırma Makalesi)

Yiğit Aksoy, Hikmet Sümer, Kıvanç Samra

791-799

Hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerine ve darbe davranışına fonksiyonelleştirilmiş nanokil ilavesinin etkisi (Araştırma Makalesi)

The effect of functional nanoclay addition on the mechanical properties and impact behavior of hybrid composites (Research Article)

Ümran Esendemir, Recep Şimşek, Mehmet Fahri Saraç

800-806

Modeling of heat transfer around a square and a circle: A novel ANN-based approach (Research Article)

Kare ve yuvarlak silindir etrafındaki ısı transferinin modellenmesi: Yeni YSA temelli bir yaklaşım (Araştırma Makalesi)

Özge Yetik

807-814

Prediction of Yoshida Uemori model parameters by the bees algorithm and genetic algorithm for 5xxx series aluminium alloys (Research Article)

5xxx serisi alüminyum alaşımları için Yoshida Uemori model parametrelerinin arı algoritması ve genetik algoritma ile tahmini (Araştırma Makalesi)

Habip Gökay Korkmaz, Serkan Toros, Mete Kalyoncu

815-823

Shape modification of Ahmed body to reduce drag coefficient and determination of turbulence model (Research Article)

Ahmed modelinin sürüklenme katsayısını azaltmak için şekil modifikasyonu ve türbülans modelinin belirlenmesi (Araştırma Makalesi)

Ahmet Şumnu

824-832

Effect of attack angle on the flow around adjacent circular and rectangular prisms (Research Article)

Hücum açısının temas halinde dairesel ve dikdörtgen prizma etrafındaki akış üzerine etkisi (Araştırma Makalesi)

Mehmet Seyhan, Mustafa Sarıoğlu, Yahya Erkan Akansu

833-839

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği / Metallurgical and Materials Engineering

Electrospun polyvinylpyrrolidone / graphite composite nanofiber mats: Effect of the filler on the morphology and wettability (Research Article)

Elektroçirilmiş polivinilpirolidon / grafit kompozit nanofiber keçeler: Katkının morfoloji ve ıslanabilirlik üzerine etkisi (Araştırma Makalesi)

Şerife Akkoyun

840-846



Stab and ballistic performances of aramid fabrics impregnated with silica based shear thickening fluids

(Research Article)

Silika esaslı kayma ile kalınlaşan sıvı emdirilmiş aramid kumaşların darbe ve balistik performansları (Araştırma Makalesi)

Oylum Çolpankan Güneş, Sema Yıldız, Mehmet Deniz Güneş, Fikret Şenel,

Metin Tanoğlu

847-854

Diğer / Other

Assessment of hazards and risks in glass products production and processing business during the pandemic

(Research Article)

Pandemi sürecinde cam ürünleri üretim ve işleme işletmelerinde tehlike ve risklerin değerlendirilmesi (Araştırma Makalesi)

İhsan Ateş, Serdar Salman, Yahya Bozkurt

855-865

Covid-19 ile mücadelede bitkilerin olası rolü (Derleme Makalesi)

The possible role of plants in combating Covid-19 (Review Article)

Begüm Güler, Meltem Bayraktar, Aynur Gürel

866-880



Sosyal medyada otomatik halk sağlığı takibi: Güncel bir derleme

Automatic public health monitoring on social media: A recent survey

Doğan Küçük^{1,*} , Nursal Arıcı² , Emine Ela Küçük³ 

^{1,2} Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 06500, Ankara Türkiye

³ Giresun Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, Hemşirelik Bölümü, 28340, Giresun, Türkiye

Özet

Yaygın hastalıklar ve salgınlar gibi halk sağlığını durumlarının otomatik olarak belirlenerek takip edilmesi, güncel ve önemli bir araştırma problemidir. Günümüzde, sosyal medya metinleri analiz edilerek halk sağlığı takibi yapılabilmekte, toplumun sağlıkla ilgili eğilimleri ve algıları belirlenebilmektedir. Literatürde bu konularda gerçekleştirilmiş çalışmaların sayısı da hızla artış göstermektedir. Bu çalışmamızda, sosyal medya üzerinde halk sağlığı ile ilgili içerikleri tespit eden ve halk sağlığı takibi yapan çalışmaların güncel bir derlemesi sunulmaktadır. Söz konusu çalışmalar; salgınlar, hastalıklar, tıbbi gelişmeler, aşılar ve tamamlayıcı/alternatif tıp gibi halk sağlığı ile ilgili tüm konuları hedef alabilmektedir. Derlememizde, sosyal medyada otomatik halk sağlığı takibi konusundaki güncel çalışmalar alt konularına göre sınıflandırılarak sunulmuş olup, ilgili dijital kaynakları listelenmiş ve ayrıca ileri çalışma konularına yer verilmiştir. Derlememizin, sağlık bilişimi konusunda hem teorik hem de uygulamaya yönelik önemli bir kaynak olarak ilgili araştırmacı ve uzmanlara hizmet etmesi beklenmektedir.

Anahtar kelimeler: Halk sağlığı takibi, Sağlık bilişimi, Sosyal medya analizi, Makine öğrenmesi, Derin öğrenme

1 Giriş

Günümüzde tıp ve biyoloji alanları, bilgisayar bilimlerinin çeşitli alt alanları bünyesinde sunulan teknolojilerden olabildiğince faydalanmaktadır. Örneğin, görüntü işleme (image processing) ve bilgisayarlı görü (computer vision) teknolojileri kullanılarak tıbbi görüntüler otomatik olarak incelenerek çıkarımlar yapılabilmekte, biyoformatik alanında çok çeşitli veri analizi ve makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak büyük boyutlu veriler analiz edilebilmektedir.

Tıp ve biyoformatik alanları için önem teşkil eden bir diğer yaklaşım da metin biçimindeki verilerin otomatik analiz edilmesidir. Örneğin; tıbbi raporlar ve dokümanlar dijital ortama aktarılabilmişse, bu veriler işlenerek bunların içinden anlamlı veriler otomatik olarak çıkarılabilmektedir.

Halk sağlığı, tıbbin alt alanlarından biridir ve bu alt alanda halk sağlığı takibi (public health monitoring), elektronik sağlık raporları gibi resmi veriler üzerinde otomatik şekilde yapılabildiği gibi [1]; internet ortamındaki siteler, forumlar, arama motorlarının arama geçmişleri ve

Abstract

Automatic detection and monitoring of public health events and phenomena, like common diseases and epidemics, is an important research problem. Today, public health monitoring can be performed automatically on social media and health-related trends and perceptions of the society can be determined by analyzing social media texts. Related studies performed on these topics are increasing. In this study, a recent survey of the studies that detect public health related content on social media and that perform public health monitoring, is presented. Related studies can target at any public health related topics including epidemics, diseases, medical advances, vaccines, and complementary/alternative medicine. In our survey, those studies on automatic public health monitoring on social media are presented after they are categorized by their sub-topics, related digital resources are listed, and additionally, future research topics are included. It is expected that our survey will serve as an important theoretical and application-oriented resource for related researchers and experts.

Keywords: Public health monitoring, Health informatics, Social media analysis, Machine learning, Deep learning

sosyal medya uygulamaları (sosyal ağlar) kullanılarak da yapılabilmektedir. Örneğin, arama motorlarında kullanılan arama terimlerinin sıklığı kullanılarak hastalık takibi yapılabilmektedir. Bu alanda Google Flu Trends (GFT) gibi bazı Web servisleri hatalı sonuçlar vererek başarısız olmuşsa da, hatalarının düzeltilebilir nitelikte olduğu ve bu tip teknolojilerin sonuçlarının geleneksel hastalık takibi yöntemleriyle birleştirildiğinde, tek başına geleneksel yöntemlerden daha başarılı sonuçlar verdiği ilgili çalışmalarda gösterilmiştir [2].

Arama motorlarının tespit ettiği arama desenleri dışında; Twitter, Facebook, Instagram ve Reddit gibi sosyal medya metinlerinin de otomatik incelenerek hastalık, salgın gibi halk sağlığı konularının takibinin yapılması konusunda oldukça fazla sayıda ve güncel akademik yayın yapılmaktadır. Özellikle Twitter, sözü edilen akademik çalışmalarda en yaygın kullanılan sosyal medya sitelerindedir [3]. Hem arama motorları hem de sosyal medya siteleri ticari uygulamalar oldukları için bu

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: dogan.kucuk@gazi.edu.tr (D. Küçük)

Geliş / Received: 13.08.2020 Kabul / Accepted: 06.01.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.778948

kanallardan toplanan verilerin gerçeği birebir yansıtmayacağı ifade edilmekte, sosyal medyanın ayrıca gerçek olmayan bilgilerin yayılması ve toplumun belirli konulara yönlendirilmesi için kötüye kullanıldığı da bilinmektedir [2]. Bununla birlikte, sosyal medyanın halk sağlığı takibi ve tahmininde oldukça önemli bir veri kaynağı olduğu da belirtilmektedir.

Dünyanın çeşitli bölgelerinde dönem dönem yaygın olarak grip (influenza), Ebola ve Severe Acute Respiratory Syndrome (SARS) gibi salgınlar görülmekte ve bu salgınlar çok ciddi problemlere neden olmakta, çok fazla sayıda insanın hayatını etkilemektedir. Son olarak, 2019 yılı sonunda ortaya çıkan ve 2020 yılının ilk yarısında tüm dünyayı çarpıcı şekilde etkisi altına alan yeni koronavirüs (Covid-19) salgını, halk sağlığı alanının önemini bir kez daha ortaya çıkarmıştır. Salgın tüm dünyayı sosyal ve ekonomik açıdan derinden etkilemiştir, etkileri de halen devam etmektedir. Sosyal medya üzerinde halk sağlığı takibinin özellikle bu gibi salgın durumlarında toplumlar ve devletler tarafından önlemlerin vakitlice alınması açısından önemli bir araç olarak işlev görebilmektedir. Chen vd., Covid-19 konusundaki herkese açık Twitter iletilerinden oluşan veri kümesini oluşturmuş ve tanıtmıştır. Bu çalışmada Türkçe dâhil 9 dilde Covid-19 hakkındaki iletiler derlenmiştir. Ancak salgının etkilerinin uzunca bir süre devam edeceği tahmin edildiğinden Covid-19 takibi konusunda bundan sonra da sosyal medyanın yaygın olarak akademik amaçlarla kullanılabilirliği öngörülmektedir [4]. Sosyal medya dışında, akademik metinler içinde Covid-19 salgınıyla ilgili kavramları otomatik tespit eden sistem önerileri de mevcuttur [5].

Şu noktayı önemle belirtmek gerekir: literatürde otomatik halk sağlığı takibi ile yakın anlama sahip veya halk sağlığı takibi dâhil başka adımları da içeren daha kapsamlı süreçleri ifade eden ilgili birçok terim mevcuttur. Bu terimler arasında halk sağlığı sürveyansı (public health surveillance)¹, sendromik sürveyans (syndromic surveillance), hastalık takibi (disease monitoring), hastalık sürveyansı (disease surveillance), salgınsal zekâ (epidemic intelligence), epidemiyoloji bilişimi (epidemiology informatics), dijital epidemiyoloji (digital epidemiology), sağlık takibi (health monitoring) ve sağlık sürveyansı (health surveillance) sayılabilir.

Bu çalışmamızda, sosyal medya iletileri kullanılarak halk sağlığı takibi konusunda yapılmış güncel çalışmalar derlenmiştir. Söz konusu çalışmalar, 2013-2020 yılları arasında yayınlanmış ilgili yayınlardan oluşmaktadır.

Bu çalışmanın geri kalanının yapısı aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir: 2. Bölümde genel olarak halk sağlığı ve sosyal medya ilişkisi konusundaki genel kapsamlı ve güncel çalışmalardan bahsedilmiştir. 3. Bölümde ise sosyal medyada otomatik halk sağlığı takibi konusunda yapılmış çalışmalar sınıflandırılarak sunulmuştur. Biz bu

çalışmamızda, çalışmaları konularına göre sınıflandırmayı tercih ettik ve ilgili bölümü bu sınıflandırmaya uygun olarak alt bölümlere ayırdık. Burada, şunu da belirtmek gerekir ki, ilgili çalışmaların çok büyük bir kısmı Twitter üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yani, sosyal medya türüne göre bir sınıflandırma yapılacak olursa Twitter üzerinde yapılmış çalışmaların sıklığının diğerlerine göre oldukça fazla olduğu görülecektir. Bu durumun, Twitter'ın diğer sosyal medya sitelerine (Facebook ve Instagram gibi) göre daha çok metin temelli olarak kullanılmasına dayandırılabilirliği düşünülmektedir. 4. Bölümde ilgili yayınlarda kullanıldığı belirtilen alana özgü dijital kaynaklar (sözlükler ve ontolojiler gibi), 5. Bölümde ise ileri çalışma konularından bahsedilmektedir. Son olarak, 6. Bölümde çalışmamızın sonuçları özet şeklinde verilmiştir.

2 Halk sağlığı ve sosyal medya

Halk sağlığı takibi geleneksel olarak resmi kaynaklara dayanılarak yapılmaktadır. Bu süreçte resmi klinik raporlardaki veriler kullanılmaktadır. Ancak sosyal medyanın özellikle son 10 yılda kullanımının çok fazla yaygınlaşmasıyla birçok alanda başarıyla kullanıldığı görülmüştür. Bu nedenle, sosyal medyanın halk sağlığı takibi ve tahmininde de kullanılabilirliği; geleneksel yöntemlere kıyasla sosyal medyadan daha kısa süreler içinde karar alıcıların kullanabileceği çıkarımlar elde edilebileceği öngörülmüştür [6]. Zhou vd. tarafından yayınlanan çalışmada; sosyal medyanın sağlık bilgi yönetiminde kullanımı üzerinde durulmuş, sosyal medyanın hem hasta-doktor ilişkilerini ve iletişimini iyileştirebileceği hem de yeni tıbbi bilgilerin yayılmasını ve keşfini olumlu yönde etkileyeceği belirtilmiştir [7].

Bu konuyla ilgili özellikle vurgulanması gereken bir konu, söz konusu sosyal medya iletilerinin biçimlendirilmiş değil doğal dilde ifadeler olması, dolayısıyla dillere özgü olarak alana özel terimlerin ekler alıp yapılarının değişebileceği, ayrıca sosyal medya iletilerinde dillerin yazım kurallarına riayet edilmeyip resmi olmayan günlük konuşma dilindeki ifadelerin kullanılabilmesidir. Bu durum da, metin-tabanlı diğer diğer sosyal medya analizi problemlerinde olduğu gibi, sistemlerin başarımlarını etkileyen önemli bir faktördür ve birçok çalışmada ifade edilmiştir [8, 9].

Twitter iletileri üzerinde çok çeşitli halk sağlığı konuları (27 tane) dikkate alınarak gerçekleştirilen dilbilimsel analize dayalı bir çalışmada [10], bu tip sosyal medya tabanlı bir yöntemin mevcut geleneksel yöntemleri tamamlayıcı nitelikte olduğu ve bu nedenle mevcut yöntemlerle beraber kullanılabilirliği belirtilmiştir.

Twitter ve halk sağlığı takibinin ilişkili konularından birisi de halk sağlığı konusunda ilgili karar vericilere Twitter yoluyla bilgi sağlanmasıdır. Kapp vd.'nin çalışmasında sağlıkla ilgili bilim insanlarının Twitter yoluyla bilimsel

¹ Halk sağlığı sürveyansı (halk sağlığı gözetimi); halk sağlığı takibini de kapsayan aktif bir süreç olarak tanımlanmaktadır. Halk sağlığı sürveyansında, halk sağlığı takibi dışında, sağlıkla ilgili verilerin analiz edilerek yorumlanması ve bu yolla halk sağlığı problemlerinin çözülmesi adımları da yer almaktadır. Bizim derleme çalışmamızda ele alınan çalışmaların bir kısmı takip

dışında analiz süreçlerini de içerseler de, genel olarak halk sağlığı sürveyansından çok halk sağlığı takibine yakın olduklarından, çalışmamızın halk sağlığı takibi konulu çalışmaların bir derlemesidir demek daha yerindedir. Bu nedenle çalışmamız boyunca, daha uygun bir ifade olan *halk sağlığı takibi* ifadesi kullanılmıştır.

sonuçlarını yayınlamaları ve bunların halk sağlığının karar vericilerine bu yolla ulaştırılması konusuna dikkat çekilmiştir [11].

Phan vd. sağlıkla ilgili sosyal medya sitelerinde insanların davranışlarını tespit edebilmek için derin öğrenme tabanlı bir yaklaşım sunmuşlardır. Söz konusu derin öğrenme yaklaşımına yazarları “Sosyal Kısıtlı Boltzmann Makinesi” adını vermişlerdir [12]. Grover vd. ise sağlıkla ilgili teknolojilerin Twitter iletileri üzerinde ne şekilde tartışıldığı konusunu araştırmıştır. Çalışmada; Twitter’da hangi sağlık teknolojilerinin tartışıldığı, hangi türdeki hastalıkların Twitter’da daha çok ifade edildiği, çeşitli hastalıkların hangi çözümlerle ilişkilendirildiği soruları konu edilmiştir [13].

Halk sağlığı için sosyal medya dâhil dijital kaynakların veri kaynağı olarak kullanılması ve ayrıca da yine halk sağlığı için yapay zekâ algoritmalarının kullanımı konularında yapılmış kapsamlı derleme (survey) çalışmalar da mevcuttur.

İlgili bir çalışmada, sosyal medyanın halk sağlığı takibi için geleneksel yöntemlerin yerini asla alamayacağı ancak tamamlayıcı bilgiler sağlayacakları ifade edilmektedir. Çalışmada ayrıca; sosyal medyanın hastalık ve salgın takibinde, hastalık ve salgınların tahmininde, salgın gibi kriz zamanlarında insanların temiz su ve ilaç gibi ihtiyaçlarını ifade etmede önemli roller oynayacağı belirtilmiştir [14].

Fang vd. tarafından hazırlanan derleme çalışmasında büyük veri işleme problemleri de dikkate alınarak sağlık bilişimi (health informatics) konusundaki makaleler derlenmiştir. Bu çalışmada, sağlık bilişimi, hastaların sağlığını tahmin edebilmek için birçok farklı sağlık alanından bilgi ve iletişim teknolojilerini kullanarak veri toplayan; tıp, biyotıp, hemşirelik ve bilgisayar bilimleri alanlarına dayanan multi-disipliner bir alan olarak tanımlanmıştır [15].

İlgili bir tez çalışmasında, sosyal medyada sağlıkla ilgili bilgi çıkarımı problemlerinde makine öğrenmesi ve derin öğrenme yaklaşımlarının etkinliği araştırılmıştır [16].

Ravi vd. tarafından yayınlanan çalışmada, sağlık bilişimi için derin öğrenme (deep learning) yöntemlerini kullanan akademik çalışmalar derlenmiştir [17]. Derin öğrenme, makine öğrenmesinin bir alt türü olmakla birlikte, klasik makine öğrenmesine göre daha fazla soyutlama katmanı kullanarak verinin üzerinde birden çok soyutlama seviyesinde temsilini sağlayan, ayrıca da genellikle klasik makine öğrenmesi yöntemlerine göre çok daha yüksek başarımla öğrenmeyi sağlayan yöntemlerdir [18-19]. Yine derin öğrenme algoritmalarını resmi sağlık kayıtları halk sağlığı takibi için kullanan çalışmalar üzerine bir derleme de Yao vd. tarafından yapılmıştır [1]. Joshi vd.’nin derleme çalışmasında metin biçimindeki (resmi veya Web üzerindeki) verilerden salgın tespiti konulu çalışmalar dikkate alınmıştır. Söz konusu derlemede, ilgili çalışmalar iki gruba ayrılmıştır: büyük boyutlu verilerden sağlıkla ilgili alt kümeleri tespit etmeyi konu alanlar ve sağlıkla ilgili olduğu belirlenmiş metinlerden salgın tahmini yapanlar [20].

Rabarison vd. Twitter’ın halk sağlığı kurumları ve toplum arasında çift yönlü iletişim için kullanılabilirliği konusunu irdelemişlerdir [21].

Guidry vd., sağlıkla ilgili kuruluşların Ebola ve Ebola salgını ile ilgili Twitter iletilerini ve bunlara karşı toplumun yanıtlarını incelemişlerdir. Çalışmada sosyal medya iletileri incelenen kuruluşlar ABD’nin Hastalık Kontrol ve Önleme Merkezleri (Centers for Disease Control and Prevention - CDC), Dünya Sağlık Örgütü (World Health Organization - WHO) ve Sınır Tanımayan Doktorlar’dır (Médecins Sans Frontières - MSF) [22].

Jordan vd., Twitter üzerinde 2010-2017 tarihleri arasında yapılan halk sağlığı takibi ve tahmini konularındaki çalışmaları derleyerek sunmuşlardır [23].

Özetlemek gerekirse; sosyal medyanın halk sağlığında birçok farklı kullanım alanı mevcuttur. Bu alanlar arasında; halk sağlığı takibi ve tahmini, halk sağlığı kurumları ve toplum arasında gerekli etkileşimi sağlama (hastalara ve topluma yönelik etkili sağlık iletişimi), bireylerin sağlık riskleri ve daha iyi yaşam tarzı seçenekleri gibi konularda bilgilendirilmesi ile söz konusu sağlık risklerinin azaltılması ve ortadan kaldırılması için gerekli davranış ve motivasyonları sağlama sayılabilir.

Bizim güncel derleme çalışmamız, 2013-2020 tarihleri arasında yayınlanmış sosyal medya üzerinde halk sağlığı takibi konulu çalışmaları hedeflemiştir. Literatürdeki ilgili derleme çalışmalarından şu ölçütlerden biri veya daha fazlası yönüyle farklılık göstermektedir: (i) derlememizde sadece Twitter ile sınırlı kalmamış, genel olarak sosyal medya iletileri üzerinde yapılan güncel çalışmalar derlenmiştir, (ii) çalışmaları sınıflandırma şeklimiz kendimize özgü (Şekil 1) ve farklıdır, (iii) diğer derlemelerle bizim derlememizin dikkate aldıkları çalışmalar farklı zaman aralıklarına aittir, dolayısıyla farklılık göstermektedir.

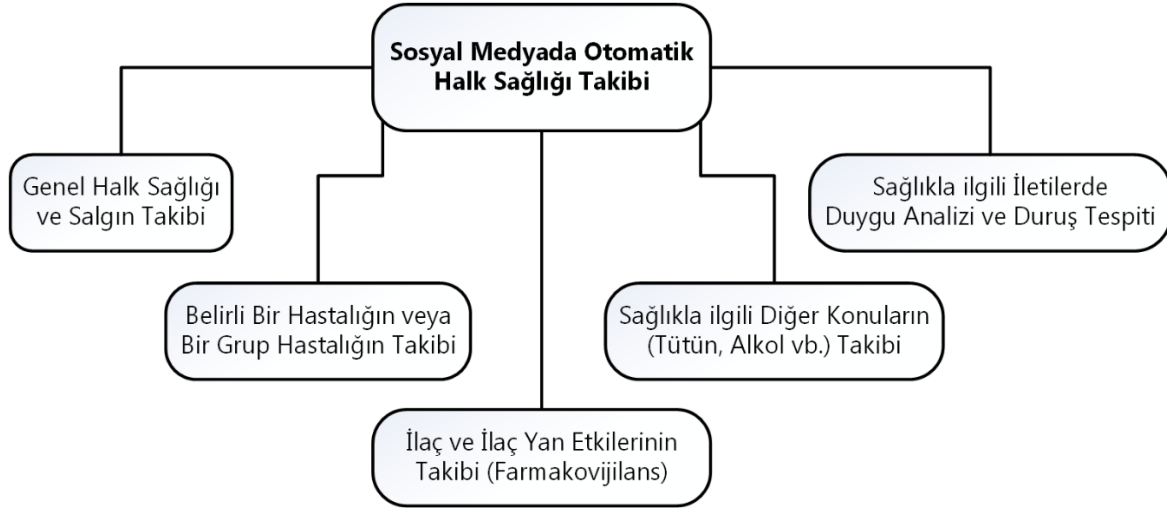
3 Sosyal medyada otomatik halk sağlığı takibi

Derlememizin kapsamına giren ilgili çalışmalar, daha önce belirtildiği gibi 2013-2020 yılları arasında yayınlanmışlardır. Bu çalışmalar, dikkate aldıkları alana özgü konuya göre sınıflandırılmışlardır. Şekil 1’de bu sınıflandırma görsel olarak verilmiş, bu bölümün aşağıdaki alt bölümlerinde de alt sınıflara ait çalışmalar tanıtılmıştır. Tanıtılan bu çalışmalar özet olarak bu bölümün sonunda Tablo 1’de sunulmuştur. Yine bu bölümün sonunda, bölüm içinde tanıtılan bu çalışmaların yayın yıllarına göre dağılımı çubuk grafik olarak Şekil 2’de verilmiştir. Bu çubuk grafik incelendiğinde, çok genel bir ifadeyle, ilgili yayınların son yıllarda artış gösterdiği gözlenebilmektedir. Ayrıca güncel Covid-19 salgını nedeniyle, bu artışın 2020 ve 2021 yıllarında devam edeceği beklenmektedir.

3.1 Genel halk sağlığı ve salgın takibi

Twitter iletileri üzerinde halk sağlığı takibi için Parker vd. mevcut Twitter veri kümelerini ve Twitter iletilerindeki sık kelime gruplarını filtrelemek için Wikipedia’yı kullanarak bir altyapı önermiştir [24]. Yine konuyla ilgili olarak Velardi vd. tarafından anahtar kelime tabanlı bir yaklaşım tanıtılmıştır. Söz konusu çalışmada önce hastaların terminolojisi öğrenilmiş, ardından belirti tabanlı bir yaklaşımla Twitter üzerinde halk sağlığıyla ilgili iletilerin sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir [8].

Zhao vd.’nin ilgili bir çalışmasında [25] salgın takibi ve salgının mekânsal ve zamansal olarak gerçek-zamanlı



Şekil 1. Otomatik halk sağlığı takibi konulu güncel çalışmaların konularına göre sınıflandırılması

şekilde modellenmesi için derin öğrenme tabanlı bir yaklaşım sunulmuştur. Simnest adı verilen söz konusu altyapı çok katmanlı algılayıcı (MultiLayer Perceptron - MLP) algoritmasına dayanmaktadır.

Türkçe Twitter iletilerinin halk sağlığı ile ilgili olup olmadıklarını, çalışma kapsamında geliştirilen Türkçe halk sağlığı ontolojisini kullanarak tespit eden bir çalışmayı Küçük vd. sunmuştur [9]. Söz konusu çalışmada kullanılan ve hastalık, hastalık belirtileri ve yan etkileri gibi birçok halk sağlığı terimini içeren ontoloji ayrıca internetten açık olarak erişilebilir hale getirilmiştir.

Choi vd. tarafından gerçekleştirilen çalışmada [26] Kore’de yaşanan 2015 yılının Mayıs ve Temmuz ayları arasında yaşanan ve MERS-CoV adlı virüsün sebep olduğu Middle East Respiratory Syndrome (MERS) adlı hastalığın salgını konu edilmiştir. Bu çalışmada, kitle iletişim araçları ile sosyal medya verilerine dayanılarak halkın bu bulaşıcı hastalık salgınına karşı duygusal tepkileri makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir.

Sarker vd. ise “Sağlık için Sosyal Medya Madenciliği – Social Media Mining for Health (SMM4H) 2017” başlıklı yarışmanın ayrıntılarını tanıtmıştır. Bu yarışmada tıpla ilgili metin sınıflandırma ve kavram normalizasyonu için veri kümeleri ile makine öğrenmesi ve derin öğrenme tabanlı farklı yaklaşımlar sunulmuştur [27].

Tutubalina vd. tarafından yapılan çalışmada, Twitter iletilerinde bahsi geçen tıbbi kavramların normalizasyonu için derin öğrenme (Recurrent Neural Network - RNN) tabanlı bir yaklaşım tanıtılmıştır [28].

Bir diğer çalışmada, bulaşıcı hastalıkların tespiti için istatistiksel bir yaklaşım ile Twitter’in anomali ve ani ortaya çıkış tespit algoritmaları karşılaştırılmıştır [29].

Twitter iletilerinden hastalık isimlerini tespit eden bir diğer çalışmada ontoloji kullanan ve derin öğrenme yaklaşımına dayalı bir yöntem tanıtılmıştır [30].

Jiang vd.’nin ilgili çalışmasında [31] insanların sağlıkla ilgili Twitter iletilerinin tespiti için derin öğrenme (Long Short-Term Memory - LSTM) tabanlı bir yöntem anlatılmıştır. Yine halk sağlığıyla ilgili Twitter iletilerini belirlemek için, metin ayrıştırmaya (parsing) dayalı

sözlüksel-sözdizimsel (lexico-syntactic) desenler gibi doğal dil işleme yöntemlerini kullanan güncel çalışmalar da mevcuttur [32].

Twitter üzerinde salgınların ortaya çıkışının tespit eden, bu amaçla Twitter iletileri üzerinde derin öğrenme tabanlı sınıflandırma yapan SENTINEL adlı güncel bir salgın takip sistemi Şerban vd. tarafından geliştirilmiş ve tanıtılmıştır. Sistemde ayrıca salgınlarla ilgili haber makalelerine de yer verilmektedir [33].

Khatua vd.’nin çalışmasında, Twitter iletileri ve PubMed makale özetleri üzerinde salgın tespiti yapmak amacıyla kelime vektörleri (word vectors) ve bir ağaç sınıflayıcısı kullanılmıştır. Çalışmada denemeler 2014 Ebola ve 2015 Zika salgınlarına ait veriler kullanılmıştır [34].

Daha güncel çalışmaların genellikle Covid-19 salgını ile ilgili olduğu gözlenmektedir.

İlgili güncel çalışmalardan biri olan Calamusa vd.’nin çalışmasında, Türkçe’ye “bilgi salgını” olarak çevrilebilecek “infodemic” terimi tanımlanmıştır [35]. Özellikle Covid-19 salgını ile yaygın kullanılmaya başlanan bu terim, bilginin istenmeyen ve mantıklı olmayan sonuçlara neden olacak şekilde kontrolsüz bir biçimde yayılması anlamında kullanılmaktadır [35]. Bu çalışmada, İtalya’da özellikle 21 Şubat’tan itibaren Twitter verileriyle kendini gösteren bir bilgi salgınının (infodemic) yayıldığı belirtilmektedir [35].

Guntuku vd.’nin çalışmasında Covid-19 salgını döneminde insanların Twitter üzerindeki paylaşımlarında akıl sağlığı ile ilgili (stres, endişe, gelecek kaygısı gibi) ve Covid-19 belirtileriyle ilgili bilgiler incelenmiştir ve istatistikler çıkarılmıştır [36].

Jahanbin ve Rahmanian’ın çalışmasında, Twitter üzerinde Covid-19 salgını ile ilgili iletilerin otomatik sınıflandırılması için bulanık kural-tabanlı evrimsel (fuzzy rule-based evolutionary) bir yaklaşım kullanılmıştır [37].

Kaur vd.’nin çalışmasında ise Covid-19 salgını hakkındaki Twitter iletileri üzerinde duyguların tespitine yönelik testlerin sonuçların sunulmuştur [38]. Çalışmanın amacının, insanların bu tipte bir salgın durumundaki duygularındaki değişimlerin izlenmesi olduğu ifade edilmiştir [38].

Covid-19 salgını ile ilgili Twitter iletilerinde popüler kelime ve kelime grupları ile yine bu iletiler üzerinde duygu analizi gerçekleştirilen bir çalışma Xue vd. tarafından sunulmuştur [39]. Çalışmada Latent Dirichlet Allocation (LDA) adlı bir makine öğrenmesi algoritması kullanılmıştır [39].

Zhang vd. ise Covid-19 salgını döneminde artış gösteren depresyon konulu Twitter iletilerinden oluşan geniş bir veri kümesi tanıtmış, derin öğrenme yöntemleri kullanılarak Twitter'da depresyon takibi yapılabileceğini ifade etmiştir [40]. Çalışma sonucunda, iletilerde Covid-19 ile ilgili referanslar arttıkça, depresyon ile ilgili ifadelerin de arttığı gözlemlenmiştir [40].

3.2 Belirli bir hastalığın veya bir grup hastalığın takibi

Grip (influenza) ve alt türleri (kuş gribi, domuz gribi) sıklıkla sosyal medya üzerinde takip edilen bir hastalıktır. Lee vd. tarafından sunulan çalışmada, Twitter üzerinde grip ve kanser takibi için mekansal, zamansal ve metin madenciliği gerçekleştiren ve gerçek-zamanlı olarak analiz sonuçlarını raporlayan bir sistem geliştirilmiştir [41].

Twitter üzerinden halk sağlığı takibi konusunda, özellikle de HIV takibi için Twitter'ın kullanılması konusunda Stoové ve Pedrana'nın görüşleri ilgili çalışmalarında sıralanmıştır. Çalışmada, sosyal medyanın diğer geleneksel verilerle birlikte kullanılması düşüncesini savunan çalışmaların varlığından da bahsedilmiştir [42].

Santillana vd.'nin çalışmasında ABD'de grip ve benzeri hastalıkların takibi için sosyal medya iletileri, arama motorlarında yapılan aramalar ve geleneksel (resmi) kaynakları kullanan makine öğrenmesi tabanlı bir yöntem tanıtılmıştır [43]. Byrd vd., Twitter iletilerinin anahtar kelime tabanlı olarak griple ilgili olup olmadıklarının takip edilebileceğini, grip salgınının Twitter üzerinde yapılabileceğini ve bu iletilere dayalı olarak gerçek zamanlı şekilde coğrafi haritalar üzerinde grip vakalarının görselleştirilebileceğini ifade etmişlerdir [44]. Comito vd. İtalya'da 2016-2017 ve 2017-2018 yıllarında mevsimsel grip vakalarını Twitter iletileri kullanarak analiz eden bir çalışma yapmış, elde edilen sonuçlar resmi sonuçlar ile uyumlu bulunmuştur [45]. Wakamiya vd. tarafından sunulan çalışma yine Twitter'da grip tespiti üzerinde durmuştur ve çalışmada 3 yıla yayılmış 7 milyon Japonca tweet üzerinde doğal dil işleme tabanlı bir yaklaşım kullanılmıştır [46]. Wakamiya vd.'nin sunduğu bir diğer çalışmada; belirlenen 8 belirtiyi içeren İngilizce, Japonca ve Çince Twitter iletilerinin gerçekten vaka belirtip belirtmediklerini sınıflandırmaya yönelik MedWeb isimli yarışmanın tanımı, veri kümeleri ve katılımcıların algoritmaları tanıtılmıştır [47].

Gkotsis vd.'nin çalışmasında Reddit adlı sosyal medya platformundaki iletilerin (belirlenen 11 bozukluk durumuna göre) akıl hastalığı durumu belirtip belirtmediklerini sınıflandırma amacına yönelik derin öğrenme tabanlı bir yaklaşım sunulmuştur [48].

Du vd. tarafından gerçekleştirilen derin öğrenme tabanlı çalışmada Twitter üzerinde saman nezlesi (polen alerjisi) ile ilgili iletilerin sınıflandırılması yapılmıştır [49].

3.3 İlaç ve ilaç yan etkilerinin takibi

İlaçların istenmeyen yan etkilerin ve birbirleriyle etkileşimlerinin tespiti, değerlendirilmesi ve önlenmesi çalışmaları olarak tanımlanabilen farmakovijilans da metin madenciliği uygulamalarının yaygın olarak kullanıldığı ve halk sağlığı ile yakından ilişkili bir konudur [50]. Twitter üzerinde antibiyotiklerle ilgili iletilerin sorgulandığı ve makine öğrenmesi yöntemleriyle sınıflandırıldığı bir çalışmayı Kendra vd. sunmuştur [51]. Sarker vd. sosyal medya üzerinde farmakovijilans konulu bir derleme yayınlamıştır [52]. Nikfarjam vd.'nin yine aynı tarihli çalışmasında, Twitter iletileri üzerinde ilaçların istenmeyen etkilerine dair ifadeleri tespit eden Şartlı Rasgele Alanlar (Conditional Random Fields - CRF) adlı makine öğrenmesi yöntemine dayalı bir yaklaşım anlatılmıştır [53].

Xia vd.'nin tanıttığı bir çalışmada, sağlıkla ilgili sosyal medya forumlarındaki metinlerden ilaç isimleri ile ilaçların istenmeyen etkilerinin otomatik tespit edilmesi amaçlanmış ve derin öğrenme tabanlı bir çözüm sunulmuştur [54].

Twitter iletilerinde ilaçların istenmeyen etkilerinin tespitine yönelik bir diğer çalışmada [55] derin öğrenme (RNN algoritması) tabanlı bir yaklaşım anlatılmıştır.

Zhang vd. hastaların Twitter üzerinde kemoterapi hakkındaki iletilerinden onların bu tedavi hakkındaki algılarını belirlemek için derin öğrenme yaklaşımıyla (LSTM) duygu analizi problemini çözmeye çalışmıştır [56].

Fan vd. tarafından gerçekleştirilen ilgili bir diğer çalışmada, sağlıkla ilgili sosyal medya forumlarındaki metinler üzerinde ilaçların sebep olduğu istenmeyen olayların tespiti ve çıkarımı için derin öğrenme tabanlı bir yaklaşım geliştirilmiştir [57].

3.4 Sağlıkla ilgili diğer konuların (sigara, alkol vb.) takibi

Myślin vd. tarafından tanıtılan tütün konulu bir çalışmada, ilgili Twitter iletilerinden bu iletilerin sahiplerinin sigara içme ve yeni tütün ürünlerine yönelik duyguları belirlenmeye çalışılmış ve genel olarak örnek veri kümesinde tütüne karşı pozitif bir yaklaşım olduğu gözlenmiştir. Bu çalışmada birçok farklı makine öğrenmesi yöntemi denenmiştir [58].

Üniversite öğrencilerinin Facebook ve Twitter iletilerinde yaptıkları alkol referansları Moreno vd. tarafından yapılan çalışmada incelenmiştir. Çalışmada öğrencilerin Facebook üzerinde Twitter'a kıyasla daha fazla alkol referansı kullandıkları ve bu bulgunun izleme ve önleme süreçlerinde kullanılabileceği ifade edilmiştir [59].

Unger vd.'nin ilgili çalışmasında adolesan ve genç yetişkinlerin Twitter üzerinde tütün hakkında yayınladıkları iletiler incelenmiş ve Twitter'da bu şekilde ileti yayınlamakla tütün kullanımı arasında ilişki saptanmıştır [60].

3.5 Sağlıkla ilgili iletilerde duygu analizi ve duruş tespiti

Literatürdeki bazı çalışmalarda; halk sağlığı konularıyla ilgili toplumun sosyal medya iletileri yoluyla belirttikleri algılarının otomatik olarak tespit edilmesi amaçlanmaktadır. Bu konuyla ilgili olarak iki önemli probleme değinilmiştir: duygu analizi (sentiment analysis) ve duruş tespiti (stance detection).

Tablo 1. Sosyal medyada otomatik halk sağlığı takibi konulu çalışmalar

ÇalışmalarYayın	Konu	Yaklaşım
Parker vd. (2013)	Genel Halk Sağlığı	Wikipedia tabanlı kendine özgü yaklaşım
Velardi vd. (2013)	Genel Halk Sağlığı	Anahtar kelime tabanlı kendine özgü yaklaşım
Zhao vd. (2015)	Genel Halk Sağlığı	Derin öğrenme (MLP)
Küçük vd. (2017)	Genel Halk Sağlığı	Ontoloji tabanlı kendine özgü yaklaşım
Choi vd. (2017)	MERS Salgını	Makine öğrenmesi
Sarker vd. (2018)	Genel Halk Sağlığı	Makine öğrenmesi ve derin öğrenme
Tutubalina vd. (2018)	Genel Halk Sağlığı	Derin öğrenme (RNN)
Wiemken vd. (2018)	Genel Halk Sağlığı	İstatistiksel bir yaklaşım
Magumba vd. (2018)	Genel Halk Sağlığı	Derin öğrenme
Jiang vd. (2018)	Genel Halk Sağlığı	Derin öğrenme (LSTM)
Doan vd. (2019)	Genel Halk Sağlığı	Doğal dil işlemeye dayalı bir yaklaşım
Şerban vd. (2019)	Genel Halk Sağlığı	Derin öğrenme
Khatua vd. (2019)	Ebola ve Zika Salgınları	Ağaç sınıflandırıcı tabanlı yaklaşım
Calamusa vd. (2020)	Covid-19 Salgını	İstatistiksel bir yaklaşım
Guntuku vd. (2020)	Covid-19 Salgını ve Akıl Sağlığı	İstatistiksel bir yaklaşım
Jahanbin ve Rahmanian (2020)	Covid-19 Salgını	Bulanık kural-tabanlı evrimsel bir algoritma
Kaur vd. (2020)	Covid-19 Salgını	Doğal dil işlemeye dayalı bir yaklaşım
Xue vd. (2020)	Covid-19 Salgını	Latent Dirichlet Allocation (LDA)
Zhang vd. (2020)	Covid-19 Salgını ve Depresyon	Derin öğrenme
Lee vd. (2013)	Grip ve Kanser	Metin madenciliği
Stoové ve Pedrana (2014)	HIV	Sosyal medya ile geleneksel verilerin kullanımı
Santillana vd. (2015)	Grip ve Benzeri Hastalıklar	Makine öğrenmesi
Byrd vd. (2016)	Grip	Anahtar kelime tabanlı kendine özgü yaklaşım
Gkotsis vd. (2017)	Akıl Sağlığı	Derin öğrenme
Comito vd. (2018)	Grip	İstatistiksel bir yöntem ve duygu analizi yöntemi
Wakamiya vd. (2018)	Grip	Doğal dil işlemeye dayalı bir yaklaşım
Wakamiya vd. (2019)	8 Hastalık Belirtisi	Çeşitli algoritmalar
Du vd. (2019)	Saman Nezlesi	Derin öğrenme
Abacha (2015)	Farmakovijilans	Makine öğrenmesi
Kendra vd. (2015)	Antibiyotikler	Makine öğrenmesi
Sarker vd. (2015)	Farmakovijilans	Çeşitli algoritmalar (derleme)
Nikfarjam vd. (2015)	İlaçların İstenmeyen Yan Etkileri	Makine öğrenmesi (CRF)
Xia vd. (2017)	İlaçlar ve İstenmeyen Yan Etkiler	Derin öğrenme
Cocos vd. (2017)	İlaçların İstenmeyen Yan Etkileri	Derin öğrenme (RNN)
Zhang vd. (2018)	Kemoterapi	Derin öğrenme (LSTM)
Fan vd. (2020)	İlaçların İstenmeyen Yan Etkileri	Derin öğrenme
Myslín vd. (2013)	Sigara ve Tütün Ürünleri	Makine öğrenmesi
Moreno vd. (2016)	Alkol	İstatistiksel bir yaklaşım
Unger vd. (2018)	Tütün	İstatistiksel bir yaklaşım
Seltzer vd. (2017)	Zika Virüs Hakkındaki Duygular	İstatistiksel bir yaklaşım
Zhang vd. (2017)	Önleyici ve Tamamlayıcı Tedaviler	Derin öğrenme
Du vd. (2019)	HPV Aşısı Hakkındaki İnançlar	Derin öğrenme (RNN)

Duygu analizi genel olarak kutuplaşma tespiti (polarity detection) olarak tanımlanır ve verilen bir metnin pozitif, negatif veya nötral şeklinde sınıflandırılmasına karşılık gelir [61].

Duruş tespitinde ise belirli bir hedefe (kavram, olay vb.) karşı verilen metnin duruşu belirlenmeye çalışılır ve işlem sonuçta lehinde, aleyhinde veya hiçbiri şeklinde bir sınıflandırma sonucu elde edilir [62]. Halk sağlığı konusuyla ilgili bir çalışmada; sosyal medya uygulamalarından

Instagram üzerinde Zika virüs konulu resimler indirilerek konunun uzmanları tarafından incelenmiş, bu resimler hakkında çok çeşitli istatistiksel bilgiler çıkarılmış ve resimlerin hangi duyguları ifade ettikleri belirlenmiştir [63].

Daha önce bahsi geçen tütün konulu çalışmada da [58] yine bir halk sağlığı konusunda duygu analizi çalışması gerçekleştirilmiştir.

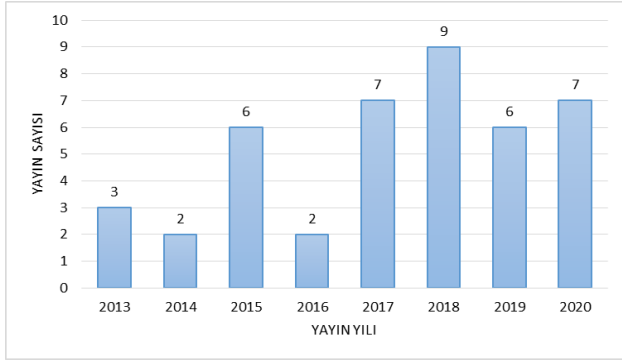
Zhang vd. tarafından gerçekleştirilen çalışmada, meme kanseri hakkındaki bir internet forumunda hastaların tartışmalı tamamlayıcı ve alternatif tıp tedavileri hakkındaki ifadeleri incelenmiştir. Bu tip tartışmaların ve hastaların bu tartışmalardaki duruşlarının tespiti için derin öğrenme tabanlı sınıflandırıcılar geliştirilmiş, her iki problem için de başarılı sonuçlar elde edilmiştir [64].

Daha önce bahsi geçen ve Comito vd. tarafından gerçekleştirilen grip salgını takibi konulu çalışmada ayrıca gribe karşı kullanılan tedaviye yönelik duygular da analiz edilmiş, genel olarak bu duyguların negatif oldukları gözlemlenmiştir [45].

Yine daha önce bahsedilen ve Zhang vd.'nin yayınladığı çalışmada, hastaların Twitter üzerinde kemoterapi hakkındaki duyguları bir derin öğrenme algoritması ile analiz edilmeye çalışılmıştır [56].

İlgili sayılabilecek güncel bir diğer çalışmada [65] Twitter iletilerinden Human Papillomavirus (HPV) aşısına karşı insanların inançlarını belirlemeye yönelik derin öğrenme (RNN) tabanlı bir yaklaşım sunulmuştur.

Daha önce Bölüm 3.1'de Covid-19 salgını ile ilgili bahsedilen çalışmalardan Kaur vd.'nin çalışmasında Covid-19 ile ilgili Twitter iletilerinde duyguların tespit edilmesine [38], Xue vd.'nin çalışmasında ise duygu analizine yönelik deneyler yapılmış ve sonuçları sunulmuştur [39].



Şekil 2. Bölüm 3'te sunulan çalışmaların yayın yıllarına göre dağılımı

4 Halk sağlığı takibi için dijital kaynaklar

Çalışmamızda bahsi geçen çalışmaların bir bölümü, açıkladıkları yaklaşımları kapsamında bir takım dijital kaynaklar kullanmışlardır ve bu durum diğer derleme çalışmalarında da ifade edilmiştir [20].

Söz konusu kaynaklardan en önemlileri, sağlık alanına özgü ontolojilerdir. Alan ontolojileri, ilgili alandaki kavram ve bunların birbiriyle ilişkilerini içeren anlamsal (semantik) kaynaklardır. Bu alandaki öncül ontolojilerden biri Birleştirilmiş Tıbbi Dil Sistemi'dir (Unified Medical Language System - UMLS) [66]. Benzer bir diğer dijital

kaynak türü de sözlüksel kaynaklar ve kelime listeleridir. Tıp alanıyla ilgili yaygın kullanımı olan bir kelime listesi Tıbbi Konu Başlıkları'dır (Medical Subject Headings - MeSH) [67].

Derlememizde değindiğimiz çalışmalardan Küçük vd., Tutubalina vd. ve Magumba vd. kullandıkları yöntemlerinde ontolojilerden yararlandıklarını ifade etmişlerdir [9,28,30].

Ontolojiler, sözlüksel kaynaklar ve kelime listeleri bilgi-tabanlı birçok sistemde olduğu gibi halk sağlığı takibine yönelik sistemler için de faydalı olabileceklerinden, ilgili araştırmacı ve geliştiricilerin bu tip kaynakları araştırmaları ve geliştirecekleri uygulamalarda kullanmalarının başarımlarını arttıracığı düşünülmektedir.

5 İleri çalışma konuları

Çalışmamızda derlenen araştırmalardan çıkarılacak önemli sonuçlardan bazıları şunlardır:

- Sosyal medyada halk sağlığı takibi ve tahmini, geleneksel olarak yapılan resmi kaynaklara dayalı takip ve tahmine kıyasla umut vaat edici sonuçlara ulaşılmasını sağlamaktadır ancak halen sosyal medya üzerinde takibin doğruluğunun artırılmasına gereksinim vardır. Bazı çalışmalarda, sosyal medyanın resmi raporlarla beraber kullanılmasının daha uygun olduğu ve daha başarılı sonuçlara neden olduğu vurgulanmaktadır.
- Sosyal medya üzerinde halk sağlığı, salgın veya hastalık tespiti ve tahmini için; metin ayrıştırma gibi doğal dil işleme dayalı yöntemlere başvurulduğu gibi, makine öğrenmesi ve son dönemde derin öğrenme yöntemlerine de başvurulabilmektedir.

Aşağıda sosyal medya üzerinde halk sağlığı takibi konusundaki üç önemli ileri araştırma konusuna yer verilmiştir.

5.1 Az çalışılan diller üzerinde çalışmalar yapılması

Çalışmamızda derlenen ilgili literatür incelendiğinde Türkçe gibi dillerdeki sosyal medya iletileri üzerinde daha az sayıda çalışma yapıldığı gözlenmektedir. Bu nedenle, salgınların ve diğer halk sağlığı konularının global ölçekte değerlendirilip izlenebilmesi için Türkçe ve benzeri az kaynaklı (low-resource) ve az çalışılmış diller üzerinde de geniş-ölçekli çalışmalar yapılması da önemli bir ileri araştırma konusudur.

Türkçe içerik üzerinde yapılmış çalışmalardan bir tanesi, daha önceki bölümlerde bahsi geçen ontoloji tabanlı sistemdir [9]. Türkçe ilgili literatürdeki kayda değer bazı çalışmalarda ise, T.C. Sağlık Bakanlığı gibi sağlıkla ilgili belirli Twitter hesaplarının paylaşımları üzerinde içerik analizi yapılarak bu analizlerin sonuçlarını sunulmuştur [68,69].

5.2 Değişken terimler ve normalizasyon

Sosyal medya, kullanıcıların istedikleri şekilde yazabildikleri ortamlar olduğundan; kullanıcılar sıklıkla yazım hataları, kısaltmalar, takma adlar kullanabilmektedir. Sağlıkla ilgili sosyal medya iletilerinde de tıbbi terimlere karşılık değişken terimler/isimler (variant terms/names) veya kısaltmalar kullanılabilmekte, bunlar yazılırken de

yazım hataları yapılabilmektedir. Bu nedenlerle, alana özgü terimlerin tespitinde sözü edilen durumlar dikkate alınmalı ve bozulmuş terimler düzgün formlarına dönüştürülmelidir, yani normalizasyon işlemi gerçekleştirilmelidir.

Sosyal medyada sağlık takibinin yüksek başarımla yapılabilmesi için yukarıda sayılan durumlar göz önünde bulundurularak tıbbi terimleri belirleme işlemi dikkatle yapılmalı ve terimler normalize edilmelidir. Örneğin, “grip” kelimesi “grip” olarak düzeltilmelidir.

5.3 Gerçek bilgiyle gerçek olmayan bilginin ayrıştırılması

Sosyal medyada yaygın olarak hastalık isimleri veya sağlıkla ilgili ifadeler abartma amacıyla kullanılabilir. Benzer şekilde yine hastalık belirten ifadeler deyimler içerisinde yer alabilmektedir. Bazen de sosyal medya kullanıcıları gerçek bir vaka olmadan belli bir hastalıktan korkularını iletilerinde ifade edebilmektedir.

Sosyal medya üzerinde sağlık takibinin yüksek başarımla yapılabilmesi için bu tip durumlar tespit edilerek filtrelenmelidir. Örneğin; “bu takım insana kalp krizi geçiriyor” gibi bir iletide gerçek “kalp krizi” vakasından bahsedilmeyip muhtemelen bir futbol takımının başarımlarından memnuniyetsizlik ifade edilmek istenmiştir.

6 Sonuçlar

Bu çalışmada, sosyal medya üzerinde halk sağlığı (veya sağlık) takibi konusunda yapılmış güncel çalışmaların bir derlemesi yer almaktadır. Kapsama alınan çalışmalar 2013-2020 yılları arasında yayınlanmış ilgili çalışmalardır. Bu güncel çalışmalar konularına göre kategorize edilerek beş farklı başlık altında sunulmuştur. Söz konusu başlıklar şunlardır: (1) *Genel Halk Sağlığı ve Salgın Takibi*, (2) *Belirli Bir Hastalığın veya Bir Grup Hastalığın Takibi*, (3) *İlaç ve İlaç Yan Etkilerinin Takibi*, (4) *Sağlıkla ilgili Diğer Konuların (Sigara, Alkol vb.) Takibi*, (5) *Sağlıkla ilgili İletilerde Duygu Analizi ve Duruş Tespiti*.

Taranan çalışmaların yıllara göre dağılımı incelendiğinde genel olarak ilgili yayınlarda bir artış olduğu gözlemlenmektedir. Özellikle 2019 yılı sonunda ortaya çıkan ve halen sürmekte olan Covid-19 salgını nedeniyle 2020 ve 2021 yıllarında bu salgının sosyal medya (özellikle Twitter) üzerinden takibi konusunda daha fazla çalışmanın yayınlanması beklenmektedir.

Son dönem çalışmalarında sadece halk sağlığı takibi değil, ilgili konular hakkında çoğunlukla duygu analizi ve duygu tespiti gibi analizler yapılmakta ve başarılı sonuçlar elde edilmektedir. Böylelikle, insanların halk sağlığını ilgilendiren konulardaki tutum, inanç ve duyguları belirlenmeye çalışılmaktadır.

Derin öğrenme yöntemlerinin birçok farklı alanda (geleneksel makine öğrenmesi yöntemlerine kıyasla) oldukça başarılı sonuçlara ulaşılmasını sağladığı bilinmektedir. Derlememizde yer alan halk sağlığı takibi alanındaki çalışmalar incelendiğinde de, özellikle yakın dönemde yayınlanan çalışmalarda derin öğrenme yöntemlerinin sıklıkla ve başarılı şekilde kullanıldıkları gözlemlenmektedir.

Derlememizde ayrıca, sosyal medyada halk sağlığı takibi alanındaki, ontolojiler ve kelime listeleri gibi, önemli dijital kaynaklardan bahsedilmiştir. Son olarak da, birçok dildeki

sosyal medya üzerinde çalışmalar yapılması, normalizasyon konusu ve gerçek bilginin gerçek olmayandan ayrımı gibi ileri çalışma konularına yer verilmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %4

Kaynaklar

- [1] Z. J. Yao, J. Bi, and Y. X. Chen, Applying deep learning to individual and community health monitoring data: a survey, *International Journal of Automation and Computing*, 15 (6), 643-55, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11633-018-1136-9>
- [2] D. Lazer, R. Kennedy, G. King, and A. Vespignani, The parable of Google Flu: Traps in big data analysis, *Science*, 343 (6176), 1203-1205, 2014. <https://doi.org/10.1126/science.1248506>
- [3] Y. Pershad, P. T. Hangge, H. Albadawi, and R. Oklu, Social medicine: Twitter in healthcare, *Journal of Clinical Medicine*, 7 (6), 121, 2018. <https://doi.org/10.3390/jcm7060121>
- [4] E. Chen, K. Lerman, and E. Ferrara, #Covid-19: The first public coronavirus Twitter dataset, arXiv preprint arXiv:2003.07372, 2020.
- [5] M. Aydoğan, and A. Sener, An Artificial Intelligence Application in Health Developed on Covid-19 Documents, *Journal of Health, Medicine and Nursing*, 75, 58-66, 2020. <https://doi.org/10.7176/JHMN/75-08>
- [6] R. Thiébaud, and F. Thiessard, Artificial Intelligence in Public Health and Epidemiology, *Yearbook of Medical Informatics*, 27 (01), 207-10, 2018. <https://doi.org/10.1055/s-0038-1667082>
- [7] L. Zhou, D. Zhang, C. C. Yang, and Y. Wang, Harnessing social media for health information management, *Electronic Commerce Research and Applications*, 27, 139-51, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.elerap.2017.12.003>
- [8] P. Velardi, G. Stilo, A. E. Tozzi, and F. Gesualdo, Twitter mining for fine-grained syndromic surveillance, *Artificial Intelligence in Medicine*, 61 (3), 153-63, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.artmed.2014.01.002>
- [9] E. E. Küçük, K. Yapar, D. Küçük, and D. Küçük, Ontology-based automatic identification of public health-related Turkish tweets, *Computers in Biology and Medicine*, 83, 1-9, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2017.02.001>
- [10] A. Culotta, Estimating county health statistics with Twitter, *SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1335-1344, 2014. <https://doi.org/10.1145/2556288.2557139>
- [11] J. M. Kapp, B. Hensel, and K. T. Schnoring, Is Twitter a forum for disseminating research to health policy makers?, *Annals of Epidemiology*, 25 (12), 883-7, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.annepidem.2015.09.002>
- [12] N. Phan, D. Dou, B. Piniewski, and D. Kil, Social restricted Boltzmann machine: Human behavior

- prediction in health social networks, IEEE/ACM International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining, pp. 424-431, 2015. <https://doi.org/10.1145/2808797.2809307>
- [13] P. Grover, A. K. Kar, and G. Davies, Technology enabled Health–Insights from Twitter analytics with a socio-technical perspective, *International Journal of Information Management*, 43, 85-97, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2018.07.003>
- [14] I. C. H. Fung, Z. T. H. Tse, and K. W. Fu, The use of social media in public health surveillance, *Western Pacific Surveillance and Response Journal: WPSAR*, 6 (2), 3, 2015. <https://doi.org/10.5365/WPSAR.2015.6.1.019>
- [15] R. Fang, S. Pouyanfar, Y. Yang, S. C. Chen, and S. S. Iyengar, Computational health informatics in the big data age: a survey, *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 49 (1), 1-36, 2016. <https://doi.org/10.1145/2932707>
- [16] A. Nikfarjam, Health information extraction from social media, Ph. D. thesis, Arizona State University, Tempe, AZ, 2016.
- [17] D. Ravi, C. Wong, F. Deligianni, M. Berthelot, J. Andreu-Perez, B. Lo, and G. Z. Yang, Deep learning for health informatics, *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 21 (1), 4-21, 2017. <https://doi.org/10.1109/JBHI.2016.2636665>
- [18] I. Goodfellow, Y. Bengio and A. Courville. *Deep Learning*. Cambridge: MIT Press, 2016.
- [19] D. Küçük, and N. Arıcı, Doğal dil işleme derin öğrenme uygulamaları üzerine bir literatür çalışması, *Uluslararası Yönetim Bilişim Sistemleri ve Bilgisayar Bilimleri Dergisi*, 2 (2), 76-86, 2018.
- [20] A. Joshi, S. Karimi, R. Sparks, C. Paris, and C. R. Macintyre, Survey of text-based epidemic intelligence: a computational linguistics perspective, *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 52 (6), 1-19, 2019. <https://doi.org/10.1145/3361141>
- [21] K. M. Rabarison, M. A. Croston, N. K. Englar, C. L. Bish, S. M. Flynn, and C. C. Johnson, Measuring audience engagement for public health Twitter chats: insights from # LiveFitNOLA, *JMIR Public Health and Surveillance*, 3 (2), 34, 2017.
- [22] J. P. Guidry, Y. Jin, C. A. Orr, M. Messner, and S. Meganck, Ebola on Instagram and Twitter: How health organizations address the health crisis in their social media engagement, *Public Relations Review*, 43 (3), 477-486, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.pubrev.2017.04.009>
- [23] S. E. Jordan, S. E. Hovet, I. C. H. Fung, H. Liang, K. W. Fu, and Z. T. H. Tse, Using Twitter for public health surveillance from monitoring and prediction to public response, *Data*, 4 (1), 6, 2019. <https://doi.org/10.3390/data4010006>
- [24] J. Parker, Y. Wei, A. Yates, O. Frieder, and N. Goharian, A framework for detecting public health trends with Twitter, *IEEE/ACM International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining*, pp. 556-563, 2013 <https://doi.org/10.1145/2492517.2492544>
- [25] L. Zhao, J. Chen, F. Chen, W. Wang, C. T. Lu, and N. Ramakrishnan, Simnest: Social media nested epidemic simulation via online semi-supervised deep learning, *IEEE International Conference on Data Mining*, pp. 639-648, 2015. <https://doi.org/10.1109/ICDM.2015.39>
- [26] S. Choi, J. Lee, M. G. Kang, H. Min, Y. S. Chang, and S. Yoon, Large-scale machine learning of media outlets for understanding public reactions to nation-wide viral infection outbreaks, *Methods*, 129, 50-59, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2017.07.027>
- [27] A. Sarker et al., Data and systems for medication-related text classification and concept normalization from Twitter: Insights from the Social Media Mining for Health (SMM4H)-2017 shared task, *Journal of the American Medical Informatics Association*, 25 (10), pp. 1274-1283, 2018. <https://doi.org/10.1093/jamia/ocy114>
- [28] E. Tutubalina, Z. Miftahutdinov, S. Nikolenko, and V. Malykh, Medical concept normalization in social media posts with recurrent neural networks, *Journal of Biomedical Informatics*, 84, 93-102, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2018.06.006>
- [29] T. L. Wiemken et al., Methods for computational disease surveillance in infection prevention and control: statistical process control versus Twitter's anomaly and breakout detection algorithms, *American Journal of Infection Control*, 46 (2), 124-132, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2017.08.005>
- [30] M. A. Magumba, P. Nabende, and E. Mwebaze, Ontology boosted deep learning for disease name extraction from Twitter messages, *Journal of Big Data*, 5 (1), 31, 2018. <https://doi.org/10.1186/s40537-018-0139-2>
- [31] K. Jiang, S. Feng, Q. Song, R. A. Calix, M. Gupta, and G. R. Bernard, Identifying tweets of personal health experience through word embedding and LSTM neural network, *BMC Bioinformatics*, 19 (8), 210, 2018. <https://doi.org/10.1186/s12859-018-2198-y>
- [32] S. Doan, E. W. Yang, S. S. Tilak, P. W. Li, D. S. Zisook, and M. Torii, Extracting health-related causality from Twitter messages using natural language processing, *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 19 (3), 79, 2019. <https://doi.org/10.1186/s12911-019-0785-0>
- [33] O. Şerban, N. Thapen, B. Maginnis, C. Hankin, and V. Foot, Real-time processing of social media with SENTINEL: a syndromic surveillance system incorporating deep learning for health classification, *Information Processing & Management*, 56 (3), 1166-1184, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ipm.2018.04.011>
- [34] A. Khatua, A. Khatua, and E. Cambria, A tale of two epidemics: Contextual Word2Vec for classifying Twitter streams during outbreaks, *Information Processing & Management*, 56 (1), 247-257, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ipm.2018.10.010>
- [35] A. Calamusa, S. Tardelli, M. Avvenuti, S. Cresci, I. Federigi, M. Tesconi, M. Verani, and A. Carducci, Twitter monitoring evidence of Covid-19 infodemic in

- Italy, *European Journal of Public Health*, 30 (5), ckaa165-066, 2020.
- [36] S. C. Guntuku, G. Sherman, D. C. Stokes, A. K. Agarwal, E. Seltzer, R. M. Merchant, L. H. Ungar. Tracking mental health and symptom mentions on Twitter during COVID-19, *Journal of General Internal Medicine*, 35 (9), 2798-800, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11606-020-05988-8>
- [37] K. Jahanbin and V. Rahmadian. Using Twitter and web news mining to predict COVID-19 outbreak. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, 13 (8), 378-380, 2020. <https://doi.org/10.4103/1995-7645.279651>
- [38] S. Kaur, P. Kaul, and P. M. Zadeh. Monitoring the Dynamics of Emotions during COVID-19 Using Twitter Data, *Procedia Computer Science*, 177, 423-430, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.10.056>
- [39] J. Xue, J. Chen, R. Hu, C. Chen, C. Zheng, Y. Su and T. Zhu. Twitter Discussions and Emotions about the COVID-19 Pandemic: Machine Learning Approach, *Journal of Medical Internet Research*, 22 (11), e20550, 2020. <https://doi.org/10.2196/20550>
- [40] Y. Zhang, H. Lyu, Y. Liu, X. Zhang, Y. Wang, and J. Luo. Monitoring Depression Trend on Twitter during the COVID-19 Pandemic, *arXiv preprint arXiv:2007.00228*, 2020.
- [41] K. Lee, A. Agrawal, and A. Choudhary, Real-time disease surveillance using Twitter data: demonstration on flu and cancer, *ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, pp. 1474-1477, 2013. <https://doi.org/10.1145/2487575.2487709>
- [42] M. A. StooVé, and A. E. Pedrana, Making the most of a brave new world: Opportunities and considerations for using Twitter as a public health monitoring tool, *Preventive Medicine*, 63, 109-111, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2014.03.008>
- [43] M. Santillana, A. T. Nguyen, M. Dredze, M. J. Paul, E. O. Nsoesie, and J. S. Brownstein, Combining search, social media, and traditional data sources to improve influenza surveillance, *PLoS Computational Biology*, 11 (10), 2015. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1004513>
- [44] K. Byrd, A. Mansurov, and O. Baysal, Mining Twitter data for influenza detection and surveillance, *International Workshop on Software Engineering in Healthcare Systems*, pp. 43-49, 2016. <https://doi.org/10.1145/2897683.2897693>
- [45] C. Comito, A. Forestiero, and C. Pizzuti, Twitter-based influenza surveillance: An analysis of the 2016-2017 and 2017-2018 seasons in Italy, *International Database Engineering & Applications Symposium*, pp. 175-182, 2018. <https://doi.org/10.1145/3216122.3216128>
- [46] S. Wakamiya, Y. Kawai, and E. Aramaki, Twitter-based influenza detection after flu peak via tweets with indirect information: text mining study, *JMIR Public Health and Surveillance*, 4 (3), e65, 2018.
- [47] S. Wakamiya, M. Morita, Y. Kano, T. Ohkuma, and E. Aramaki, Tweet classification toward Twitter-based disease surveillance: New data, methods, and evaluations, *Journal of Medical Internet Research*, 21 (2), e12783, 2019. <https://doi.org/10.2196/12783>
- [48] G. Gkotsis et al., Characterisation of mental health conditions in social media using informed deep learning, *Scientific Reports*, 7, 45141, 2017. <https://doi.org/10.1038/srep45141>
- [49] J. Du, S. Michalska, S. Subramani, H. Wang, and Y. Zhang, Neural attention with character embeddings for hay fever detection from Twitter, *Health Information Science and Systems*, 7 (1), 21, 2019. <https://doi.org/10.1007/s13755-019-0084-2>
- [50] A. B. Abacha, M. F. M. Chowdhury, A. Karanasiou, Y. Mrabet, A. Lavelli, and P. Zweigenbaum, Text mining for pharmacovigilance: Using machine learning for drug name recognition and drug-drug interaction extraction and classification, *Journal of Biomedical Informatics*, 58, 122-132, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2015.09.015>
- [51] R. L. Kendra, S. Karki, J. L. Eickholt, and L. Gandy, Characterizing the discussion of antibiotics in the Twittersphere: What is the bigger picture?, *Journal of Medical Internet Research*, 17 (6), e154, 2015. <https://doi.org/10.2196/jmir.4220>
- [52] A. Sarker et al., Utilizing social media data for pharmacovigilance: a review, *Journal of Biomedical Informatics*, 54, 202-212, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2015.02.004>
- [53] A. Nikfarjam, A. Sarker, K. O'Connor, R. Ginn, and G. Gonzalez, Pharmacovigilance from social media: mining adverse drug reaction mentions using sequence labeling with word embedding cluster features, *Journal of the American Medical Informatics Association*, 22 (3), 671-681, 2015. <https://doi.org/10.1093/jamia/ocu041>
- [54] L. Xia, G. A. Wang, and W. Fan, A deep learning based named entity recognition approach for adverse drug events identification and extraction in health social media, *International Conference on Smart Health*, pp. 237-248, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67964-8_23
- [55] A. Cocos, A. G. Fiks, and A. J. Masino, Deep learning for pharmacovigilance: recurrent neural network architectures for labeling adverse drug reactions in Twitter posts, *Journal of the American Medical Informatics Association*, 24 (4), 813-821, 2017. <https://doi.org/10.1093/jamia/ocw180>
- [56] L. Zhang, M. Hall, and D. Bastola, Utilizing Twitter data for analysis of chemotherapy, *International Journal of Medical Informatics*, 120, 92-100, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2018.10.002>
- [57] B. Fan, W. Fan, and C. Smith, Adverse drug event detection and extraction from open data: A deep learning approach, *Information Processing & Management*, 57 (1), 102131, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ipm.2019.102131>
- [58] M. Myślín, S. H. Zhu, W. Chapman, and M. Conway, Using Twitter to examine smoking behavior and perceptions of emerging tobacco products, *Journal of*

- Medical Internet Research, 15 (8), e174, 2013. <https://doi.org/10.2196/jmir.2534>
- [59] M. A. Moreno, A. Arseniev-Koehler, D. Litt, and D. Christakis, Evaluating college students' displayed alcohol references on Facebook and Twitter, *Journal of Adolescent Health*, 58 (5), 527-532, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jadohealth.2016.01.005>
- [60] J. B. Unger et al., Talking about tobacco on Twitter is associated with tobacco product use, *Preventive Medicine*, 114, 54-56, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2018.06.006>
- [61] B. Pang, and L. Lee, Opinion mining and sentiment analysis, *Foundations and Trends in Information Retrieval*, 2 (1-2), 1-135, 2008.
- [62] S. Mohammad, S. Kiritchenko, P. Sobhani, X. Zhu, and C. Cherry, SemEval-2016 task 6: Detecting stance in tweets, *International Workshop on Semantic Evaluation (SemEval-2016)*, pp. 31-41, 2016.
- [63] E. K. Seltzer, E. Horst-Martz, M. Lu, and R. M. Merchant, Public sentiment and discourse about Zika virus on Instagram, *Public Health*, 150, 170-175, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2017.07.015>
- [64] S. Zhang, L. Qiu, F. Chen, W. Zhang, Y. Yu, and N. Elhadad, We make choices we think are going to save us: Debate and stance identification for online breast cancer CAM discussions, *International Conference on World Wide Web Companion*, pp. 1073-1081, 2017. <https://doi.org/10.1145/3041021.3055134>
- [65] J. Du et al., Leveraging deep learning to understand health beliefs about the Human Papillomavirus Vaccine from social media, *NPJ Digital Medicine*, 2 (1), 27, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41746-019-0102-4>
- [66] D. A. Lindberg, B. L. Humphreys, and A. T. McCray, The unified medical language system, *Yearbook of Medical Informatics*, 2 (01), 41-51, 1993. <https://doi.org/10.1055/s-0038-1634945>
- [67] C. E. Lipscomb, Medical subject headings (MeSH), *Bulletin of the Medical Library Association*, 88 (3), 265, 2000.
- [68] A. A. Çobaner, S. Köksoy. Sağlık alanında sosyal medyanın kullanımı: Twitter'da sağlık mesajları, *Akademik Konferans Bildirileri*, 899-906, 2014.
- [69] A. Bilgiç, S. S. Akyüz. Türkiye'de Covid-19 pandemisi döneminde Sağlık Bakanı Fahrettin Koca'nın sosyal medya kullanımı: Twitter paylaşımları içerik analizi, *Gaziantep Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 19(Covid-19 Özel Sayı), 230-243, 2020.





Web sitesi tabanlı oltalama saldırılarının adli analizi Forensic analysis of web-based phishing attacks

İlker Kara^{1,*} 

¹Çankırı Karatekin Üniversitesi Eldivan Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksek Okulu, Çankırı, Türkiye.

Özet

Teknolojide yaşanan gelişmeler insan hayatını kolaylaştırmakta ve birçok faaliyetleri internet ortamında gerçekleştirme imkânı sunmaktadır. İnternet teknolojisi ve uygulamalarının kullanımının artması beraberinde bazı riskleri de içermektedir. Güvenlik açıkları yâda siber saldırı yöntemleri (zararlı yazılımlar, oltalama saldırıları gibi) her geçen gün yeni mağdurların oluşmasına neden olmaktadır. Web tabanlı oltalama saldırıları, sahte web siteleri kullanarak kurbanların kredi kartı bilgileri veya kişisel şifreler gibi önemli bilgilerini ele geçirmek için tasarlanmış saldırılar olarak bilinmektedir. Kurbanların günlük yaşantısında internet ortamında yaptığı faaliyetleri hedef alarak (internet bankacılığı, sosyal medya kullanımı, kurumsal işlemler, aldatici kampanyalar gibi) tasarlanan sahte web sitelerine kişisel bilgilerini giriş yapmasını sağlamak için yönlendirmektedirler. Web tabanlı oltalama saldırı önlemeye yönelik çeşitli araştırmalar ve çalışmalar yapılmakla birlikte başarı oranı tartışmalıdır. Web tabanlı oltalama saldırılarıyla mücadelede saldırganların kullandığı bilinen araç, yöntem ve yaklaşımları tanımlanması ve incelenmesi mücadelede önemli katkılar sağlayacaktır. Bu çalışma web tabanlı oltalama saldırıların adli bilişim yöntemleriyle analizlerine odaklanmaktadır. Çalışmada gerçek bir web tabanlı oltalama saldırısı seçilerek saldırıda kullanılan web sitesinin adli analizi yapılmıştır. Çalışmanın sonuçlarından saldırgana ait bilgilere ulaşılabilir olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Oltalama saldırısı, Adli analiz, Saldırı tespiti ve analiz metodu.

1 Giriş

Dünya genelinde, kişisel kullanıcıları, ticari şirketleri veya resmi kurumları hedef alan sayısız oltalama (phishing) saldırılarına maruz kalmaktadır [1]. Oltalama saldırısı, saldırganların hedefteki kullanıcıları korkutma, merak uyandırma veya sahte vaatlerde (para, hediye, indirim gibi) bulunarak önemli bilgilerini ele geçirmek üzerine tasarlanmış siber saldırılardır [2]. Bu saldırıların en önemli özelliği saldırganın mağduru çok kolayca tuzağa düşürmesi ve istediği bilgileri ele geçirebilmesidir [3]. Oltalama saldırı yöntemleri sürekli gelişmektedir. Saldırganlar, güncel olaylar ve gelişmelerden (salgın, politika yâda toplumsal ihtiyaçlar gibi) ilham alarak kişilerin dikkatini çekmek üzerine saldırı stratejisini belirleyebilmektedir [4]. En

Abstract

Developments in technology offer many opportunities to make activities on the internet for making human life easier. Increasing use of internet technology and applications also involves some risks. Some risks are involved in the increasing use of internet technology applications due to security weaknesses or cyber-attack methods (such as malware, phishing attacks) which cause new victims to occur every day. Web-based phishing attacks are known as attacks designed to obtain victims' vital information, such as credit card information or personal passwords, using fake websites. The victims' daily life activities (such as internet banking, social media usage, corporate transactions, and deceptive campaigns) were monitored in the internet environment to enable them to enter their personal information into fake websites designed. Even though various researches and studies have been piloted to avoid web-based phishing attacks, the success rate is provocative. Identifying and examining the known tools, methods and approaches used by attackers in struggling web-based phishing attacks will provide important contributions to combat. This study was focused on the analysis of web-based phishing attacks with forensic methods. In this study, a real web-based phishing attack was selected and forensic analysis of the website used in the attack was analyzed. It could be concluded from the results of the study that the information about the attacker might be reachable.

Keywords: Phishing attack, Forensic analysis, Attack detection and analysis method.

popüler saldırı yöntemi ise mağdura sahte bir e-posta ile ulaşarak hedef bilgisayar veya cep telefonuna zararlı yazılım (malware) indirmesine yönlendirmesidir [5]. Zararlı yazılım kurban sistemde kayıtlı şifreleri veya kimlik bilgilerini ulaşarak saldırgana iletebilmekte veya mağduru e-posta içerisinde bulunan sahte bir web sitesine yönlendirerek bu bilgileri girmesi isteyebilmektedir [6].

Diğer bir yöntem ise resmi bir kurumdan ya da finansal bir şirketin web sitesini taklit ederek mağdurdan bu sitede bulunan sahte bir formu doldurması (kimlik bilgileri veya bankacılık bilgileri gibi) istenmektedir. Bu tuzağa düşen mağdurun banka hesaplarını boşaltılmakta veya bu değerli bilgileri kötüye kullanılabilmektedir [7]. Oltalama web siteleri, taklit ettikleri web sitelerinde bulunan (logo, resim

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ilkerkara@karatekin.edu.tr (İ.Kara)

Geliş / Received: 04.03.2021 Kabul / Accepted: 31.05.2021 Yayımlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.891261

veya şekiller gibi) görselini birebir kopyalamakta mağdurun kurumsal web sitede işlem yaptığına hiçbir şüphe bırakmamaktadır. Oltalama web siteleri hazırlanırken hedef kişileri aldatmak için alan adı benzetmesi kullanılarak basitçe karıştırabilecek harfler ("k" yerine "h" veya "a" yerine "o" harfleri gibi) yer değiştirilerek kullanılabilir.

Geçmişten günümüze yapılan araştırmalarda, oltalama suçu ile mücadele için yeni yöntemler geliştirilmekle birlikte oltalama saldırıları da tüm dünyada büyük bir hızla artmaktadır. Anti-oltalama saldırıları çalışma grubu (APWG) yayınladıkları rapora göre, 2020'nin üçüncü çeyreğinde tespit edilen oltalama saldırıları için hazırlanmış web sitelerinin sayısı 571.764 ve kişiler veya şirketleri hedef alan oltalama saldırıları için hazırlanmış e-posta sayısının 367.287 olduğunu yayınlamışlardır [8].

Varshney ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada, oltalama saldırısı için tasarlanmış web sitelerinin tespiti için Google arama motoruna girilen kelimeleri inceleyerek tespit edilen URL (Uniform Resource Loader)den gelen dizeler ve belirtilen bir web sayfası başlıklarını incelemişlerdir [9]. Çalışma sonucunda erişim sağlanan web sayfalarının % 99.5 oranında pozitif (doğru web sayfası) olduğunu görülmüştür. Smadi ve arkadaşları, bir evrimsel sinir ağları (CNN) modeli kullanarak oltalama saldırıları için hazırlanmış (12.266 e-postadan oluşan bir veri seti) e-postaların tespitini incelemişlerdir [10]. Önerilen model ilk gün açıkları (zeroday) ile başa çıkabileceğini ve oltalama saldırıları için tasarlanmış e-posta içeriklerini % 98.63 oranında doğruluk elde etmişlerdir. Web sitesi tabanlı oltalama saldırılarının tespit ve saldırı engellemesine yönelik çalışmalar önemli olmakla birlikte saldırı sonrası yapılacak adli analizler suçluların tespitinde önemli bir yer tutmaktadır. Ayrıca, web sitesi tabanlı oltalama saldırılarının adli analiz sonuçlarından saldırı stratejileri, kullanılan tekniklerin belirlenmesi ve saldırganın izinin sürülebilmesi gibi önemli bilgilere ulaşılabilmektedir.

Tüm bunları göz önünde bulundurarak, bu çalışmada, oltalama saldırıları için hazırlanmış web sitesinin adli analizlerinde katkıda bulunmak için bir yaklaşım sunuyoruz. Bu çalışma esas olarak üç katkıyı sunmaktadır:

- (1) Çalışma, web sitesi tabanlı oltalama saldırılarında gözlemlenen son kullanıcı davranışını,
- (2) Bankacılık bilgilerini el geçirmek için tasarlanmış gerçek bir web sitesi tabanlı oltalama saldırısının adli analizi,
- (3) Çalışmada seçilen örnek web sitesi tabanlı oltalama saldırı vakası analizinden elde edilen sonuçları değerlendirildi.

Bu çalışma aşağıdaki gibi düzenlenmiştir: bölüm 2'de, ilgili çalışmalardan birkaçı gözden geçirilmiştir. Bölüm 3'te, web sitesi tabanlı oltalama saldırı vakası adli analizlerini gerçekleştirilmiştir. Sonraki bölümde 4'te çalışmada kullanılan yaklaşımı değerlendirilmiştir. Son olarak, bölüm 5'te çalışma tamamlanmış ve gelecekteki olası web sitesi tabanlı oltalama saldırıyla mücadele için değerlendirmeler yapılmıştır.

2 Literatür çalışması

Literatürde web sitesi tabanlı oltalama saldırı tespiti ve analiz alanında çalışmalar olmakla beraber bu bölümde, önemli olan bazılarına odaklanarak kısaca gözden geçirilmiştir.

Web sitesi tabanlı oltalama saldırıları ile mücadelede sezgisel yaklaşımla kullanılarak şüpheli web sitelerin tespiti etkili bir yöntemdir. Bu yöntem, şüpheli web sitelerinin URL (Uniform Resource Loader) ve HTML (Hypertext Markup Language) içeriklerini makine öğrenmesi veya derin öğrenme gibi yöntemlerle inceleyerek sahte olanları tespit edip engellemek mantığına dayanmaktadır [11]. Ludl ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada sezgisel tabanlı bir yaklaşım kullanarak web sitesi tabanlı oltalama siteleri tespit etmek ve sınıflamak için özellikle HTML ve URL hedef alan bir yöntem önermişlerdir [12]. Bu çalışmada, veri seti olarak 18 farklı oltalama web sitesi kullanılmış ve çalışma sonucunda HTML içeriklerinde % 16.9 ve URL içeriklerinde ise % 0.4 oranında yanlış algılama olduğu görülmüştür.

Diğer bir çalışmada Pan ve arkadaşları, web sitesi tabanlı oltalama tespiti için öncelikle web sitelerin gerçek kimliklerini analiz etmeyi önermişlerdir [13]. Web sitesinde bulunan başlık, açıklama, telif hakkı vb. gibi özelliklerin oltalama web sitelerinde değişebileceğini varsayımını kullanmışlardır. Çalışma sonucunda % 29 oranında önerilen yöntemin başarısız olduğu görülmüştür.

Benzer olarak diğer bir çalışmada Cantina web sitelerinde bulunan sözcüklerin tespiti ve analizi için sezgisel bir yöntem kullanılarak yanlış yazılmış veya ad benzetmesi kullanılmış web sitelerini tespit etmeyi amaçlamıştır [14]. Analizler sonucunda % 89 doğruluk oranında sonuçlar elde etmiştir. Metin tabanlı değişiklikler yapmak oltalama saldırısı için tasarlanmış web sitelerinde en sık kullanılan yöntem olduğunu ve bu yöntemle hazırlanmış siteler tespit edilebilmesi ve içeriğin engellenmesi bu suçla mücadelede önemli katkı sağlayacağını vurgulamıştır.

Diğer bir çalışmada Yi ve arkadaşları kullanıcı adı, kimlik bilgileri ve kredi kartı bilgileri çalmak için tasarlanmış oltalama amaçlı web sitelerinin tespiti için bir yöntem önermişlerdir [15]. Çalışmada derin öğrenme yöntemi kullanarak şüpheli web sitelerinin IP numaraları ve URL adresini tespit ederek bu web sitelerini engellemek mantığına amaçlanmıştır. Çalışmada, veri seti olarak ISS (İnternet servis sağlayıcısı) 24 saat süre içerisinde gerçek veriler kullanılmıştır. Çalışma sonucunda önerilen yöntemin oltalama amaçlı web sitelerinin % 90 başarı oranına sahip olduğu görülmüştür.

Benzer bir çalışmada Moghimi ve arkadaşları özellikle bankacılık bilgilerini çalmak için tasarlanmış oltalama amaçlı web sitelerin tespiti için bir yöntem önermişlerdir [16]. Bu yöntem şüpheli web sitelerinin IP numaraları ve URL adreslerinin özelliklerini tespit ederek sınıflandırma işlemi uygulanmıştır. Çalışmada veri seti olarak şüpheli 3066 web sitesi incelenmiş olup önerilen yöntem % 99.14 oranında başarılı olduğu görülmüştür.

Diğer bir çalışmada Al Mutawa ve arkadaşları akıllı cep telefonlarında oltalama amaçlı web sitelerin (Facebook, Twitter, MySpace gibi) adli inceleme araçları kullanarak (Forensic Tools Kit, Wireshark vb.) adli analizleri

yapılmıştır [17]. Önerilen yöntemin benzer adli vakalar için uygulanabilir olmakla beraber çalışmada kullanılan örneklerin dışında farklı model ve marka akıllı cep telefonları ile analizlerin genişletilmesi gerekliliği vurgulanmıştır.

3 Gereç ve yöntemler

Bu bölümde, web sitesi tabanlı ortalama saldırıları için hazırlanmış vaka örneğini ve analizlerde kullanılan iş bilgisayarları ve analiz araçlarını tanıtmıştır.

3.1 Veri seti

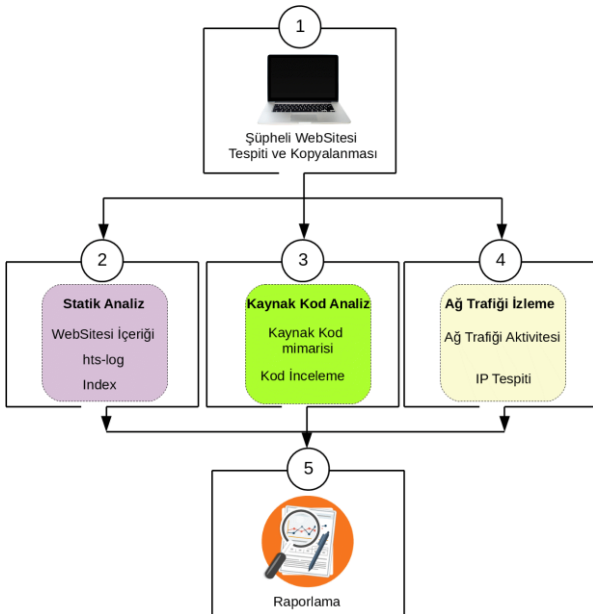
Vaka analiz çalışmalarında, seçilen örneğin konunu tam olarak içermesi ve mümkünse günlük hayatta karşımıza çıkan gerçek bir örnek olması son derece önemlidir. Böyle uygun bir vaka örneğine için Türkiye'de faaliyet gösteren bir bilgi güvenliği şirketi ile işbirliği yapılmıştır.

3.2 Analiz yöntemi

Bu bölümde, tüm analiz yaklaşımının iş akışı ve sistemi ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Genel çalışma beş aşamadan oluşmaktadır (Şekil 1).

3.2.1 Şüpheli web sitesinin tespiti ve kopyalanması

Web tabanlı ortalama saldırıların adli incelemelerinin ilk adımı şüpheli web sitesinin tespitidir. Tespit edilen şüpheli web sitesi adli incelemesi yapılabilmesi için uygun programlar kullanılarak iş bilgisayarına kopyalanır. Bu adım tamamlandıktan sonra analiz aşamasına geçilir.



Şekil 1. Analiz yaklaşımının genel iş akışı.

3.2.2 Statik analiz

Statik analiz yaklaşımı, şüpheli içerikler çalıştırılmadan yapılan analizleri kapsamaktadır. Şüpheli web sitesinin içerikleri hakkında hızlı bir şekilde bilgi toplanmasına imkan sağlamaktadır. Statik analiz yöntemiyle şüpheli web sitesinin içeriği, hts-log bilgileri ve index bilgileri gibi bilgilere ulaşılabilmektedir. Bununla birlikte web sitesini oluşturan

dosyaların amacını tam olarak belirlemek için static anaiz yaklaşımı yeterli değildir. Statik analiz aşamada elde edilen bilgiler diğer adımlarda yapılacak analizler için rehber niteliğindedir.

3.2.3 Kaynak kod analizi

Kaynak kod analizi, şüpheli web sitesini oluşturan kaynak kodun çalıştırılmadan basit olarak yapılan analizleri içermektedir. Kaynak kod analizi sayesinde şüpheli web sitesinin kaynak kod mimarisi analizi ve web sitesinin kod yapısı incelenerek, mevcut yapısı ve olası hataların tespitinin yapılması amaçlanmaktadır.

3.2.4 Ağ trafiği izleme

Ağ trafiği izleme yöntemi adli bilişim incelemelerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Ağ izleme süreci boyunca şüpheli web sitesinin gerçek zamanlı ağ trafiği verileri toplanabilmektedir. Bu veriler analiz edilerek anormallikleri tespit edebilme imkânı sağlamaktadır. Ağ trafiği analizleri sonucunda şüpheli web sitesi ile saldırgan arasında iletişim bilgilerini içerebilmesinden dolayı son derece önemlidir. Ağ trafiği verilerinden saldırganın ait IP (İnternet Protokolü) numarası tespit edilebilirse saldırganın izinin sürülebilmesine imkân sağlamaktadır. IP numarası sayesinde bağlı olan abone ve lokasyon (Whois) bilgilerine ulaşmak mümkün hale gelmektedir.

3.2.5 Raporlama

Raporlama aşaması şüpheli web sitesi adli analizi sonucunda ulaşılan bulguların rapor olarak hazırlanması aşamasını ifade etmektedir. Analiz rapor içeriğinde, analiz zamanı, analiz sonucunda şüpheli web sitesi hakkında ele geçen bulgulara ilişkin bilgiler detaylı olarak yer almaktadır.

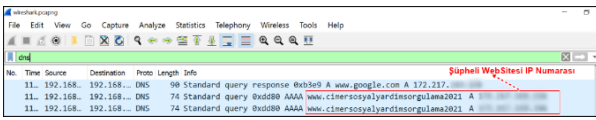
3.3 Örnek vaka analizi

Seçilen örnekte saldırgan, web sitesi tabanlı ortalama saldırısı için son zamanlarda tüm dünya genelinde görülen korona virüs salgını konusunu kullanmıştır. Tüm dünyayı etkisi altına alan Koronavirüs salgını derin ekonomik etkileri olduğu ülkemizde de görülmektedir. Söz konusu salgının ekonomik etkileri ve yol açtığı maddi kayıplar nedeniyle resmi kurumlar tarafından sosyal yardımlar yapılmaktadır. Saldırgan bu hizmeti taklit etmek için bir senaryo tasarlanmış ve Türkiye vatandaşlarına devlet tarafından verilen hizmetlerin elektronik ortamda sunulması kurumsal web sitesi (e-devlet) ortalama saldırısı yapmak için taklit edilmiştir (Şekil 2).

Şekil 2'de ortalama saldırıları için hazırlanmış şüpheli web sitesi içeriği görülmektedir. Web sitesi tabanlı ortalama saldırı içeriği incelendiğinde e-devlet logosunun kullanılarak mağdurda kurumsal e-devlet web sitesinde işlem yaptığını izlemeyi oluşturmak amaçlanmıştır.

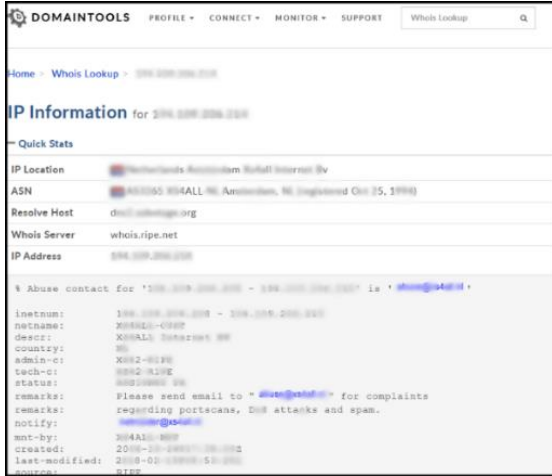
Şekil 2'de (1) kısımda, saldırgan tarafından hazırlanan web sitesi alan adı görülmektedir. Alan adı hazırlanırken "https://www-cimersosyalyardimsorgulama2021.com" içerisinde CİMER (Cumhurbaşkanlığı İletişim Merkezi) kelimesi özellikle vurgulandığı görülmüştür. Şekil 2'de (2) kısımda, Mağdurun kişisel ve bankacılık bilgilerini hazırlanmış forma girmesi için yönlendirme mesajını göstermektedir. Şekil 2'de (3) kısımda, mağdurdan siteme

ihativa etmektedir. Tespit edilen IP numarasının gerçek faile ait olup olmadığı teyit edilmelidir [18]. 5271 sayılı Ceza Muhakemesi Kanununda 134. Maddesi gereğince tedbirler (şüpheli cihazlarda içerik araması yapılması, adreste arama, el koyma ve delil elde etme yöntemleri) uygulanarak desteklenmelidir. IP (statik veya dinamik) adreslerinin de çeşitli yöntemlerle (VPN, ZenMate vb.) kullanarak gerçek numarası gizlenebilmektedir [26]. Bu durumun önüne geçebilmek için Türk Ceza Kanununda ve Ceza Muhakemesi Kanununda düzenlemelere gidilmiştir [18]. Ayrıca tespit edilen şüpheli IP numarasının çeşitli programlar (VPN, ZenMate vb.) kullanarak gizlenmesi tespit edilmesi ve söz konusu IP numarasıyla suç işlendiği yönünde kuvvetli şüphe olması halinde ilgili şirketlerden gerçek IP numarasının talep edilebilmektedir [27].



Şekil 6. Wireshark programı ile "https://www-cimersosyalyardimsorgulama2021.com" sitesi IP numara tespiti nin ekran görüntüsü.

Şüpheli IP numarasının tespit edilmesinden sonra IP numarasının ait bilgiler ulaşmak amacıyla "https://whois.domaintools.com" adresinden alan adı sorgulaması yapılmıştır (Şekil 7).



Şekil 7. Şüpheli IP numarasının "https://whois.domaintools.com" sorgusunun ekran görüntüsü.

Tespit edilen şüpheli IP numarasının sorgusu sonucunda saldırganına ait Whois (alan adı sorgulaması) bilgilere ulaşılacağı görülmüştür.

4 Tartışmalar

Bu çalışmada web tabanlı ortalama saldırıları ele alınarak gerçek bir vaka analizi yapılarak mevcut durumda yaşanan zorluklar değerlendirilmiştir. Seçilen güncel ve gerçek bir saldırı örneği üzerinde saldırganın saldırı stratejisi ve kullandığı yöntemler incelenmiştir. Analiz sonuçları (1) seçilen örnek web tabanlı ortalama saldırısının çalışma

mantığını, (2) saldırganına ait bilgilerinin izinin sürülmesi gibi iki önemli avantaj sunmaktadır. Öte yandan web tabanlı ortalama saldırılarının adli vaka analizleri bazı zorluklarda içermektedir. Saldırganlar her saldırıda farklı tasarımlar kullanabileceğinden tespit ve analiz yaklaşımları incelenen vakaya göre farklılıklar içerebilmektedir. Ayrıca bazı durumlarda tespit edilen şüpheli IP numaraları çeşitli yöntemlerle gizlenebilmektedir. Bu durumlarda tespit edilen IP numaralarının yürütülen soruşturma kapsamında kanuni düzenlemelerden faydalanılması mümkündür.

Web tabanlı ortalama saldırılarıyla mücadelede gerçek vaka analizleri büyük katkı sağlamakla birlikte ilgili alanda çalışan uzmanlarda farkındalık oluşturması açısından önemlidir.

Bu çalışmada önerilen yaklaşımın güçlendirilmesi ve desteklemek için daha fazla güncel örneklerle tekrarlanması gerektirdiğine inanıyoruz.

5 Sonuçlar

Bu çalışma, web tabanlı ortalama saldırılarının adli analizlerinde kullanılabilecek bir yaklaşım sunmaktadır. Dahası, analiz sonuçlarından web tabanlı ortalama saldırı sitesinin içerik analizini, saldırı stratejisinin belirlenmesi ve saldırganına ait bilgilere ulaşılacağı göstermiştir. Çalışmada kullanılan yaklaşım özellikle web sitesi tabanlı ortalama saldırıları analizlerinde kullanılabilecek uygun bir yöntem olabileceği görülmüştür.

Son olarak, çalışma web sitesi tabanlı ortalama saldırıları ile mücadelede farkındalık yaratacağına inanıyoruz. Gelecek çalışma olarak web sitesi tabanlı ortalama saldırıları tespiti ve analizlerinde farklı örnek veri setleriyle araştırmayı planlıyoruz.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 17

Kaynaklar

- [1] J. Lopez, J. E. Rubio, Access control for cyber-physical systems interconnected to the cloud, Computer Networks, 134, 46-54, 2018. doi: 10.1016/j.comnet.2018.01.037.
- [2] O. K, Sahingoz, E. Buber, O. Demir, B. Diri, Machine learning based phishing detection from urls, Expert Systems with Applications, 117 (1), 345-357, 2019. doi :10.1016/j.eswa.2018.09.029.
- [3] C. N. Gutierrez, T. Kim, Della R. Corte, J. Avery, D. Goldwasser, M. Cinque, S. Bagchi, Learning from the ones that got away: Detecting new forms of phishing attacks. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 15 (6), 988-1001, 2018. doi: 10.1109/TDSC.2018.2864993.
- [4] B. Kesler, H. Drinan, N. Fontaine, News briefs. IEEE Security and Privacy, 4 (6), 8-13, 2006. doi: 10.28948/ngumuh.649969.
- [5] I. Kara, Truva atı zararlı yazılımlarına yaklaşım ve çözüm önerileri. Bilgi Yönetimi, 2 (1), 28-33, 2019.
- [6] I. Kara, Türkiye'de zararlı yazılımlarla mücadelenin uygulama ve hukuki boyutunun değerlendirilmesi.

- Akademik Bakış Uluslararası Hakemli Sosyal Bilimler Dergisi, 52, 87-98, 2015.
- [7] V. Bhavsar, A. Kadlak, S. Sharma, Study on phishing attacks. *Int. J. Comput. Appl*, 182, 27-29, 2018. doi:10.5120/ijca2018918286.
- [8] APWG, Phishing Activity Trends Report: 3rd Quarter 2020. Anti-Phishing Working Group, Retrieved. Available online: <https://apwg.org/trendsreports/> (Accessed on 06 Nisan 2021).
- [9] G. Varshney M. Misra, P. K. Atrey. A phish detector using lightweight search features, *Computers & Security*, 62, 213-228, 2016. doi:10.1016/j.cose. 2016.08.003.
- [10] S. Smadi, N. Aslam, L. Zhang, Detection of online phishing email using dynamic evolving neural network based on reinforcement learning. *Decision Support Systems*, 107, 88-102, 2018. doi:10.1016/j.dss.2018.01.001.
- [11] M. R. Natadimadja, M. Abdurohman, H. H. Nuha, A Survey on Phishing Website Detection Using Hadoop. *Jurnal Informatika Universitas Pamulang*, 5 (3), 237-246, 2020. doi:10.32493/informatika.v5i3.6672.
- [12] C. Ludl, S. Mcallister, E. Kirda, C. Kruegel. On the effectiveness of techniques to detect phishing sites. In *DIMVA '07: Proceedings of the 4th International Conference on Detection of Intrusions and Malware, and Vulnerability Assessment*, Springer, Berlin, Heidelberg, 4579, 20-39, 2007. doi:10.1007/978-3-540-73614-1_2.
- [13] Y. Pan, X. Ding, Anomaly based web phishing page detection. In *ACSAC '06: Proceedings of the 22nd Annual Computer Security Applications Conference*, IEEE Computer Society. 1, 381-392, 2006. doi:10.1019/ACSAC.2006.13.
- [14] Y. Zhang, J. I. Hong, Cranor. Cantina: a content-based approach to detecting phishing web sites. In *www '07: Proceedings of the 16th International Conference on World Wide Web*, 8 (12), 639-648, 2007. doi:10.1145/1242572.1242659.
- [15] P. Yi, Y. Guan, F. Zou, Y. Yao, W. Wang, T. Zhu, Web phishing detection using a deep learning framework. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 9, 1-9, 2018. doi:10.1155/2018/4678746.
- [16] M. Moghimi, A. Y. Varjani, New rule-based phishing detection method. *Expert Systems with Applications*, 53, 231-242, 2016. doi:10.1016/j.eswa.2016.01.028.
- [17] A. Mutawa, N. Baggili, I. A. Marrington, Forensic analysis of social networking applications on mobile devices. *Digital Investigation*, 9, 24-33, 2012. doi:10.1016/j.diin.2012.05.007.
- [18] D. Gedik, Bilişim suçlarında ip tespiti ile ekran görüntüleri çıktılarının ispat değeri. *Bilişim Hukuku Dergisi*, 1 (1), 51-84.
- [19] [wireshark] <http://wireshark.org> (Accessed on 06 Nisan 2021)
- [20] S. Sandhya, S. Purkayastha, E. Joshua, A. Deep, assessment of website security by penetration testing using Wireshark. In *2017 4th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*, IEEE. 4, 1-4, 2017. doi:10.1109/CICN.2017.8319360.
- [21] H. Kim, H. Lee, H. Lim, Performance of packet analysis between observer and wireshark. In *2020 22nd International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, IEEE. 2020, 268-271, 2020. doi:10.23919/ICACT48636.2020.9061452.
- [22] J. C. Vega, M. A. Merlini, P. Chow, FFSHark: a 100G FPGA implementation of BPF filtering for Wireshark. In *2020 IEEE 28th Annual International Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM)*, IEEE. 47-55, 2020. doi:10.1109/FCCM.48280.2020.00016.
- [23] K. M. Fathima, N. Santhiyakumari, A survey on network packet inspection and arp poisoning using wireshark and ettercap. In *2021 International Conference on Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS)*, IEEE. 1136-1141, 2021. doi:10.1109/ICAIS50930.2021.9395852.
- [24] <https://www.iso.org/standard/44406.htm> (Accessed on 06 Nisan 2021)
- [25] <https://www.iso.org/standard/44407.html> (Accessed on 06 Nisan 2021)
- [26] N. M. Al-Fannah, One leak will sink a ship: WebRTC IP address leaks. In *2017 International Carnahan Conference on Security Technology (ICCST)*, IEEE. 1-5, 2017. doi: 10.1109/CCST.2017.8167801.
- [27] Ö. Murat, Avrupa konseyi siber suç sözleşmesi ışığında siber suçlarla mücadelede uluslararası işbirliği. *Marmara Üniversitesi Hukuk Fakültesi Hukuk Araştırmaları Dergisi*, 19(2), 1229-1270, 2013.





Aklime edilmiş aktif çamur mikroorganizmaları ile sürekli sistem yukarı akışlı dolgulu kolonda 2,4- diklorofenol gideriminin incelenmesi

Investigation of 2,4- dichlorophenol removal in continuous system upflow filled column with activated sludge microorganisms

Ece Ümmü Deveci^{1,*} 

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

Özet

Endüstriyel üretim sonrası ortaya çıkan atıksular alıcı ortamlara verilmeden önce atıksu içeriğinde bulunan kirlilik parametrelerinin deşarj kriterlerin altında arıtılması gerekmektedir. Fenol ve türevi olan kimyasal bileşikler endüstriyel üretim sonrası atıksular içerisinde yüksek konsantrasyonda bulunmaktadır. Bu fenol ve türevi bileşikleri içeren atıksular kanserojenik ve teratojenik etkilere sahiptir. Bu nedenle bu tip atıksuların alıcı ortamlara arıtılmadan deşarj edilmemesi gerekmektedir. Bu amaçla bu çalışmada 2,4- diklorofenol ile aklime edilmiş aktif çamur mikroorganizmalarının yukarı akışlı olarak poliüretan ile doldurulmuş kolonda 2,4- diklorofenol giderimi incelenmiştir. Aklime edilmiş aktif çamur mikroorganizmaları poliüretan sünger parçaları üzerine immobilize edilmiş ve yukarı akışlı dolgulu kolonda 2,4- diklorofenolün sürekli sistemde 90 gün boyunca arıtımı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en optimum 500 mg/L 2,4-diklorofenol konsantrasyonunda %83 KOİ ve %86 fenol giderimi sağlanmıştır.

Anahtar kelimeler: 2,4-DKF, Aklimasyon, İmmobilizasyon, Yukarı akışlı dolgulu kolon, Mikro gözenekli poliüretan

1 Giriş

Doğaya verilen ksenobiyotik özellikli organik kimyasallar genel olarak uzun zincirli alkilfenoller ve klorofenoller; evlerde, ticari ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [1,2]. Bu hammaddeler, alıcı ortamlara karıştığında mikro kirleticiler olarak değerlendirilmekte olup son zamanlarda daha dikkat çekici hale gelmiştir [3]. Genel olarak endüstriyel olarak ortaya çıkan fenol ve türevleri; tekstil, ilaç, plastik, kâğıt ve boya, tarım ilaçları ve dezenfektan maddelerin üretiminde kullanılmaktadır [4]. Klorofenoller ise genel olarak pestisit üretiminde ve klorlu hidrokarbonların bozulmasıyla ortaya çıkan toksik bir bileşiktir [5]. Klorofenoller çok düşük konsantrasyonlarda dahi suda tat ve koku problemi oluşturmaktadır. Ayrıca mikrokirleticiler olarak sulara bulduklarında suda yaşayan canlılar ve insanlar için yüksek toksisite ve biyolojik birikime sahiptir [1, 6, 7]. Bu

Abstract

The pollution parameters in the wastewater must be treated below the discharge criteria before the wastewater generated after industrial production is discharged to the receiving environment. Phenol and its derivatives are found in high concentrations in wastewater after industrial production. Wastewater containing this phenol and its derivatives have carcinogenic and teratogenic effects. Therefore, this type of wastewater should not be discharged to receiving environments without treatment. For this purpose, in this study, the removal of 2,4-dichlorophenol in a column filled with polyurethane upstream of activated sludge microorganisms activated with 2,4-dichlorophenol was investigated. Activated sludge microorganisms were immobilized on polyurethane sponge pieces and the purification of 2,4-dichlorophenol in a continuous system for 90 days in an upstream filled column was studied. According to the results, 83% COD and 86% phenol removal was achieved at the optimum 500 mg / L 2,4-dichlorophenol compensation.

Keywords: 2,4- Dichlorophenol, Acclimation, Immobilization, Upstream filled column, Microporous polyurethane

gibi olumsuz etkileri nedeniyle Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından fenol konsantrasyonu içme sularında 1 mg/L olarak sınırlandırılmıştır [8]. WHO tarafından yüzey suyu, atık su, yeraltı suyu ve içme suyunda klorofenollerin dünya çapında tespit edilerek izlenmiştir. Elde edilen veriler değerlendirilerek insan sağlığı ve ekosistem için ortaya çıkabilecek potansiyel tehlikeler belirlenmiştir [9]. Klorofenollerin biyolojik parçalanması ile ilgili olarak fungus ve bakterilerin kullanıldığı birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda klorofenol kesikli veya yarı kesikli sistemlerde %70 ile %100 arasında giderim gerçekleştiği rapor edilmiştir [10–15]. Ancak son yıllarda endüstriyel atık suların arıtılmasına yönelik geleneksel yöntemler arasında, aktif çamur (AS) çeşitli endüstriler tarafından yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [11, 16, 17]. Bununla birlikte, fenolik atık suların arıtım verimliliğinin

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: eudeveci@ohu.edu.tr (E.Ü. Deveci)

Geliş / Received: 23.09.2020 Kabul / Accepted: 10.01.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.759297

arttırılması, araştırmacılar ve endüstriler arasında büyük ilgi uyandıran önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir [14, 15, 18, 19].

Klasik aktif çamur sisteminin inhibisyonunun önüne geçilmesi amacıyla biyofilm reaktörler oldukça dikkat çekmektedir. Biyofilm reaktörlerde kullanılan dolgu malzemesinin belirli özelliklere sahip olması gerekmektedir. Bu özellikler filtre malzemesi türü, parçacık çapı, şekli, özgül ağırlığı, boşluk miktarı vb. tasarım ve işletme aşamalarında önemli olmaktadır. Biyofilm reaktörlerde ister akışkan yataklı ister dolgu kolon olsun, dolgu malzemesi olarak kum, kil, antrasit, cüruf gibi doğal özellikli maddeler kullanılabilir gibi polipropilen, poliüretan gibi plastik özellikteki malzemeler de tercih edilebilmektedir [20]. Bu çalışmada ise uygulamaya uygun bir şekilde aktif çamur mikroorganizmalarının aklimesyonu ve dolgu kolonda giderimi sağlanmıştır. Yukarı akışlı dolgu kolon reaktörde dolgu malzemesi olarak mikro gözenekli poliüretan kullanılmıştır. Bu reaktörde askıda hücrelerin kullanılmasından ziyade immobilize hücrelerin kullanılması ilgili en önemli avantaj biyoreaktör içerisinde yüksek konsantrasyonda hücre tutulmasıdır. Ayrıca reaktör içerisinde toksik materyallere karşı hücrelerin korunmasının yanında daha yüksek arıtım verimliliği ve iyi bir işletme stabilitesi tespit edilmiştir.

2 Materyal ve metot

2.1 Mikroorganizma

Çalışmada kullanılan aktif çamur; Kayseri Büyükşehir Belediyesi Atıksu Arıtma Tesisinin geri devir ve havalandırma tankından alınmıştır. Fenolik bileşiklerin parçalanması için planlanan optimizasyon çalışması; Şekil 1'de gösterildiği gibi laboratuvarında sürekli ve havalandırılmalı yukarı akışlı kolon biyoreaktörde, alıkonma zamanı 48 saat, reaktör hacmi 1000 ml, pH 6,5± 0,5 ve sıcaklık oda sıcaklığında çalışılmıştır. Reaktör içerisinde havalandırma, verilen hava 2 L/dak olacak şekilde akışı ayarlanabilir akvaryum pompalarıyla sağlanmıştır. 10 günlük çamur yaşına sahip aktif çamur ile çalışma yürütülmüştür. Sentetik klorofenol konsantrasyonu 250, 500, 750 ppm olacak şekilde farklı 2,4-DKF konsantrasyonlarında çalışılmıştır.

Sentetik 2,4-DKF atıksuyun hazırlanışı; 0,4 g/L NaOH 1 L distile suda çözülerek üzerine 5 g/L sentetik 2,4-DKF eklenerek hazırlanmıştır. Sentetik atıksu 2,4-DKF (Merck) kimyasalı ve Tablo 2'de içeriği verilen ortam içerecek şekilde hazırlanmıştır.

2.2 Büyüme ortamı

Kayseri Büyükşehir Belediyesi Atıksu Arıtma Tesisinin geri devir ve havalandırma tankından gelen aktif çamur laboratuvar ortamında Tablo 1'de içeriği verilen ortam ile beslenmiştir.

Bu büyüme ortamından alınan çamur İmhoff hunisinde çöktürüldükten sonra üst sıvı alınıp aktarıldıktan sonra fosfat tamponu eklenmiştir. Fosfat tamponu ile karıştırıldıktan sonra yeniden İmhoff hunisinde çökmesi için beklenmiştir. Yarım saat sonra çöken çamurdan üst sıvı alındıktan sonra

kalan çamur eşit miktarda (MLSS 100 mg/l olacak şekilde) aklimesyon ortamına aktarılmıştır.

2.3 Aklimesyon çalışması

Aktif çamur mikroorganizmalarının fenol ve fenol türevi bileşikleri parçalayabilmeleri için aklime edilme süreci alıkonma zamanı öncesinde uygulanmıştır. Aklime edilme süreci için aktif çamur, Tablo 2'de verilen besiyeri içeriğinde hazırlanmış ortamlarda 250 mL'lik 10 adet erlen içerisinde 100 mL olacak şekilde aktarılarak çalkalayıcıda inkübe edilmiştir. Bütün erlenler 25 gün boyunca sentetik 2,4-DKF çözeltisi ile belirli konsantrasyonlarda beslenmiştir [22]. Canlıların aktif olup olmadıkları nutrient broth besiyeriyle hazırlanmış tüplerle kontrol edilmiştir.

2.4 Optimizasyon çalışması

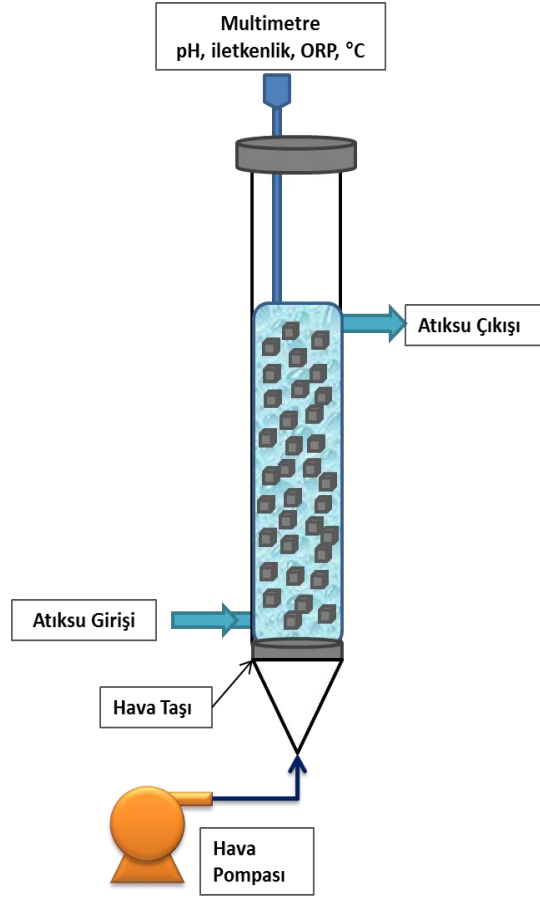
25 günlük inkübasyon sonunda aklime edilmiş çamurlar İmhoff hunisine aktarılmıştır. İmhoff hunisinde yarım saat çökeldikten sonra üst sıvı alınarak modifiye ortam ile yıkanmış yukarı akışlı dolgu kolon reaktöre aktarılmıştır. Mikrobiyal çamur ilavesi yapılmamış 2,4-DKF içerikli kolon inkübasyon boyunca yukarı akışkanlı reaktörde negatif kontrol örnek olarak işletilmiştir. Akışkan kolonların hava çıkışları seçici geçirgen filtre ile kapatılarak havalandırma sağlıklı bir şekilde sağlanırken fenolün kaçıışı da engellenmiştir. Böylece 2,4-DKF'nin %95 oranında uzaklaşmadığı belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında, farklı konsantrasyonlarda 2,4-DKF akış hızına bağlı olarak fenol giderimi incelenmiş ve optimum akış hızı ve fenol konsantrasyonu belirlenmiştir.

2.5 Analitik metotlar

Deneysel çalışmalarda pH ölçümü, sıcaklık, iletkenlik ve çözünmüş oksijen WTW inolab_IDS multi 9430 cihazı ile yapılmıştır. MLSS tayini standart metodlara uygun olarak yapılmıştır (Standard Methods, 1998). ORP (Oksidasyon-Redüksiyon potansiyeli) ölçümleri SANXIN SX712 Marka cihazla standart metodlara uygun şekilde ölçümleri yapılmıştır. KOİ (Kimyasal Oksijen İhtiyacı) analizleri, açık refluk standart metodlara uygun olarak yapılmıştır. Toplam Fenol analizi; standart metodlara uygun olarak yapılmıştır.

3 Bulgular ve tartışma

Farklı fenol konsantrasyonlarında giriş konsantrasyonlarına sahip sentetik atıksular, 750 mL çalışma hacmine sahip 0,5x0,5x0,5 mm ölçülere sahip poliüretan malzemelerle 2/3'ü doldurulmuş yukarı akışlı dolgu kolonda 2 mL/dak akış hızında 25 gün boyunca sürekli sistemde işletilmiştir. Sistem içerisinde kullanılan aklime edilmiş mikroorganizmalar günlük çamur yaşına sahiptir. Günlük alınan örneklerde KOİ, toplam fenol, ORP, pH ve elektriksel iletkenlik analizleri yapılmıştır. Fenol konsantrasyonunun etkisinin belirlenmesi için yapılan deneylerde başlangıç fenol konsantrasyonunun ayarlanması için ilk girişte fenol ve fenol parçalanma ürünleri tampon çözelti ile yıkanarak alınmıştır. Giriş fenol konsantrasyonları 250, 500 ve 750 mg/L olarak kullanılmıştır. Bulunan optimum giriş fenol konsantrasyonuna bağlı olarak 1, 2, 3 mL/dk akış hızında fenol ve organik yük giderim verimi incelenmiştir.



Şekil 1. Sürekli sistem yukarı akışlı kolon reaktör

Tablo 1. Aktif çamurun besiyeri içeriği [21]

Kimyasalın adı	Konsantrasyonu (g/L)
K_2HPO_4	0.5
$(NH_4)_2SO_4$	0.94
KH_2PO_4	0.25
Peynir altı suyu tozu	1.0

Tablo 2. Modifiye optimizasyon ortam

Ortam içeriği	Konsantrasyon (g/L)
Glikoz	1
Pepton	0,1
Üre	0,2
$(NH_4)_2SO_4$	0,1
KH_2PO_4	0,1
K_2HPO_4	0,1
M_1 (1 mL/L)	
$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	1,5
$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	0,5
$MnSO_4 \cdot H_2O$	0,3
$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	0,075
$CaCl_2 \cdot 6H_2O$	0,015
Sitrik Asit	0,6
M_2 (1 mL/L)	
$(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$	0,05
H_3BO_3	0,01
KI	0,01
2,4 Diklorofenol	5

3.1 Başlangıç fenol konsantrasyonunun fenol ve KOİ giderimine etkisi

Başlangıç fenol konsantrasyonunun KOİ giderimi üzerine etkisi belirlenmiştir. Elde edilen verilere göre fenol konsantrasyonunun artışı fenol giderimini azaltmıştır. KOİ giderimi sırasında dalgalanmalar fenolik yapıların parçalanması sırasında oluşan yan ürünlerden kaynaklanmaktadır. Moussavia ve ark (2014) tarafından yapılan çalışmada KOİ değerinin biyodegradasyon sırasında zamana bağlı olarak azalışında değişkenlik gösterdiği ve aklimasyon süresinin 5 ile 30 gün arasında değişiklik göstereceği belirlenmiştir [22]. Yapılan bu çalışmada aklimasyon süresi 25 gün olarak belirlenmiştir. Aklime edilmiş mikroorganizmalar 21 günlük işletim süresi boyunca giderim veriminde önemli bir değişim gözlenmediği ve poliüretan malzemenin biyofilm kalınlığının sabit olduğu Şekil 2’de verilen SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) analizleri ile belirlenmiştir.

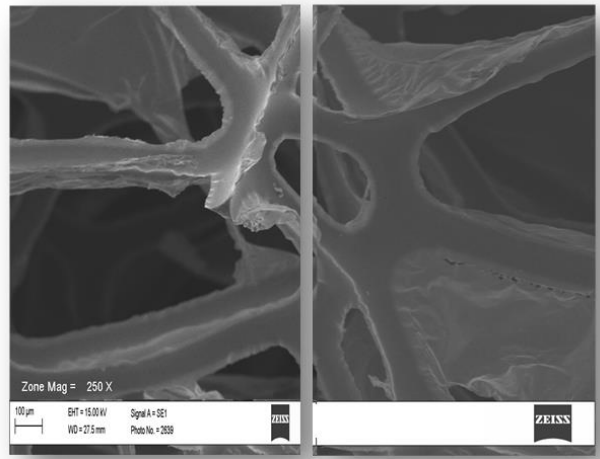
Mikro gözenekli poliüretan (sünger) immobilizasyon malzemesi olarak kolay temin edilmesi ve ucuz olması açısından tercih edilmiştir. Elde edilen SEM görüntülerine göre biyofilm kalınlığının belli bir seviyeye kadar oluştuğu ve deneysel çalışmada immobilizasyonun sağlandığı belirlenmiştir.

Akış hızı 2 mL/dk olarak ayarlanan kolonda giderim 250 mg/L ve 500 mg/L fenol konsantrasyonlarında gideriminin %85-90 aralığında değiştiği bu durumun reaktörün işletimi sırasında herhangi bir değişiklik göstermediği belirlenmiştir. Şekil 3a’da görüldüğü üzere ortamda bulunan 2,4-DKF içeriğinin her giriş konsantrasyonunda verimli bir şekilde arıtıldığı ancak 750 mg/L’lik koşulda 250 mg/L ve 500 mg/L konsantrasyonlarındaki giderime göre düşük olduğu belirlenmiştir. Barlak ve ark. tarafından yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar bu çalışmada elde edilen sonuçlara uygun bir şekilde; jet döngülü reaktörde ve kabarcık kolonunda ozonlama ile fenol giderimi karşılaştırmasında; jet döngülü reaktör de pH 11’de %96 fenol giderimi ve %55-65 arası KOİ giderimi gerçekleşirken kabarcık kolonda ozonlama ile pH 7.5 ve 2.2’de %84 fenol giderimi ve %56

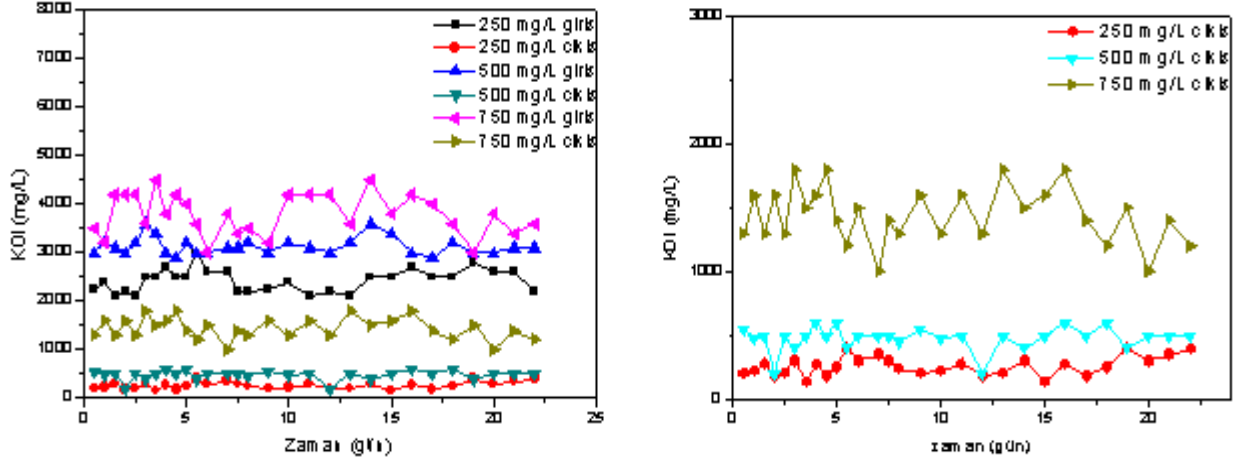
KOİ giderimi gözlemlendiği bildirilmiştir. Düşük pH ve yüksek ozonlama maliyeti ile kabarcık kolonda ozonlama tekniği yerine jet döngülü reaktör fenol gideriminde tercih edileceği rapor edilmiştir [23].

Şekil 3b’den anlaşılacağı gibi 750 mg/L’lik 2,4-diklorofenol içeriği aklime olmuş aktif çamur mikroorganizmaları açısından oldukça toksik seviyedir. Bu toksik seviyenin belirlenmesi için reaktör 90 gün boyunca işletilerek 30 gün aralıklarla sürekli sistemde verilen 2,4-DKF içeriği artırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre akıştaki 2,4-DKF 750 mg/L’ye çıkarılması ortamdaki mikrobiyolojik aktiviteyi sınırlamakta ve toksik seviyeye ulaştığını göstermektedir. P. putida ve P. Alcaligenes için 2,4-DCP’den 125 mg / L’ye kadar minimal inhibitör konsantrasyon 220 mg / L bulunurken [24]; Şahinkaya ve Dilek [25] tarafından yapılan çalışmada aklime edilmiş aktif çamur mikroorganizmaları aerobik kesikli reaktörler kullanarak 4-CP (4-klorofenol) parçalama yetenekleri açısından incelendiğinde 300 mg/L’ye kadar karışık kültürde bir inhibisyon gözlenmediği belirlenmiştir.

Şekil 4’de gösterildiği gibi 90 günlük sürekli sistem çalışmasında giriş suyundaki 2,4-DKF değeri 30 gün aralıklarla değiştirilmiş ve elde edilen deneysel verilere göre; 250 mg/L ve 500 mg/L aralığında atıksu da arıtım verimliliği oldukça yüksek iken 750 mg/L 2,4-DKF konsantrasyonunun de giderim verimi oldukça düşmüştür. KOİ giderimi sırasında zamana bağlı olarak görülen giderimdeki dalgalanmanın nedenlerinden biri; dolgulu kule içerisindeki fenolik birleşiklerin parçalanmasından sonra yan ürünlerin KOİ değerlerini yükseltmesi olabilir. Diğer bir nedeni ise 2,4-DKF’nin biyolojik olarak parçalanması sonrası oluşan ara ürünler mikrobiyolojik olarak toksik etkiye sahip olması olabilir. Düşük konsantrasyonlarda oluşan ara ürünler düşük iken yüksek konsantrasyonda artmıştır. Bu nedenle Şekil 3’de görüldüğü üzere fenol değeri arttıkça dalgalanmalar daha fazla olur.



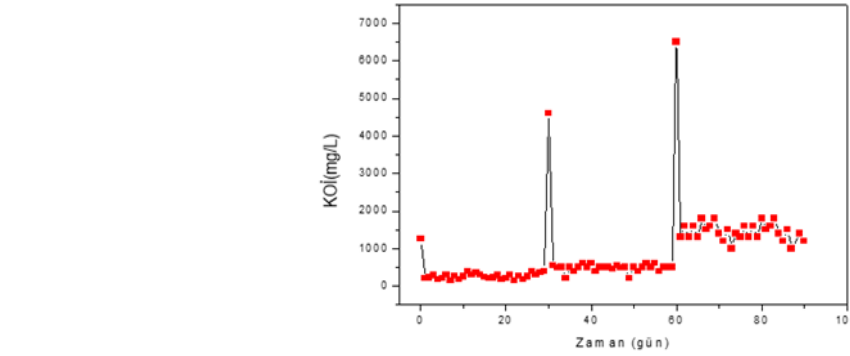
Şekil 2. Çalışmada kullanılan immobilize malzeme poliüretanın SEM görüntüsü (a. immobilizasyon öncesi b. alıkonma zamanı sonrası)



(a)

(b)

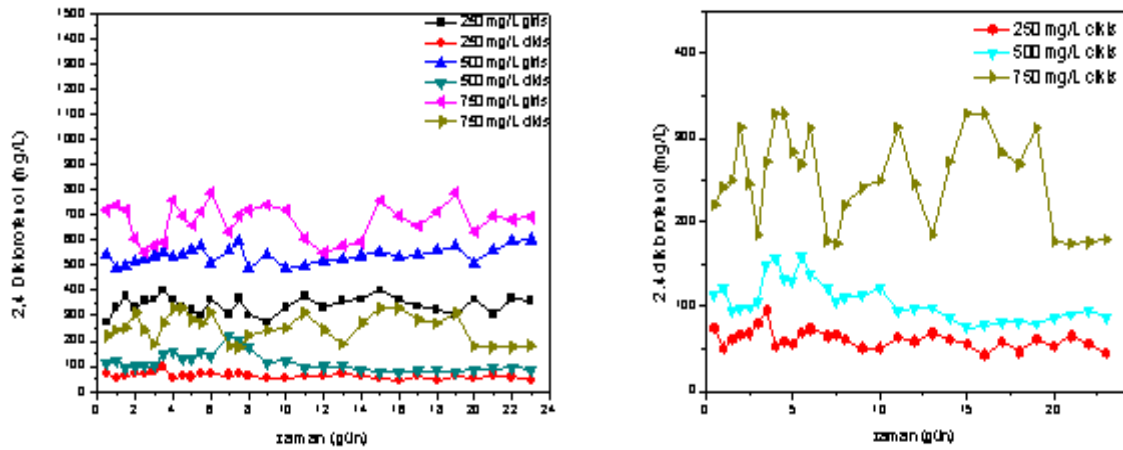
Şekil 3. Başlangıç fenol konsantrasyonunun KOİ giderimi üzerine etkisi (a. giriş ve çıkış değerleriyle b. çıkış değerleri)



(a)

(b)

Şekil 4. Sürekli sistemde 90 gün boyunca KOİ üzerine farklı fenol yüklemelerinin etkisi



(a)

(b)

Şekil 5. Sürekli sistemde 90 gün boyunca KOİ üzerine farklı fenol yüklemelerinin etkisi

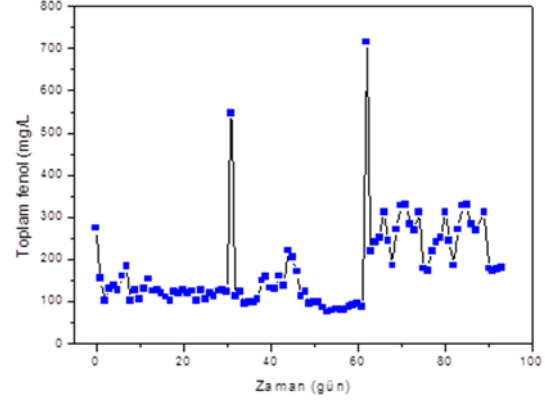
Şekil 5. Başlangıç fenol konsantrasyonunun fenol giderimi üzerine etkisi (a. giriş ve çıkış, b. çıkış değerleri)

Moussavia ve ark (2014) tarafından yapılan çalışmada KOİ değerinde zamana bağlı olarak oldukça değişken salınımlar gözlenmiştir. 200 mg/L Fenol içeriğine sahip atıksuda % 99 KOİ ve fenol giderimi olduğu belirlenmiştir [22]. Gupta ve ark. nın fenol giderimi üzerine yaptığı çalışma ise yaptığımız çalışma ile benzerlik göstermektedir. Gupta ve ark. çay atıkları üzerinde Bacillus. immobilize edilerek fenol giderimi gerçekleştirilmiş ve elde edilen verilere göre %70-80 arası fenol giderimi gerçekleştiği rapor edilmiştir [26]. Yapılan bu çalışmada ise 250 mg/L fenol içeren atıksuda % 84, 500 mg/L fenol içeren atıksuda % 86 giderim olduğu bulunmuştur. Bu durum Moussavia ve ark. tarafından yapılan çalışma ile paralellik göstermektedir.

Başlangıç fenol konsantrasyonunun fenol giderimi üzerine etkisi Şekil 5'de incelenmiştir. Elde edilen verilere göre fenol konsantrasyonunun artışı fenol giderim verimini düşürmüştür. Bunun nedeni fenol konsantrasyon artışı ve 2,4-DKF'nin toksik etkisinin konsantrasyon artışına bağlı olarak artmasından kaynaklıdır. Şekil 6'de sürekli sistemde 90 gün boyunca reaktörde zamana bağlı olarak artan fenol yüklemesine karşı giderim grafiği verilmiştir. Şekil 6'dan da anlaşıldığı üzere fenol konsantrasyonundaki ani değişimler parçalamaya üzerinde ciddi etkiler yaratmamış ancak fenol konsantrasyonu 750 mg/L'e ulaştığında giderimde salınımlar gözlenmiştir. Bu durum fenolün toksisitesi ile direkt ilgili olduğu düşünülmektedir. Ayrıca Şekil 6'da yer alan fenol yüklemelerinin etkisi Şekil 5b'de fenol giderimi grafiğinde 750 mg/L 2,4-DKF içerikli atıksuyun aklime olmuş mikroorganizmalarla gideriminde ortam organik içeriğinin dalgalanarak sürekli başlangıç seviyesine hatta ara ürünler yüzünden başlangıçtan yüksek organik yük varmış gibi davranmaktadır. Bu durum 2,4-DKF'ün biyolojik olarak parçalanmasından kaynaklanabilir. 250 mg/L fenol içeriğine sahip atıksuda fenol giderimi gerçekleştiği Şekil 5b'de görülmektedir. 500 mg/L fenol konsantrasyonuna sahip atıksuda başlangıçta fenol konsantrasyonu artsa da zamana bağlı olarak azalmaya geçmiştir. Bu durum belli bir konsantrasyona kadar mikroorganizmaların aktivitesinin devam ettiğini ve fenolün düşük konsantrasyonlarında da olsa giderildiği gözlenmektedir. Başak ve ark. yaptığı çalışmada şeker kamışı küspesi üzerine C. Tropicalis mikroorganizması immobilizasyonu ile oluşturulan paket yataklı reaktörde fenol giderimi çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada reaktör içerisinde 64 mg/g.sa maksimum biyolojik bozunma hızında %94 fenol giderimi tespit edilmiştir [27].

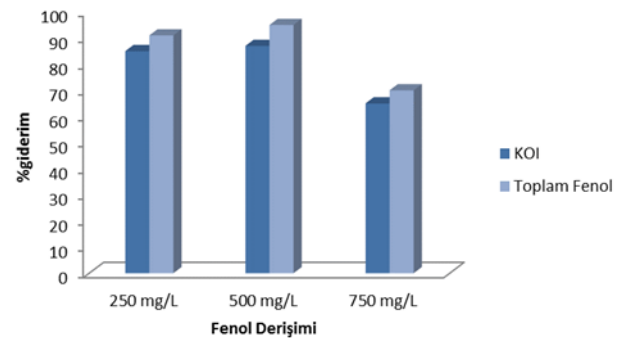
2,4-DKF doğa için karsinolojik özelliğe sahip bir kimyasal olup genel olarak pestisit üretiminde yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle evsel atıksularda bulunma olasılığı yüksektir. Su içerisinde mikro seviyelerde bulunması arıtma sistemleri için problem yaratmamakta ancak 500 mg/L'nin üzerindeki 2,4-DKF konsantrasyonu arıtma verimliliğini etkileyebilmektedir. Şekil 7'de da görüldüğü üzere fenol konsantrasyonunun artışı fenol giderimini düşürmüştür. Aklime edilmiş aktif çamur

isteminde optimal giderim veriminin 500 mg/L 2,4-DKF değerinde elde edildiği belirlenmiştir. 750 mg/L'lik fenol konsantrasyonunda giderim oranını 500 mg/L'ye göre düşük olup 500 mg/L'den sonra ortamdaki 2,4-Dikolorofenol içeriği toksik etki yaratmaya başladığı görülmektedir. Bu durum 750 mg/L 2,4-DKF değerinin toksik seviye olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6. Sürekli sistemde 90 gün boyunca fenol üzerine farklı fenol yüklemelerinin etkisi

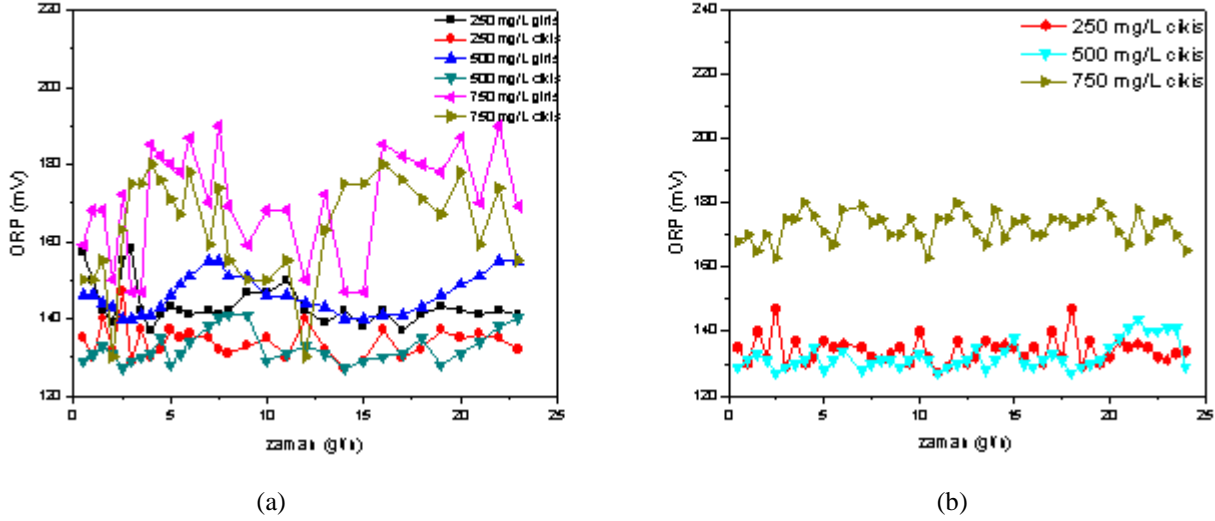
Fenol konsantrasyonu arttıkça KOİ'deki dalgalanmalar da artar. Buna bağlı olarak fenolik bileşiklerdeki parçalamaların olduğu da Şekil 8'de verilen ORP sonuçlarından anlaşılmaktadır. Sürekli sistemde sürekli olarak izlenen belli aralıklarda verilerin işlendiği Şekil 8'e göre, ORP verilerinde belirgin dalgalanmalar gözlenmiştir. Bu durum 2,4-DKF'nin parçalanması sorucu oluşan yükseltgenme potansiyellerinde değişikliğine ayrıca dalgalanmanın sürekli olarak devam etmesi parçalanmanın sürekli olduğunu göstermektedir. Ortamdaki 2,4-DKF değişimine bağlı olarak Şekil 8 incelendiğinde 2,4-DKF derişiminin ortamda artması ile ORP değeri daha yüksek olmasının yanında diğer düşük konsantrasyonlardaki dalgalanmalara benzerlik göstermiştir. Bu durum ise 2,4-DKF'ün yüksek konsantrasyonlarda düşük verimde olsa dahi parçalanmaya devam ettiğini gösterebilmektedir.



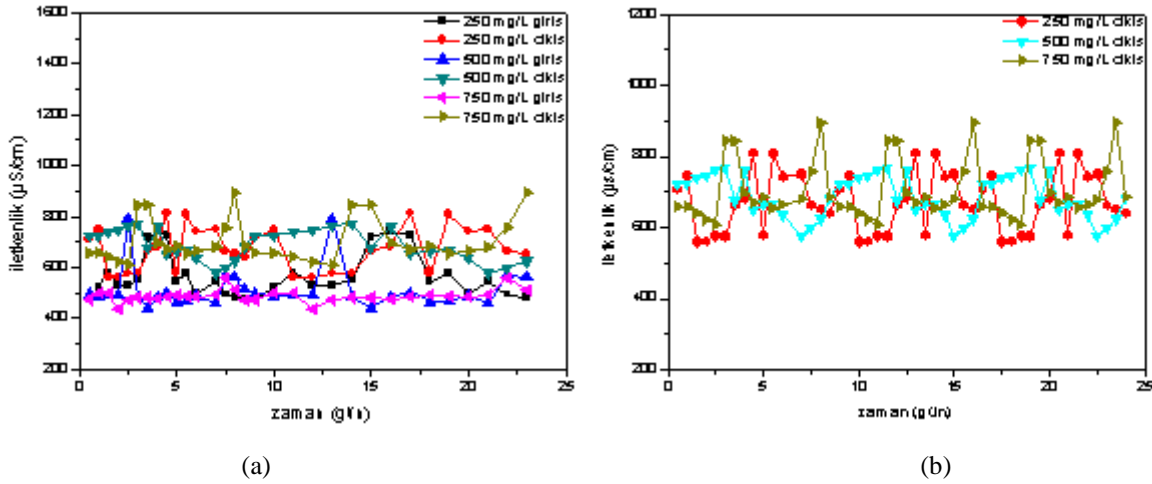
Şekil 7. Fenol Konsantrasyonunun KOİ ve fenol giderimine etkisi

Sürekli sistem içerisine yerleştirilmiş problar yardımıyla sürekli olarak iletkenlik değeri izlenmiş elde edilen veriler belli zaman aralıklarında alınarak Şekil 9'daki gibi

grafiklendirilmiştir. Elde edilen Şekil 9a' ya göre elektriksel iletkenlik ortam içeriğindeki çözülmüş madde içeriğine göre farklılık göstermektedir.



Şekil 8. Farklı fenol konsantrasyonunun ORP değerindeki değişimlere etkisi (a. giriş ve çıkış değerleriyle b. çıkış değerleri)



Şekil 9. Farklı fenol konsantrasyonunun elektriksel iletkenlik değerindeki değişimlere etkisi (a. giriş ve çıkış değerleriyle b. çıkış değerleri)

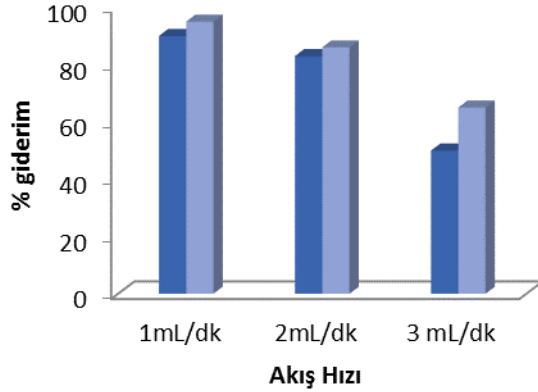
Şekil 9a'dan görüldüğü üzere çıkış suyundaki elektriksel iletkenlik değeri fermentasyon ortamına göre daha düşük seviyeye düşürülmüştür. Bu duruma 2,4-DKF'nin parçalanmasının izlenmesinde elektriksel iletkenlik ve ORP değişiminin izlenmesi mikrobiyal aktivite ve giderim hakkında önemli bir bilgi verdiğini göstermektedir. Deveci (2018) tarafından yapılan kesikli istem çalışmasında da ORP ve elektriksel iletkenlik değerleri parçalanmanın hızına ve süresine bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir. Elde edilen verilere göre; analizi kolay ve maliyeti düşük ORP ve elektriksel iletkenlik analizleri, COD ve Fenol analizlerini destekleyecek niteliktedir [21]. Jiang ve ark. tarafından *Alcaligenes faecalis* ile bir fenol giderimi üzerine yapılan çalışmada 76 saatlik bir inkübasyon süresi sonunda aklime olmuş türlerin 1.600

mg/L'nin maksimum seviyede giderildiği tespit edilirken inkübasyon sırasında takip edilen fiziksel parametreler de incelenmiştir. Fiziksel parametrelerde önemli değişikliğin sebebi biyolojik bozunma ve yan ürünlerden kaynaklanabileceği çalışmada da rapor edilmiştir [28]. Aynı durum pH değerinin izlenmesinde gözlenmemiştir. İndirgenme yükseltgenmede gerçekleşen değişim ortam pH değerini belirgin şekilde değiştirmemektedir. Farklı fenol giriş konsantrasyonlarında stok pH değeri 6,0-6,5 arasında tutulmuştur. Çıkış pH değerleri ise 6,6-7,7 arasında kalmıştır.

3.2 Akış hızının fenol giderimine etkisi

Yukarı akışlı reaktörlerin bir avantajı yüksek organik yüklerin verimli bir şekilde kullanılabilmesidir. Bu durumu

sürekli sistemde hidrolik akış hızı ile incelendiğinde akış hızının artışı fenol ve KOİ giderimini önemli seviyede etkilediği belirlenmiştir. Şekil 11'de görüldüğü gibi akış hızı 2 mL/dk olarak ayarlanan kolonda giderimin %85-90 aralığında değiştiği görülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre akış hızındaki artış giderim verimini düşürmektedir. Optimum akış hızı yapılan çalışmada 2 mL/dk olarak belirlenmiştir. Aksu ve Gönen tarafından yapılan sürekli dolgulı reaktörde aktif çamur mikroorganizmaları ile fenol giderimi çalışmasında 0.8 mL/dk akış hızında maksimum fenol giderimi gerçekleştiği ve akış hızı yükseldikçe fenol gideriminin düştüğü bildirilmiştir. Ayrıca kesme noktası süresi ve toplam adsorbe edilen fenol miktarı da artan akış hızı ile azaldığı ve bu durumun aktif çamur biyokütlesinin fenol biyosorpsiyonunda çözünen maddenin kolondaki yetersiz kalış süresinden etkilendiği rapor edilmiştir [29].



Şekil 11. Akış hızının fenol ve KOİ giderimi üzerine etkisi

4 Sonuçlar

Çalışmada 2,4-DKF'ün aklime olmuş aktif çamur mikroorganizmalarıyla biyodegradasyonu ve uzaklaştırılması çalışması yürütülmüştür. Çalışmada biyolojik bozunma ORP, elektriksel iletkenlik, KOİ ve fenol değişimi ile belirlenmiştir. 2,4-DKF'nin parçalanması sırasında oluşan ara ürünlerin zamana bağlı olarak değişimleri incelendiğinde ORP değerinde ve elektriksel iletkenlikte belirgin dalgalanmanın olduğu belirlenmiştir. Aynı dalgalanma benzer şekilde zamana bağlı azalan eğilimde KOİ değerinde belirgin olarak gözlenmiştir. Bu çalışma ile 500 mg/L'de %83 KOİ ve %86 fenol giderimi sağlanmıştır. 750 mg/L 2,4-DKF konsantrasyonunun aklime olmuş aktif çamur mikroorganizmaları için toksik seviyede olduğu KOİ ve Fenolün zamana bağlı değişimlerinin incelenmesi sırasında açıkça görülmüştür. Çalışmada her bir 2,4-DKF konsantrasyonu ayrı ayrı 21 gün işletilmiş, sürekli sistem içerisindeki değişimin izlenmesi için ise 90 gün boyunca 2,4-DKF değeri arttırılarak işletilmiştir.

Son derece tehlikeli ve kanserojen özelliğe sahip bu tip atıksuların özel olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu çalışma ile özellikle endüstriyel tesislerin olduğu organize sanayi bölgelerinin arıtma sistemlerine modifiye edilerek yüksek arıtım verimliliği sağlanabilir. Ayrıca çalışmanın

geliştirilmesi için aktif çamur içerisinde izole edilecek özel bakteri türleri ile çalışmalar yapılabilir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %8

Kaynaklar

- [1] R. Mtibaa et al., Biodegradation and toxicity reduction of nonylphenol, 4-tert-octylphenol and 2,4-dichlorophenol by the ascomycetous fungus *Thielavia* sp HJ22: Identification of fungal metabolites and proposal of a putative pathway. *Sci. Total Environ.*, 708, 2020.[doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135129](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135129).
- [2] T. Rasheed, M. Bilal, C. Li, F. Nabeel, M. Khalid, and H. M. N. Iqbal, Catalytic potential of bio-synthesized silver nanoparticles using *Convolvulus arvensis* extract for the degradation of environmental pollutants. *J. Photochem. Photobiol. B Biol.*, 181, 44–52, 2018.[doi: 10.1016/j.jphotobiol.2018.02.024](https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2018.02.024).
- [3] I. B. Gomes, L. C. Simões, and M. Simões, The effects of emerging environmental contaminants on *Stenotrophomonas maltophilia* isolated from drinking water in planktonic and sessile states. *Sci. Total Environ.*, 643, 1348–1356, 2018.[doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.263](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.263).
- [4] Y. Luo et al., A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment. *Sci. Total Environ.*, 473–474, 619–641, 2014.[doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.12.065](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.12.065).
- [5] A. A. Oluwasanu, Fate and toxicity of chlorinated phenols of environmental implications: A Review. *Med. Anal. Chem. Int. J.*, 2(4), 2018.[doi: 10.23880/macij-16000126](https://doi.org/10.23880/macij-16000126).
- [6] S. M. Blunt et al., Association between degradation of pharmaceuticals and endocrine-disrupting compounds and microbial communities along a treated wastewater effluent gradient in Lake Mead. *Sci. Total Environ.*, 622(623), 1640–1648, 2018. [doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.052](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.052).
- [7] P. Van Aken, R. Van den Broeck, J. Degève, and R. Dewil, The effect of ozonation on the toxicity and biodegradability of 2,4-dichlorophenol-containing wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 280, 728–736, 2015.[doi: 10.1016/j.cej.2015.06.019](https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.06.019).
- [8] N. C. Saha, F. Bhunia, and A. Kaviraj, Toxicity of phenol to fish and aquatic ecosystems. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 63(2), 195–202, 1999.[doi: 10.1007/s001289900966](https://doi.org/10.1007/s001289900966).
- [9] WHO, *Pharmaceuticals in Drinking Water: Public Health and Environment Water, Sanitation, Hygiene and Health*, 2011.
- [10] H. Cabana, J. P. Jones, and S. N. Agathos, Elimination of endocrine disrupting chemicals using white rot fungi and their lignin modifying enzymes: A review, *Eng. Life Sci.*, 7(5), 429–456, 2007.[doi: 10.1002/elsc.200700017](https://doi.org/10.1002/elsc.200700017).

- [11] Z. Huang et al., Toxicity mechanisms and synergies of silver nanoparticles in 2,4-dichlorophenol degradation by *Phanerochaete chrysosporium*. *Journal of Hazardous Materials*, 321, 37–46, 2017.[doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.08.075](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.08.075).
- [12] T. Janicki, M. Krupiński, and J. Długoński, Degradation and toxicity reduction of the endocrine disruptors nonylphenol, 4-tert-octylphenol and 4-cumylphenol by the non-ligninolytic fungus *Umbelopsis isabellina*. *Bioresour. Technol.*, 200, 223–229, 2016.[doi: 10.1016/j.biortech.2015.10.034](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.10.034).
- [13] R. K. Rajendran, S.-L. Huang, C.-C. Lin, and R. Kirschner, Biodegradation of the endocrine disrupter 4-tert-octylphenol by the yeast strain *Candida rugopelliculosa* RRKY5 via phenolic ring hydroxylation and alkyl chain oxidation pathways, *Bioresour. Technol.*, 226, 55–64, 2017.[doi: 10.1016/j.biortech.2016.11.129](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.11.129).
- [14] M. Bajaj, C. Gallert, and J. Winter, Biodegradation of high phenol containing synthetic wastewater by an aerobic fixed bed reactor. *Bioresour. Technol.*, 99(17), 8376–8381, 2008.[doi: 10.1016/j.biortech.2008.02.057](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.02.057).
- [15] G. Mujtaba, M. Rizwan, G. Kim, and K. Lee, Removal of nutrients and COD through co-culturing activated sludge and immobilized *Chlorella vulgaris*. *Chemical Engineering Journal*, 343, 155–162, 2018.[doi: 10.1016/j.cej.2018.03.007](https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.03.007).
- [16] H. Li et al., Production of polyhydroxyalkanoates by activated sludge: Correlation with extracellular polymeric substances and characteristics of activated sludge. *Chem. Eng. J.*, 361, 219–226, 2019.[doi: 10.1016/j.cej.2018.12.066](https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.12.066).
- [17] Q. Yu et al., Bioaugmented activated sludge degradation of progesterone: Kinetics and mechanism. *Chemical Engineering Journal*, 352, 214–224, 2018.[doi: 10.1016/j.cej.2018.06.159](https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.06.159).
- [18] X. Liu, W. Yuan, M. Di, Z. Li, and J. Wang, Transfer and fate of microplastics during the conventional activated sludge process in one wastewater treatment plant of China. *Chem. Eng. J.*, 362, 176–182, 2019.[doi: 10.1016/j.cej.2019.01.033](https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.01.033).
- [19] M. Cai et al., Improving dewaterability and filterability of waste activated sludge by electrochemical Fenton pretreatment. *Chem. Eng. J.* 362, 525–536, 2019.[doi: 10.1016/j.cej.2019.01.047](https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.01.047).
- [20] D. Dölgen and M. N. Alparslan, Biyolojik filtre reaktörler (BFR) için dolgu malzemesi alternatifleri. *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Derg.*, 4(3), 13–26, 2002.
- [21] E. Ü. Deveci, Treatability of wastewater containing 2,4 dichlorophenol using acclimated activated sludge microorganisms in packed upflow column bioreactor. *Polish J. Environ. Stud.*, 27(5), 1997–2005, 2018.[doi: 10.15244/pjoes/78045](https://doi.org/10.15244/pjoes/78045).
- [22] A. Nuhoglu and B. Yalcin, Modelling of phenol removal in a batch reactor. *Process Biochem.*, 40(3–4), 1233–1239, 2005.[doi: 10.1016/j.procbio.2004.04.003](https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.04.003).
- [23] M. S. Barlak, N. Değermenci, İ. Cengiz, H. Ucu Özel, and E. Yildiz, Comparison of phenol removal with ozonation in jet loop reactor and bubble column. *J. Environ. Chem. Eng.*, 8(5), no. 104402, 2020.doi.org/10.1016/j.jece.2020.104402.
- [24] I. Gallizia, S. McClean, and I. M. Banat, Bacterial biodegradation of phenol and 2,4-dichlorophenol. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 78(9), 959–963, 2003.[doi: 10.1002/jctb.890](https://doi.org/10.1002/jctb.890).
- [25] E. Sahinkaya and F. B. Dilek, Biodegradation of 4-chlorophenol by acclimated and unacclimated activated sludge—Evaluation of biokinetic coefficients. *Environ. Res.*, 99(2), 2, 243–252, 2005.<https://doi.org/10.1016/j.envres.2004.11.005>.
- [26] K. Kumar Gupta and D. Devi, Biodegradation of low density polyethylene by selected bacillus sp. *Gazi Univ. J. Sci.*, 32(3), 802–813, 2019.[doi: 10.35378/gujs.496392](https://doi.org/10.35378/gujs.496392).
- [27] B. Basak et al., Biodegradation of high concentration phenol using sugarcane bagasse immobilized *Candida tropicalis* PHB5 in a packed-bed column reactor. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 180, 317–325, 2019.
- [28] Y. Jiang, J. Wen, J. Bai, X. Jia, and Z. Hu, Biodegradation of phenol at high initial concentration by *Alcaligenes faecalis*. *J. Hazard. Mater.*, 147(1), 672–676, 2007.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.05.031.
- [29] Z. Aksu and F. Gönen, Biosorption of phenol by immobilized activated sludge in a continuous packed bed: prediction of breakthrough curves. *Process Biochem.*, 39(5), 599–613, 2004.[doi.org/10.1016/S0032-9592\(03\)00132-8](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(03)00132-8).





Elektrik ark ocağı ile üretim yapan bir demir-çelik tesisinin mevcut en iyi teknikler kapsamında değerlendirilmesi

Evaluation of an iron and steel mill producing by electric arc furnace in the scope of best available technics

Gülizar Gökcecik¹ , Hakan Dulkadiroğlu^{2,*} 

^{1,2} Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 50300, Nevşehir, Türkiye

Özet

Ülkemizin gelişen ve üreten sektörü olan demir-çelik sanayii, meydana getirdiği atık miktarı ile de büyük bir öneme sahiptir. Cevher ve hurda metalden üretim gerçekleştiren demir-çelik sektörü, hammadde türüne göre entegre ve elektrik ark ocaklı demir-çelik tesisi olarak ikiye ayrılmaktadır. Demir-çelik tesislerinden kaynaklanan katı atıkların birçok alanda geri dönüşümü sağlanabilmekte ve ekonomiye katkı sağlamaktadır. Bu çalışma kapsamında, elektrik ark ocağı ile üretim yapan bir demir-çelik tesisinin Mevcut En İyi Teknikler (MET) kapsamında değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Ülkemizdeki elektrik ark ocaklı tesislerden biri olan Baştuğ Metalurji San. A.Ş. demir-çelik tesisinin çelikhane ünitesi MET kapsamında incelenmiştir. İşletmenin çelikhane bölümünde yapılan incelemelerde mevcut durumun, MET Referans Dokümanı (BREF) ile büyük oranda uyumlu olduğu ve Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrol Direktifi'nin gereklerini karşıladığı tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Demir-çelik, Mevcut en iyi teknikler, Geri dönüşüm, Yeniden kullanım, Endüstriyel atık

1 Giriş

Demir-çelik üretimi sırasında bir ton çelik başına 400 kg'ı aşan miktarlarda katı atık oluşur [1]. Oluşan bu katı atıkların gelişigüzel çevreye atılması veya tesislerin boş sahalarında biriktirilmesi, içerdikleri toksik etkili ağır metaller ve bileşiklerin yağmur ve kar suları ile yeraltı sularına geçmesine neden olabilmektedir. Bununla birlikte toprağa karışarak hem bitki örtüsünü hem de hayvan ve insan sağlığını önemli ölçüde tehdit etmektedir. Oluşan katı atıkların bertaraf edilmesi durumunda ise ağır ekonomik yük oluşmaktadır. Demir-çelik tesislerinde oluşan yan ürünlerin geri kazanımı ve yeniden kullanımı Dünya Çelik Örgütü tarafından sıfır atığa ulaşmanın en iyi yolu olarak değerlendirilmiştir.

Sanayinin pek çok dalıyla ilişkili olan demir-çelik sektörü; en başta inşaat sektörü olmak üzere her türlü makine-ekipman imalatı, otomotiv sanayii, motorlu taşıtlar sanayii vb. için girdi sağlamaktadır. Sektörün ana hammaddesi cevher ve hurda olup, temel çıktısı ise ham

Abstract

Iron and steel industry, which is the developing and producing sector of our country, has a great importance with the amount of waste it generates. The iron and steel industry, which produces from ore and scrap metal, is divided into two type depending on the raw material as integrated and electric arc furnace. Solid wastes from iron and steel plants can be recycled in many areas and contribute to the economy. Within the scope of this study, it is aimed to evaluate of an iron and steel mill producing by electric arc furnace in the scope of Best Available Technics (BAT). The steelwork unit of Baştuğ Metallurgy Co. Inc. iron and steel plant, which is one of the electric arc furnace facilities in Turkey, has been examined within the scope of the BAT. According to the results of investigation carried out in the steel plant, it was determined that the current situation is highly compatible with BREF (BAT Reference Document) and the plant meets the requirements of IPPC (Integrated Pollution Prevention and Control) Directive.

Keywords: Iron-steel, Best available technics, Recycling, Reuse, Industrial waste

çeliktir. Uzun (kütük) ve yassı (slab) yarı mamuller ham çelikten üretilen son ürünlerdir. Haddelme işleminden sonra yassı yarı mamullerden rulo sac ile birlikte sac levha üretimi gerçekleştirilmektedir. Yine haddelme süreci sonunda uzun yarı mamuller inşaat demiri, filmaşın, kangal, dikişsiz boru, profil, ray, lama gibi ürünler elde edilmektedir. Galvanizleme ve boya işlemleri tüketici isteğine göre gerçekleştirilmektedir.

Ülkemizde sürekli gelişim gösteren demir-çelik sektörü üretim kapasitesini gün geçtikçe yükseltmektedir. Demir-çelik tüketimi ülkemizde kişi başına 415 kg civarında iken, gelişmiş ülkelerde bu miktar 400-500 kg aralığındadır. 1983 yılında Türkiye ham çelik üretiminde 3.8 milyon ton ve %0.57'lik pay ile dünyada 28. ülke konumundayken, 2011 yılında 34.1 milyon tona ulaşarak ilk 10 arasına girmeyi başarmıştır. 2013 yılında ise ham çelik üretim miktarını 34.7 milyon tona yükselerek dünya piyasasında ortalama %2.1'lik paya sahip olmuştur. Türkiye, günümüzde dünyada çelik

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: hakandulkadiroglu@nevsehir.edu.tr (H. Dulkadiroğlu)

Geliş / Received: 11.11.2020 Kabul / Accepted: 12.02.2021 Yayımlanma / Published: 27.07.2021

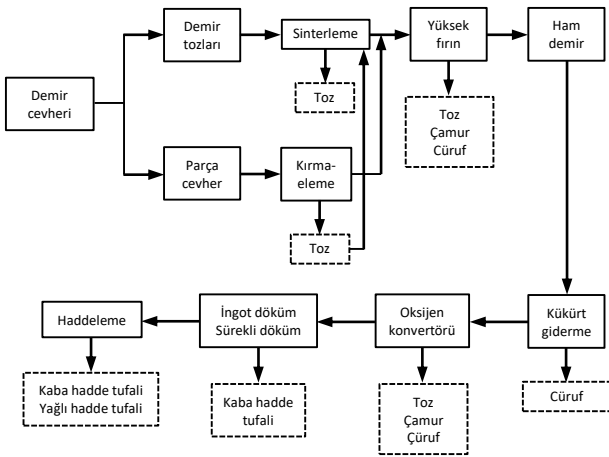
doi: 10.28948/ngumuh.824701

üretimi yapan 65 ülke arasında 8. sırada, Avrupa'da ise 2. sırada yer almaktadır [2-4].

Demir-çelik üretimi sırasında oluşan katı atıkların içerisinde cüruf %70-80'lik bir oranla en yüksek paya sahiptir [1]. Diğer oluşan katı atık türleri ise yüksek fırın toz ve çamurları, sinter fabrikalarının tozları, çelikhane toz ve çamurları, pota metalurji tesisleri tozları, yağlı tufaller, haddehane tufalleri ve ark ocağı tozlarıdır. Genel anlamda bu atıklar tozlar, çamurlar ve tufaller biçiminde 3 ana başlık altında toplanır (Şekil 1) [5].

Demir-çelik tesislerinde oluşan katı atıkların büyük bir kısmını oluşturan cürufların dışında kalan, içerisinde demir ve karbon bulunduran ve değerli atık olarak nitelendirilen atıkların en önemlileri şunlardır [6]:

1. Yüksek fırın toz ve çamurları
2. Sinter tozları
3. Çelikhane toz ve çamurları
4. Pota metalurji tesisleri tozları
5. Yağlı tufaller
6. Haddehane tufalleri
7. Ark ocağı tozları



Şekil 1. Entegre demir-çelik tesislerinden ortaya çıkan atık türleri [7]

Yan ürün atık oksitler; tozlar, cüruflar, çamurlar ve yağlı yağsız tufaller olarak gruplara ayrılır. Ortaya çıkan toz, çamur ve tufaller ekonomik değeri olan atıklardır. Demir oksit ve karbon gibi önemli bileşikleri ihtiva ederler. Çoğunlukla bu atıkların geri dönüşümü, elek analizi ve kimyasal analizi yapıldıktan sonra sinter ünitesinden geçirilerek yüksek fırınlarda sağlanır. Yan ürün oksitlerin geri dönüşümünün birtakım dezavantajları vardır [8, 9].

Cüruf: Çevresel ve ekonomik getiri sağlayan cürufun geri dönüşümü tesise enerji tasarrufu sağlarken, bertaraf maliyetini ve atığı azaltmaya yardımcı olmaktadır. Ayrıca tesislerdeki fırınların ömrünü uzatarak sektöre büyük kazançlar sağlamaktadır [10]. Atık cürufların geri kazanım alternatiflerinden biri yol yapımında kullanım olup; malzeme içerisinde bulunan organik ve inorganik tehlikeli maddelerin yağmur ve kar sularıyla içme suyu ve yeraltı sularına sızması durumu bu uygulamada dikkat edilmesi gereken önemli bir noktadır. Yeraltı sularına karışması

durumunda, oluşan kirleticiler çevre için büyük sorunlara neden olabilmektedir [11]. Oluşan cürufların diğer değerlendirme alternatifleri 4 şekilde olabilmektedir [12];

1. Demir-çelik sektörü için sentetik cüruf yapıcı (alüminyum esaslı flaks) olarak kullanılması,
2. Alüminyum endüstrisi için tuz flaksları olarak kullanılması,
3. İkincil alümina üretiminde kullanılması,
4. Çimento endüstrisi için katkı malzemesi olarak kullanılması.

Yüksek Fırın Baca Tozları ve Çamurları: Demir-çelik üretiminde oluşan toz atıkların içeriğinde yüksek miktarda demir oksit bulunduğundan değerli hammadde özelliği taşımaktadırlar ve çevre mevzuatının katı ve tehlikeli atıklar için getirdiği kısıtlamalardan dolayı bu toz atıkların sahada imha edilmesi oldukça maliyetlidir. Bu durumdan dolayı oluşan toz ve diğer atıkların geri kazanımı zorunlu bir hal almaktadır. Toz atıkların geri kazanımı sırasında sinterleme adı verilen özel bir işleme tabi tutulması gerekmektedir [13].

Sinter Tozları: 19. yüzyılda metal endüstrisinde kesikli bir işlem olarak ortaya çıkan sinterleme, demir cevherlerinin yanı sıra bakır ve kurşun cevherleri içinde kullanılmıştır. Sinterleme toz cevherlerin aglomerasyon yolu ile yüksek fırın için istenen parça büyüklüğüne, mukavemete ve gaz geçirgenliğine sahip duruma getirilmesi işlemidir. İşlem sonucunda büyük ve gözenekli parçalar elde edilir. Sinterleme, pudra yapısındaki partiküllerin atomlarının, ısı etkisi ile oluşan kısmi ergime sonucu ufak parçaların temas yüzeylerinden birbirine yapışmaları, yeniden kristalleşme ile difüzyon bağlarının oluşması ve parçaların birbirine yapışmalarını sağlayan hematit ve manyetit kristallerinin büyümesi işlemi olarak da tanımlanabilir. Bu işlemler toz cevherlerle karıştırılmış olan kok tozunun yanması sırasında meydana gelmekte ve sabit veya hareketli sinter makineleriyle yapılmaktadır [14].

Tufal: Demir-çelik tesislerinde üretim sonucunda meydana gelen yarı ürün niteliğindeki çeliğin kütük halini alması için sıcak halde haddelenerek şekil alması sağlanır. Bu süreç sonucunda, yüksek sıcaklık etkisiyle çelik yüzeyinde oksitlenme meydana gelerek ince bir demir oksit tabakası oluşur. Bu tabakaya tufal adı verilmektedir [5]. Tufaller yüksek oranda demir içerdiklerinden ve aynı zamanda zararlı safsızlıklar içermediklerinden, entegre demir-çelik tesislerindeki sinter fabrikasında kullanılabilir ve hatta dışarıdan satın alınmaktadır [15, 16]. Tehlikeli atıklar içerisinde en büyük hacme sahip olan, sürekli döküm ve sıcak haddehanelerin su devridaim tesislerinden açığa çıkan yağlı tufal ise sinter tesisinde kullanılamamaktadır [17].

Avrupa Konseyi tarafından ilk olarak 24 Eylül 1996 tarihinde kabul edilen 96/61/EC kodlu "Integrated Pollution Prevention and Control" (IPPC), yani Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrol (EKÖK) direktifi "çevrenin bir bütün olarak üst seviyede korunmasını sağlamak amacıyla, atıkları da içeren tedbirler dahil olmak üzere, yüksek kirletici potansiyeline sahip sanayi ve tarım faaliyetlerinden kaynaklanan emisyonların önlenmesi için, bunun mümkün olmadığı durumlarda da havadaki, sudaki ve topraktaki emisyonların azaltımı için tasarlanmış tedbirleri ortaya

koyar". Direktif, 15 Ocak 2008 yılında 2008/1/EC koduyla revize edilmiş ve son olarak da 24 Kasım 2010 tarihinde 2010/75/EU kodlu ve "Industrial Emissions" (Endüstriyel Emisyonlar) başlıklı son hali kabul edilmiştir. Demir-çelik sektörü, Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrol Yönetmeliği Ek-1'de "Madde 1.3: Kok fırınları" ve "Madde 2: Metallerin üretilmesi ve işlenmesi" ile atıfta bulunulan endüstriyel faaliyet kategorileri arasına dahil edilmiştir [18, 19].

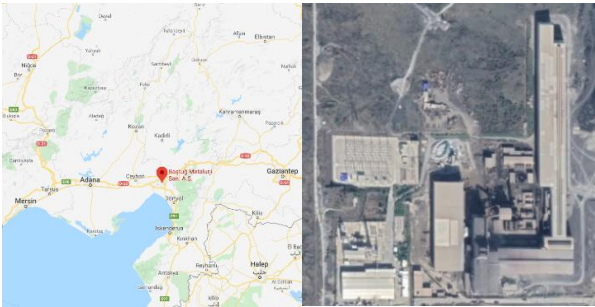
Bu çalışmada Mevcut En İyi Teknikler (MET) rehber dokümanlarının uygulamadaki karşılığının ne ölçüde gerçekleştiğinin ortaya konması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, seçilen bir elektrik ark ocaklı (EAO) demir-çelik işletmesindeki MET uygulamaları incelenmiş ve MET Referans Dokümanı (BREF) ile karşılaştırılarak kirlilik önleme ve geri kazanıma yönelik olarak tesisin mevcut durumu değerlendirilmiştir.

2 Materyal ve metot

2.1 Materyal

Çalışma kapsamında Osmaniye Organize Sanayi Bölgesi'nde faaliyet gösteren Baştuğ Metalurji A.Ş.'ye ait demir-çelik işletmesi incelenmek üzere seçilmiş ve işletmenin çelikhane ünitesi MET kapsamında değerlendirilmiştir (Şekil 2). İşletme 145.000'i kapalı, toplam 700.000 m²'lik alanda faaliyet göstermektedir. Yılda 2.000.000 ton sıvı çelik üretimi gerçekleştiren Baştuğ Metalurji'de, dünyada bir ilk olarak kullanılan teleskopik tip EAO günlük 6500 ton sıvı çelik üretim kapasitesine sahiptir. Son olarak yapılan entegre haddehane yatırımı ile Ø8-Ø65 mm arası nervürlü inşaat demiri üretim kapasitesine sahip olmakla birlikte, 2020 yılında Ø8-Ø40 mm arası nervürlü inşaat demiri üretilmektedir [20]. İşletme toplamda 755 kişiyi istihdam etmektedir.

Baştuğ Metalurji tesisinde 1 adet çelikhane, 1 adet nervürlü inşaat demiri haddehanesi, 1 adet oksijen üretim tesisi, 1 adet su tesisi ve 1 adet şalt tesisi bulunmaktadır. Tesiste toplam 229 MWh elektrik enerjisi tüketilmektedir. Baştuğ Metalurji, gerekli olan elektrik enerjisini özel bir elektrik şirketinden sağlamaktadır, tesis bünyesinde bir elektrik üretim tesisi bulunmamaktadır.



Şekil 2. Baştuğ Metalurji Demir-Çelik Tesisi'nin konumu ve uydu görüntüsü

Baştuğ Metalurji'nin iki ana ünite olarak üretim gerçekleştiren çelikhane ve haddehane tesislerinin 2014 yılı itibarıyla toplam üretim kapasiteleri şu şekildedir:

- Çelikhane tesisi toplam üretim kapasitesi: 2.000.000 ton/yıl sıvı çelik
- Haddehane tesisi toplam üretim kapasitesi: 1.250.000 ton/yıl

2.2 Metot

Seçilen tesis Avrupa Komisyonu tarafından yayımlanan Demir ve Çelik Üretimi için BREF [21] dokümanında yer verilen öneriler kapsamında incelenmiş ve yetkililerden gerekli veriler temin edilmiştir. Elde edilen bilgiler ışığında kirlilik önleme ve geri kazanıma yönelik olarak tesisin mevcut durumu değerlendirilmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

Avrupa Komisyonu tarafından yayımlanan Demir ve Çelik Üretimi için MET Referans Dokümanı (BREF) [21] esas alınarak işletmede yapılan incelemeler sonucunda elde edilen bulgular aşağıda açıklanmıştır.

3.1 Hammadde depolama ve kontrol

Hammadde olarak kullanılacak olan hurdalar işletmede bulunan kapasitesi yaklaşık 300.000 t, hacmi 610.000 m³ olan 8 adet kapalı holde depolanmaktadır. Bölümlere ayrılmış haldeki hollerde farklı çeşitteki hurdaları birbirine karıştırmadan stoklanabilmektedir. Farklı kalitedeki hurdalar 4 adet tavan vinci ile hurda sepetlerine aktarılmaktadır. Hurdanın gemiden tahliyesi, fabrika sahasına girişi, üretime çıkışı ve stok yerleri otomasyon sistemi ile kontrol ve takip edilmektedir. Tesis girişindeki hammadde ana giriş kantarında radyasyon ölçümü yapılarak tehlikeli maddelerin girişi önlenmektedir. Kurşun, bakır gibi metaller hammadde içerisinden ayıklanarak hurda bekleme sahasına koyulmaktadır. Hurda kalitesi kontrol mühendisleri tarafından incelenmektedir. Bu önlemlerin haricinde, hurdanın temin edildiği yer hakkında çeşitli incelemeler yapılarak, buna göre gerekli tedbirler uygulanmaktadır. İşletmedeki depolama ve hurda ayrımı faaliyetleri BREF ile uyumlu olarak yürütülmektedir. Her ne kadar demir-çelik üretiminde radyoaktivite denetiminin öneminden BREF'te bahsedilmiş olsa da MET içeriğinde bir uygulama önerilmemiştir. Bununla birlikte, gelen hurda içeriğinde bulunabilecek radyoaktif maddelerin üretim aşamasına dâhil edilmemesi için işletmede önemli tedbirler uygulanmaktadır.

3.2 Hurda ön ısıtma

Tesiste hurda ön ısıtma sistemi kullanılmaktadır. 2020 yılına ait proses bazında enerji sarfiyatları Tablo 1'de verilmiştir. Hurda ön ısıtma ile sağlanan enerji tasarrufu ölçülememekle birlikte, yıllık yaklaşık 60.000.000 kWh olarak tahmin edilmektedir.

Tablo 1. İşletmenin 2020 yılına ait proses bazındaki yıllık enerji tüketim değerleri

Proses	Enerji Sarfiyatı (kWh)
Ark ocağı	689.475.900
Pota ocağı	51.281.500
Çelikhane	60.594.453
Toz toplama	22.379.978
Atölye	352.054
Haddehane	55.193.652
Oksijen fabrikası	48.037.990
Toplam	927.315.527

3.3 Elektrikli ark ocağı optimizasyonu

Minimum enerji tüketimi ile üretimi maksimize etmeyi hedefleyen EAO proses optimizasyonu kapsamında; aşağıda belirtilen ve BREF [21] içeriğinde bulunan teknikler tesiste eksiksiz uygulanmaktadır:

- (Ultra) Yüksek güç uygulaması (UHP)
- Su soğutmalı yan duvarlar ve çatılar
- Oksi-yakıt yakıcılar ve oksijen verme
- Aşağıdan dökme sistemi
- Köpüklü cüruf uygulaması
- Pota veya ikincil metalurji
- Otomasyon sistemleri

170 t kapasiteye sahip alternatif akım (AC) ve teleskopik tipli EAO, 1590°C sıcaklıkta işletilmektedir. Dünya genelinde nadir kullanımı olan teleskopik tipli EAO'nun en önemli avantajı bir defa şarj edilmesidir.

Şarj sırasında fırına kömür ve kireç ilavesi yapılmaktadır ve bunun sonucunda hurdanın eriyik maddesi oluşmaktadır. Dökümden döküme gerçekleşen seferleri minimize etmek için 165 MW güce sahip fırın transformerleri ile UHP verilmektedir. Proseste dökümden döküme geçen zaman ortalama 45 dk'dır. Ark ocağı yatay kolon su soğutmalı ve kapalı devredir. Geri kalan sistemlerin soğutması açık devredir. Enerji miktarını minimize etmek, refrakter ömrünü maksimize etmek ve ısı kaybını en düşük seviyeye çekmek için "kapalı devre su soğutma sistemi" kullanılmaktadır. Eşanjörlerden geçen su öncelikle havuza, daha sonra soğutma kulesinden geçiş yaparak tekrar sisteme verilmektedir. Buharlaşma kaybı ham su ile tamamlanmaktadır. EAO'ya brülörler ile oksijen enjekte edilmekte ve bu sayede enerji tüketimi azaltılmaktadır.

EAO'larda cüruf-metal arasına oksijen ile ilave edilen karbonun cürufu köpürtmesi ve cüruf ile metalin birbirlerinden daha basit bir şekilde ayrılmasıyla oluşan sistem de tesiste mevcuttur. Ark ocağının alt bölümü aşağıdan dökme sistemi (EBT) olarak isimlendirilen holden oluşmakta ve bu hol vasıtasıyla da sıvı çelik potaya akmaktadır. Tüm bu bahsedilen sistemlerin takibi, merkezi kontrol denetim odasından kumanda edilen otomasyon sistemi ile verimli bir şekilde sağlanmaktadır.

3.4 İkincil metalurji

Tesiste ikincil metalurji pota ocağında yapılmaktadır. Pota ocağına gelen sıvı çelik analize alınmakta, analiz sonucuna göre istenilen kaliteye gelmesi için gerekli ferro alyaj ilaveleri yapılmakta ve belli sıcaklığa getirildikten sonra döküm pota ocağından çıkartılmaktadır. Tesiste ham çelik ark ocağından potaya akarken, potaya silolardan mangan, silis ve kireç verilmektedir.

Tesiste MET kapsamında bulunan vakum uygulamasına ikame olarak çalkantı gerçekleştirmek ve ısı dengesi sağlamak için çeliğe argon uygulanmaktadır.

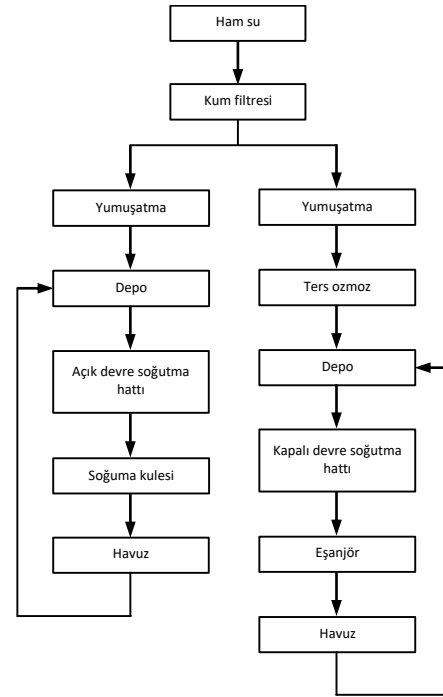
3.5 Kapalı devre su soğutma ve atıksu arıtma sistemleri

İşletmeden kaynaklanan endüstriyel nitelikli atıksular soğutma sularından ibarettir, başka atıksu kaynaklanmamaktadır. Şekil 3'te görüldüğü gibi; kuyulardan çekilen suya, önce istenen özelliklerin sağlanması amacıyla kimyasal maddeler ilave edilerek

şartlandırma yapılır, daha sonra kapalı devre su soğutma sistemine verilir. Soğutma sisteminde ısı transferi titanyum kaplı eşanjörler yardımıyla sağlanmaktadır. Kapalı devre su soğutma sistemi MET ile uyumlu şekilde uygulanmaktadır.

3.6 İleri düzey emisyon toplama ve temizleme sistemleri

İleri emisyon toplama sistemleri arasında baca veya tüm binada boşaltım için en uygun sistem 1 elektrot olduğu zaman 2. delik, 3 elektrot olduğu zaman ise 4. delik ile doğrudan çekmedir. İşletmede 3 elektrot bulunduğu için, birincil emisyonlar 4. delik aracılığıyla toplanmaktadır. 4. delik sistemine ek olarak bütün işletmeyi kapsayacak bir baca sistemi de inşa edilmiştir. Bu uygulama BREF'te geçen ve Şekil 4'te gösterilen emisyon toplama sistemlerinden ilk sıradakine karşılık gelmektedir. Çelikhane de kullanılan yakıt türevlerinden ortaya çıkacak olan emisyon, duman emme sistemine geçmektedir. Prosesteki geçişler 650.000 Nm³/sa kapasiteli 1 adet ana fan aracılığıyla emilerek sağlanmaktadır. Toplanan emisyon içerisindeki tozun %5'i dik siklonlarda, %2'si soğutucularda ve %93'ü filtrelemede tutulmaktadır. Tesiste oluşan emisyonların ortalama miktarları Tablo 2'de verilmiştir.



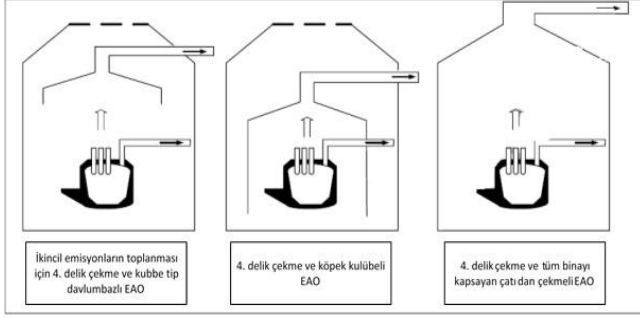
Şekil 3. Kapalı devre su soğutma sistemi

Tablo 2. Tesiste oluşan emisyonların ortalama miktarları

Toz (mg/Nm ³)	CO (mg/Nm ³)	NO (mg/Nm ³)	NO ₂ (mg/Nm ³)	SO ₂ (mg/Nm ³)
3,28	282	3,0	4,0	10

3.7 Etkin Sonradan Yakma

Tesiste "etkin sonradan yakma" işlemi, ayrı bir yakma odasında gerçekleştirilmektedir. Bu işlem sayesinde atık gazdaki CO ve H₂'in tam yanması sağlanarak, gaz temizleme sisteminde kontrolsüz reaksiyonlar oluşması önlenmektedir.



Şekil 4. EAO'larda kullanılan emisyon toplama sistemleri [19]

3.8 Linyit kok tozu enjeksiyonu

MET içeriğinde yer alan, atık gazların içeriğindeki toplam mikro kirleticileri azaltmada linyit kok tozu enjeksiyonu yöntemi işletmede uygulanmaktadır.

3.9 EAO cürüflarının geri dönüşümü

İşletmede açığa çıkan cüruf miktarı yıllık 250.000 t'dur. Oluşan cürufün küçük bir kısmı (tahmini %5) geri dönüşüm tesislerine verilmekte, geri kalanı ise hiçbir işlem görmeden açık sahalarda stokta bekletilmektedir. Depolama alanı, toprak ve yeraltı sularına sızıntıyı önlemek amacıyla beton ile kaplanmıştır. Tesisin katı atık bertaraf sistemi bulunmamaktadır.

3.10 EAO tozlarının geri dönüşümü

Tesiste EAO tozlarının geri dönüşümünü sağlayacak bir sistem bulunmamakla beraber, bunların geri dönüşümünü yapabilecek büyük veya küçük ölçekli firmalarla iletişime geçilerek satışı yapılmaktadır.

BREF dokümanında yer alan, prosese bağlı MET'in işletmede uygulanma durumu Tablo 3'te özetlenmiştir. Prosese bağlı MET'in işletmede eksiksiz uygulandığı görülmektedir.

Tablo 3. BREF'te belirtilen prosese bağlı MET ile Baştuğ Metalurji'deki uygulamaların karşılaştırması

BREF	Baştuğ Metalurji
(Ultra) Yüksek güç uygulaması (UHP)	Mevcut
Su soğutmalı yan duvarlar ve çatılar	Mevcut
Oksi-yakıt yakıcılar ve oksijen verme	Mevcut
EAO Proses Optimizasyonu	
Aşağıdan dökme sistemi	Mevcut
Köpüklü cüruf uygulaması	Mevcut
Pota veya ikincil metalurji	Mevcut
Otomasyon	Mevcut
Hurda Ön Isıtma	Mevcut
Kapalı Devre Su Soğutma Sistemleri	Mevcut

Boru sonu mevcut en iyi tekniklerin işletmedeki uygulanma durumu Tablo 4'te özetlenmiştir. EAO cürüflarının küçük bir kısmı geri dönüşüm firmalarına satılmakta, kalan kısmı ise atıl şekilde bekletilmektedir. EAO tozları baca tozu olarak firmalara satılmakta ve böylece geri dönüşüme katkı sağlanmaktadır.

Tablo 4. BREF'te belirtilen boru sonu MET ile Baştuğ Metalurji'deki uygulamaların karşılaştırması

BREF	Baştuğ Metalurji
İleri düzey emisyon toplama	Yapılmakta
Etkin sonradan yakma ve ileri düzey atık gaz arıtımı	Yapılmakta
Atık gaz arıtımında linyit kok tozu enjeksiyonu	Yapılmakta
EAO cürüflarının geri dönüşümü	Yapılmamakta (%5'i satılıyor)
EAO tozlarının geri dönüşümü	Yapılmamakta (Satılıyor)

4 Sonuçlar

Bu çalışma kapsamında demir-çelik tesislerinde oluşan katı atıklar ve geri dönüşüm teknikleri detaylı olarak incelenmiş, BREF dokümanındaki öneriler ile karşılaştırılmıştır. Ağır metal sanayi sektörü olan demir-çelik sektörü ton başına 400 kg aşan atık meydana getirmektedir. Böylesine atık oluşumunun kaçınılmaz olduğu durumlarda geri dönüşüm, tekrar kazanım ve ikincil hammadde elde etmek için atığın birtakım işlemler ile geri kazanılması veya enerji kaynağı olarak kullanılması gereklidir.

Demir-çelik tesislerinde oluşan katı atıklar; yüksek fırın tozları ve çamurları, sinter ünitesi tozları, çelikhane toz ve çamurları, pota metalurji tesisleri tozları, yağlı tufaller, haddehane tufalleri, ark ocağı tozları ve cüruftur. Bu atıkların büyük bir çoğunluğunu cüruf oluşturmaktadır. Oluşan cürufu değerlendirilerek geri dönüşümünü sağlamanın asıl amacı; cüruf içerisindeki alüminyumunu yüksek metali geri kazanarak oluşan ikincil cürufu ise çevre açısından etkisiz bir forma dönüştürerek bu atığı ekonomik bir değere dönüştürmektir.

Demir-çelik tesislerinde atık olarak meydana gelen baca tozları, çamurları ve tozlaştırma tozları yüksek metal içeriğinden dolayı hammadde değeri yüksek bir atıktır. Ancak içeriğinde yüksek miktarda kurşun, çinko ve diğer bazı ağır metalleri bulundurması ve tanecik boyutunun değişken olmasından dolayı tesiste geri dönüşümünü sağlamak oldukça zordur. Bu atıkların geri dönüşümünü sağlamak için yapılan teorik hesaplar ve yöntemler mevcut olmakla birlikte yeterli değildir.

Demir-çelik üretimi sonucu oluşan kütüklerin şekil alması için haddeleme işlemi sırasında yüksek sıcaklıktan dolayı oluşan ince demir oksit tabakası tufal olarak nitelendirilmektedir. Tesislerde atık olarak sınıflandırılan tufal aslında bir yan ürün olarak işlem görmektedir. İçerdiği yüksek demir miktarı ve zararlı bileşen içermediğinden dolayı entegre demir-çelik tesislerinin sinter ünitelerinde kullanılarak geri dönüşümü sağlanmaktadır.

Bu çalışma kapsamında incelenen Baştuğ Metalurji demir-çelik tesisinin çelikhane ünitesinin MET'e uyum durumu tespit edilerek mevcut veriler üzerinden değerlendirmeler yapılmıştır. Baştuğ Metalurji'de "(Ultra) yüksek güç uygulaması-(UHP), su soğutmalı yan duvar ve çatılar, oksiyakıt yakıcılar ve oksijen verme, aşağıdan dökme sistemi (EBT), köpüklü cüruf uygulaması, ikincil metalurji ve otomasyon sistemi" başlıklarını kapsayan EAO optimizasyonu tekniklerinin tümü tesiste mevcuttur. Hurda ön ısıtma tesiste kullanılmamaktadır. Bu da tesisin emisyon oranlarının artmasına sebep olmaktadır. Tesiste ark ocağı

yatay su kolonunda kapalı su soğutma sistemi kullanılırken, tesisin geri kalan bölümlerinde açık su soğutma sistemi kullanılmaktadır. BREF'te kapsam dışı bırakılan radyoaktivite kontrolü, tesis girişindeki ana kantarda bulunan radyasyon seviye ölçer cihazlar ile yapılmaktadır.

Boru sonu teknikler kapsamında ise "ileri düzey emisyon toplama, etkin sonradan yakma, ileri düzey atık gaz arıtımı, atık gaz arıtımında linyit kok tozu enjeksiyonu, EAO tozlarının ve cürufalarının geri dönüşümü" teknikleri kullanılmaktadır. Tesiste oluşan EAO cürufalarının az bir miktarı geri dönüşüm tesislerine gönderilirken, büyük çoğunluğu tesiste açık sahalarda bekletilmektedir. İşletmede açığa çıkan ortalama yıllık 250.000 t EAO cürufu için bir geri dönüşüm veya geri kazanım çözümü bulunması hem çevresel hem de ekonomik açıdan çok faydalı olacaktır. Benzer bir çalışma Erengüç [22] tarafından İÇDAŞ A.Ş.'ye ait EAO ile üretim yapan demir-çelik tesisinde yapılmış ve bu tesiste de MET'in büyük oranda uygulandığı tespit edilmiş; EAO cüruf ve tozlarının geri dönüşümü içinse mevcut bir sistemin olmadığı, fakat EAO cürufaları için doğal ve elektro magnetler aracılığı ile hizmet verecek bir katı atık arıtma tesisinin 2007 yılında, EAO tozlarının geri dönüşümü için tesisin de 2008 sonunda faaliyete geçeceği belirtilmiştir. Bu tesislerden elde edilen tecrübeler uygun bir çözüm üretilmesinde katkı sağlayabilir.

Diğer boru sonu tekniklerin büyük çoğunluğu tesiste eksiksiz uygulanmaktadır. Türkiye'de bir ilk olarak kullanılan AC tip, teleskopik tipli, 170 ton/döküm kapasiteli elektrik ark ocağı diğer türlere göre enerji ve üretim avantajı sağlamaktadır. İşletme, MET kapsamında sahip olduğu alt yapıda birkaç eksiğin giderilmesi ile EKÖK direktifine tamamen uyum sağlamak adına büyük bir zorlukla karşılaşmayacaktır.

İşletmelerde inceleme yapma ve bilgi almadaki zorluklar ve buna bağlı olarak ülkemizde benzer çalışmaların çok sınırlı olduğu göz önüne alındığında; bu çalışmanın demir-çelik endüstrisi için yürürlüğe konmuş olan EKÖK Yönetmeliği'nin uygulamadaki karşılığının değerlendirilmesi açısından literatüre önemli katkı sağlayacağı, bundan sonraki benzer çalışmalar için işletmelere örnek teşkil edeceği düşünülmektedir.

Teşekkür

İnceleme ve araştırma yapmak üzere işletmelerini bize açan, ihtiyacımız olan bilgi ve verileri bizimle paylaşarak bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde büyük katkı sağlayan Baştuğ Metalurji A.Ş.'ye teşekkür ederiz.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %13

Kaynaklar

[1] R. Robinson, Studies low temperature self reduction of by-products from integrated iron and steel making. PhD Thesis, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, 2008.

- [2] DOĞAKA, Demir çelik sektör raporu. T.C. Doğu Akdeniz Kalkınma Ajansı, Antakya, Hatay, Türkiye, 2014.
- [3] Sanayi ve Verimlilik Genel Müdürlüğü, Demir çelik sektör raporu. T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Ankara, Türkiye, 2019.
- [4] UNEP, Environmental aspects of iron and steel production – A technical review. United Nations Environmental Programme, Industry & Environment Technical Review Series, 1986.
- [5] G. Doğantepe, Hematit karakterli demir cevherinden ve yüksek fırın baca tozundan sünger demir üretilebilirliğinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye, 2013.
- [6] D. Bakar, Demir ve çelik tesislerinin yüksek demir ve karbon içeren atıklarını değerlendirme teknolojileri ve Erdemir için önerilen yöntemin tanıtımı. 3. Demir Çelik Kongresi ve Sergisi, Ereğli, Zonguldak, 22-24 Eylül 2005.
- [7] J. Philipp and R. Endell, How German steel industry is managing waste disposal. Steel Technology International, 275-279, 1996.
- [8] R. Robinson, High temperature properties of by-product pellets containing blast furnace flue dust. Thermochimica Acta, 432 (1), 112-123, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2005.04.015>
- [9] E. Erünsal ve S. Perçinel, Entegre demir çelik fabrikalarında oluşan katı atıkları değerlendirme teknolojilerindeki son gelişmeler. 1. Ulusal Demir Çelik Sempozyumu ve Sergisi, sayfa 987-994, Ereğli, Zonguldak, Türkiye, 3-5 Ekim 2001.
- [10] S. Dietz, Zero Waste Initiatives a Boon for the Scrap Metal Industry. Thermo Fisher Scientific, 2014. <https://www.thermofisher.com/blog/metals/zero-waste-initiatives-a-boon-for-the-scrap-metal-industry/>, Accessed 04.07.2019.
- [11] A. Yılmaz ve A. H. Yıldız, Cüruf atıklarının yol inşaatında kullanılması durumunda çevresel etkileri. Uluslararası Burdur Deprem ve Çevre Sempozyumu, sayfa 267-279, Burdur, Türkiye, 7-9 Mayıs 2015.
- [12] N. Sözbir, M. Akçil ve H. Okuyucu, Alüminyum cürufundan alüminyum metali ve flaks eldesi. ISEM2014 2nd International Symposium on Environment and Mortality, sayfa 1108-1113, Adıyaman, Türkiye, 24-26 Ekim 2014.
- [13] N. P. Nayak, Characterization and utilization of solid wastes generated from Bhilai Steel Plant. MSc Thesis, National Institute of Technology, Department of Mining Engineering, Rourkela, India, 2008.
- [14] M. Boyrazlı, Demir cevheri içerisindeki safsızlıkların olumsuz etkilerinin giderilme yollarının araştırılması. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2008.
- [15] M. Suk, S. Jo, S. Kim, K. Lee, and J. Park, X-Ray observation of phosphorus vaporization from steelmaking slag and suppression method of phosphorus reversion in liquid iron. Metallurgical and Materials Transactions B, 37B, 100-107, 2006.

- [16] İskenderun Katı Atık Bertaraf Tesisi ÇED Başvuru Dosyası, Payas, Dörtyol, Hatay, 2009.
- [17] G. Önkibar, Entegre demir çelik tesisi tufalinden doğrudan redüklenme yöntemi ile ham demir üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2006.
- [18] Council Directive 96/61/EC, Concerning integrated pollution prevention and control. Official Journal of the European Communities, 1996.
- [19] AB Konseyi, Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrol (IPPC) Direktifi, Demir ve çelik üretiminde en iyi teknolojiler referans dokümanı. Demir Çelik Üreticileri Derneđi, Ankara, Şubat 2007.
- [20] Baştuğ Metalürji Resmi İnternet Sitesi, <https://bastugmetalurji.com.tr/index.php>, Accessed 30.04.2020.
- [21] R. Remus, M. A. Aguado-Monsonet, S. Roudier, and L. D. Sancho, JRS Reference Report: Best Available Techniques (BAT) reference document for iron and steel production. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies, Seville, Spain, 2013.
- [22] A. Erenğüç, AB Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrolü Direktifi (IPPC) için düzenleyici etki analizi ve bir uygulama; demir çelik endüstrisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2007.





Evsel katı atık oluşum miktarlarının küresel ve yerel mekânsal otokorelasyon yöntemleri ile incelenmesi

Investigation of generation of municipal solid waste with global and local spatial autocorrelations

Gülden Gök^{1,*} , Orhan Atakan Gürbüz² 

¹ Aksaray Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 68100, Aksaray Türkiye

² Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde, Türkiye

Özet

Katı atık oluşumlarının mekânsal olarak incelenmesi evsel katı atık sorunun bölgesel olarak nasıl davrandığını belirtmek açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada, ortalama günlük kişi başı katı atık miktarları(kg) 2014,2016 ve 2018 yılları için küresel ve yerel mekansal otokorelasyon yöntemleri ile incelenmiştir. Küresel otokorelasyon yöntem sonuçlarına göre katı atık oluşum oranları, istatistiksel olarak anlamlı pozitif otokorelasyon göstermiştir. Moran'ın I indeksi en yüksek 2014 yılı için 0,2980 olarak hesaplanmıştır. Yerel mekansal otokorelasyon yöntemlerinden, yerel Moran'ın I indeksi (LISA) kullanılmıştır. LISA sonuçlarına göre katı atık oluşum oranı düşük seviye olarak Güneydoğu Anadolu Bölgesi ve Doğu Akdeniz bölgelerinde kümelendiği görülmüştür. Yüksek seviyede kümelenme ise Kuzey Batı Trakya ve Ege Bölgelerinde görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Mekansal otokorelasyon, Moran'ın I indeksi, LISA, Geary'nin C oranı

1 Giriş

Kullanım ömrü tükenmiş ve kullanıcısı tarafından atıl olarak değerlendirilen materyal veya objelere atık denilmektedir [1]. Katı atıkların büyük bir kısmı ise insanların günlük aktiviteleri sonucu oluşan ve içerik bakımından çok çeşitli olan, evsel katı atıklardır [1]. Avrupa Birliğinde oluşan toplam atıkların sadece yaklaşık %9'unu evsel kaynaklı oluşan atıkların oluşturmasına rağmen gelecek 5 yılda evsel katı atık miktarının iki katı artacağı tahmin edilmektedir [2]. Değişen tüketim alışkanlıkları ve yaşam standartları sonucu yıllık yaklaşık olarak 11 milyar ton katı atık oluşmaktadır ve oluşan bu katı atıkların organik kısmı atmosfere salınan sera gazlarının da%5'ini oluşturmaktadır [3]. Çevresel etkilerini azaltmak, ayrıştırmak ve ekonomik geri dönüşler sağlamak için katı atıklar Türkiye'nin birçok ilinde kontrollü düzenli depolama alanlarında kontrol edilmektedirler [4].

Mekânsal otokorelasyon birbirine yakın konumlanan iki noktanın taşıdığı değerlerinde birbirine yakın olmasını istatistiksel olarak açıklayan bir kavramdır. Mekânsal otokorelasyon tekniği ile yapılan birçok farklı alanlarda çalışma vardır ve bu çalışmalar çevre [5-9], kimya[10],

Abstract

The spatial analysis of the municipal solid waste is significant to clarify how this issue behaves regionally. The municipal solid waste (kg) per capita per day was tested both global and local spatial autocorrelation methods. According to the global autocorrelation analysis results, solid waste generation rates showed statistically significant positive autocorrelation. The highest of the calculated Moran's I indexes was found for 2014. Among the local spatial autocorrelation methods, the local Moran's I index (LISA) was used. According to the LISA results, it was observed that the solid waste generation rate was clustered with low leveled values in the Southeastern Anatolia Region and the Eastern Mediterranean regions. The high leveled values were showed a clustered pattern in North Western Thrace and Aegean Regions.

Keywords: Spatial autocorrelation, Moran's I index, LISA, Geary's C ratio

arkeoloji [11], coğrafya [12], turizm[13], jeoloji [14] ve sosyoekonomi [15] gibi birçok alanda bulunmaktadır. Çevre alanında daha çok çevre yönetimi [5, 9], ve noktasal kaynaklı kirliliğin mekansal incelenmesine [6, 8] yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Mekânsal otokorelasyon analizleri iki ayrı şekilde değerlendirilebilir. Mekânsal otokorelasyon analizlerinin örnekleme bir bütün olarak ele alıp otokorelasyon istatistiğini veren analizlere küresel mekansal otokorelasyon analizleri denir ve en yaygın kullanılan analiz türleri Moran'ın I indeksi ile Geary'nin C istatistiğidir [16]. İkinci çeşit otokorelasyon analiz yöntemleri ise her bir veri unsurunun otokorelasyonlarının hesaplandığı Yerel Moran'ın I indeksi (Local Indicators of Spatial Association (LISA)) ve Getis Ord Gi istatistiğidir [17, 18]. Bu yerel analizler veri grubunda kümeleşme veya sapan değerlerin mekânsal olarak tespiti için kullanılır [8].

Bu çalışmanın amacı coğrafi bilgi sistemleri ile çevresel verilerin bir arada kullanılarak katı atıkların oluşum oranlarının illerin mekânsal konumlarına göre dağılımlarının incelenmesidir. Çalışma üç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada veri toplama ve sayısallaştırma işlemleri temel

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: gokgulden@gmail.com (G. Gök)

Geliş / Received: 30.01.2021 Kabul / Accepted: 22.03.2021 Yayımlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.871183

istatistik yöntemler ve bilgisayar yazılımları ile gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada ise verilerin küresel otokorelasyon yöntemleri ile otokorelasyon durumları ve istatistiksel anlamlılıkları tartışılmıştır. Son aşamada ise yerel otokorelasyon yöntemi ile her bir ilin katı atık oluşum miktarları diğer illerin konumlarına göre incelenerek verilerin mekânsal olarak anlamlı kümeler oluşturup oluşturmadıkları incelenmiştir.

2 Materyal ve metot

Katı atık verilerinin mekânsal analizinin gerçekleştiği bu çalışmada, nüfus ve katı atık verileri Türkiye İstatistik Kurumu resmi internet sayfasından temin edilmiştir. Belediye atık istatistikleri, TÜİK tarafından belediyeler tarafından toplanan atık miktarları 2001 yılından 2018 yılına kadar (2004 sonrası veriler iki yılda bir olmak kaydıyla) işlenmiştir [19]. İl nüfus verileri ise 2001-2006 tarihleri arasındaki TÜİK nüfus tahminleri ve 2007-2019 yılları arasındaki il nüfus verilerine ise TÜİK adrese dayalı nüfus kayıt sisteminden alınmıştır [20].

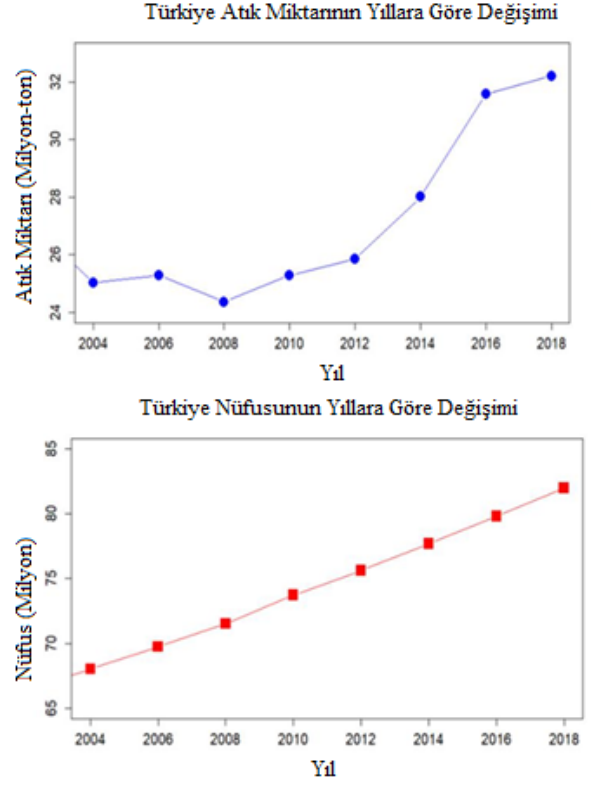
Bununla birlikte bu çalışmada mekânsal ve istatistiksel veriler üç farklı bilgisayar yazılımıyla irdelenmiştir. ArcGIS v.10.5 coğrafi bilgi sistemi yazılımı ile. shapefile uzantılı dosyalar ile TÜİK verileri birleştirilerek istatistiksel analizlere hazır hale getirilmiştir.

İstatistiksel analizler ile küresel mekânsal otokorelasyon analizleri R programlama dilinde (R v 4.0.3.) gerçekleştirilmiştir. Yerel mekânsal otokorelasyon analizleri için ise GeoDa v1.18 mekânsal veri analizi yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Normal dağılım için gerekli olan veri transformasyonları R programında ve kümelenme aykırı değerlerin haritalanması GeoDa programlarında gerçekleştirilmiştir [8].

2.1 Türkiye'nin katı atık durumu

Küresel ve yerel mekânsal oto korelasyon analizleri için oluşturulması gereken mekânsal ağırlık matrisleri, komşuluk veya noktalar arası mesafe ilişkilerine göre farklı şekillerde oluşturulabilir. Komşuluk ağırlıkları, özellikle poligon şeklinde olan mekânsal verilerin birbirleriyle olan sınır ilişkilerine göre hazırlanan ağırlık matris tablolarından oluşmaktadır. Mesafe ağırlıkları ise genellikle noktasal mekânsal veriler için kullanılır. Mesafe ağırlıkları, iki nokta arasındaki mesafelerin, üssel, dairesel ve ters mesafe olarak hesaplanabilir [21]. Bu çalışmada komşuluk ağırlık matrisi satır standardizasyon yöntemi ve birinci derece "queen" sürekliliği yöntemleri tercih edilerek [21] R programlama dili ve GeoDA programında ağırlık matrisleri oluşturulmuştur. Şekil.1.'de TÜİK verilerine göre Türkiye'nin nüfus ve toplanan katı atık miktarlarının yıllara göre değişimleri görülmektedir. Verilere göre en az toplanan katı atık miktarı 2008 yılında 24360856 ton olarak tespit edilmiştir. En fazla toplanan katı atık miktarı ise 2018 yılında 32209219 ton olarak tespit edilmiştir. Tablo 1. 'de 2014, 2016 ve 2018 yıllarında kişi başı atık miktarı verilerinin özet istatistikleri verilmiştir

Türkiye'de iller düzeyinde kişi başı atık miktarı verileri TÜİK tarafından toplam atık miktarının il nüfusuna oranının 365 güne bölünerek bin ile çarpılmalarıyla [kg/kişi-gün] hesaplanmıştır.

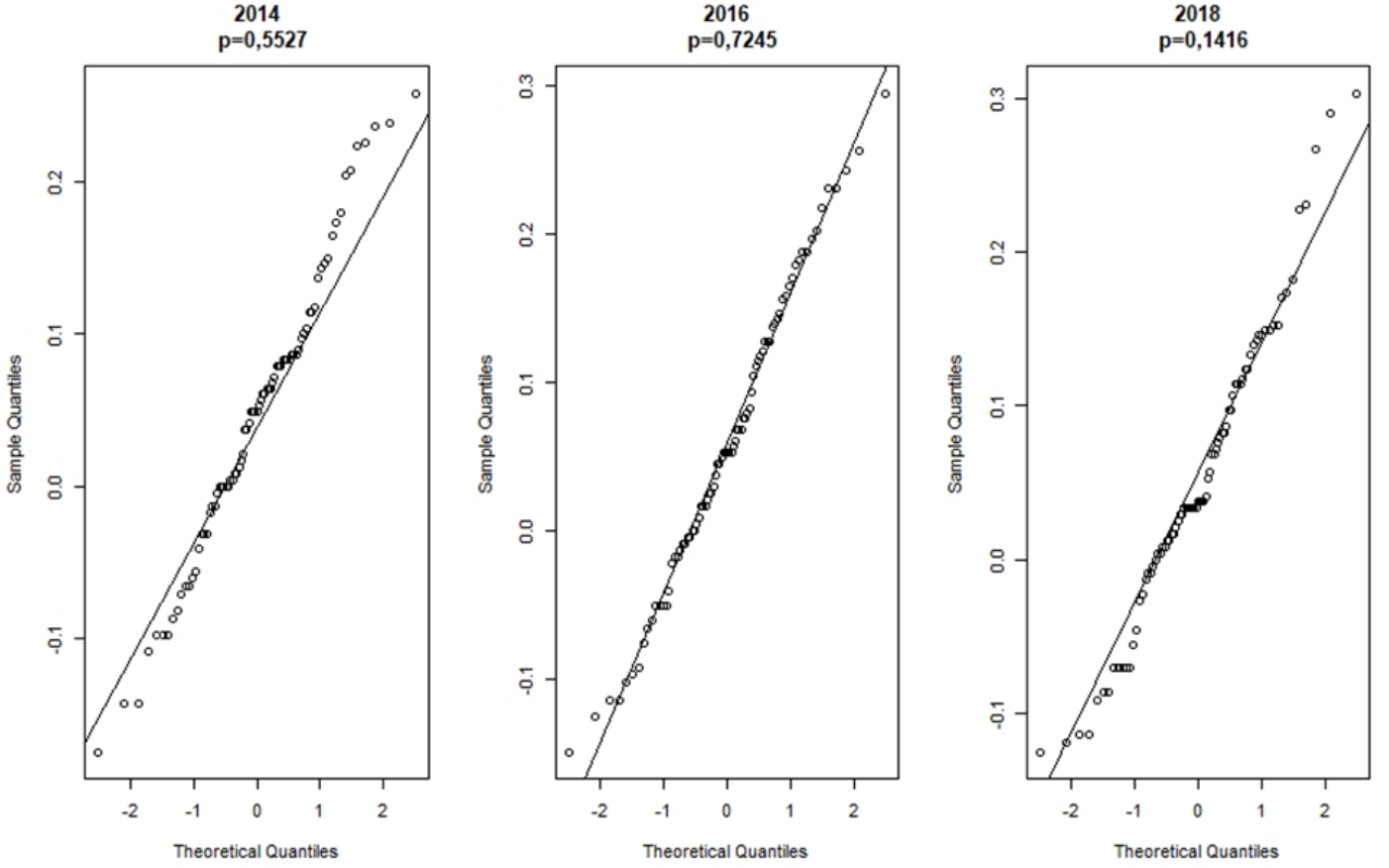


Şekil 1. Nüfus ve toplanan atık miktarlarının yıllara göre değişimi

Tablo 1. Katı Atık Miktarları [kg/gün-kişi]

Yıllar	Min.	1. Kartil	Medyan	Ortalama	3.Kartil	Mak.
2014	0.67	0.97	1.12	1.137	1.23	1.8
2016	0.7	0.98	1.13	1.176	1.34	1.97
2018	0.75	1	1.09	1.155	1.3	2.01

Bu çalışmada, günlük kişi başı üretilen ortalama katı atık miktarından 2014, 2016 ve 2018 yıllarına ait verilerin mekânsal oto korelasyon analizleri kullanılmıştır. 2014 yılında kişi başı ortalama en fazla katı atık üretimi Edirne'dedir (1.81 kg/kişi-gün). 2016 yılında en fazla katı atık üretimi ise Muğla ilinde görülmektedir (1.97 kg/kişi-gün). 2018 yılında ortalama en fazla kişi başı en fazla katı atık miktarı 2,01 kg ile Bartın'dır. Ortalama kişi başı katı atık miktarlarının en düşük olduğu iller 2014, 2016 ve 2018 yılları için sırasıyla Trabzon (0.67 kg/kişi-gün); Kahramanmaraş (0.75 kg/kişi-gün); Kahramanmaraş ve Hakkâri (0.77 kg/kişi-gün) olduğu görülmektedir. Mekânsal Otokorelasyon analizleri için sayısal verilerin normal dağılım göstermesi özellikle yerel Moran'nın I indeksi hesaplamalarında çarpıklığa hassasiyet gösteren ortalama ve varyans değerleri için gerekmektedir [8, 22].



Şekil 2. Kişi başı atık miktarlarının Q-Q grafikleri

Bu nedenle 2014,2016 ve 2018 yıllarına ait ortalama kişi başı atık miktarlarına logaritmik dönüşüm uygulanmıştır. Shapiro-Wilk testi ile normallik testi [23, 24] gerçekleştirilmiş ve söz konusu yıllar için p değerlerinin 0,05'ten büyük olduğu görülmüştür. Şekil.2'de de görüldüğü üzere verilerin dağılımlarının normal dağılımdan istatistiksel olarak önemli bir farklı olmadığı görülmektedir.

2.2 Moran'nın I indeksi ve Geary'nin C istatistiği

Mekânsal otokorelasyon analizleri değişkenlerin sistematik ve mekânsal olarak dağılıp dağılmadığını gösteren analizlerdir [5, 21]. Mekânsal otokorelasyon pozitif, negatif ve sıfır olarak sınıflandırılabilir [5]. Pozitif mekânsal otokorelasyon değeri veri setinde birbirine yakın olan değerlerin mekânsal olarak da yakın konumlandığı [25], negatif mekânsal otokorelasyon ise birbirlerine yakın değere sahip değişkenlerin mekânsal olarak birbirlerinden uzak konumlandığını [16], sıfır mekânsal otokorelasyon ise değişkenlerin değerlerinin konumlarından bağımsız olduğunu ifade etmektedir [25].

Mekânsal otokorelasyon analizini veri setini bir bütün olarak ele alan türlerinden bu çalışmada Moran'nın I indeksi ile Geary'nin C istatistiği kullanılmıştır [16]. Moran'nın I indeksi Denklem (1 2)'deki kullanılarak hesaplanabilir [26]. Moran'nın I indeksi Pearson korelasyon sabiti gibi davranır ve indeks sonuçları -1 ile +1 arasında değişebilir [16].

$$I = \frac{n}{S_0} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

$$S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \quad (2)$$

Denklemlerde n gözlem sayısını, w_{ij} mekânsal ağırlığı, S_0 mekânsal ağırlıklar toplamını, x_i i konumuna ait katı atık verisini, x_j j konumuna ait katı atık verisini \bar{x} katı atık verilerinin aritmetik ortalamasını temsil etmektedir [26].

Geary'nin C istatistiği Moran'nın I indeksinin alternatifidir ve Geary'nin C istatistiği karşılaştırılabilir variogram analizini esas alır [22]. Geary'nin C istatistiği Denklem (3-4) ile hesaplanır [26].

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [w_{ij} (x_i - x_j)^2]}{2S_0 S^2} \quad (3)$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n - 1)} \quad (4)$$

Denklemlerde n gözlem sayısını, w_{ij} mekânsal ağırlığı, S_0 mekânsal ağırlıklar toplamını, x_i i konumuna ait katı atık verisini, x_j j konumuna ait katı atık verisini \bar{x} katı atık

verilerinin aritmetik ortalamasını, S varyansı temsil etmektedir [26]. Geary'nin C istatistiği Moran'ın I indeksinden farklı olarak C oranının 0 ile 1 arasında olması birbirine yakın olan konumların değerlerinin de birbirlerine yakın olduğunu (pozitif otokorelasyon), C oranının 1'e yaklaşık eşit olduğu durumlarda ise rastgele dağılım (nötr otokorelasyon), C oranının 1 ile 2 değeri arasında olmasında da yakın konumdaki değerlerin farklılık göstermektedir (negatif otokorelasyon) [27].

2.3 Yerel Moran'ın I indeksi (Local Indicators of Spatial Association (LISA))

Moran'ın I indeksi ve Geary'nin C istatistiği gibi mekânsal otokorelasyon analizleri veri setinin bütününe ele alıp mekânsal otokorelasyonun yorumlanması için tek bir istatistik vermektedir. Yerel indeksler ise, örneklemin konumlarının ayrı ayrı analizlerine olanak sağlamaktadır. Böylelikle mekânsal dağılımın kümelenme ya da rastgele şekilde olup olmadığı belirlenebilmektedir [22, 26].

Mekânsal ilişkiyi gözlemler boyutunda irdeleyen ilk istatistiksel yöntemlerden biri Getis-Ord G_i^* istatistiğidir [18]. Yerel mekânsal otokorelasyon analiz tekniklerinden bir diğeri ise LISA'dır [17]. Getis-Ord G_i^* 'dan farklı olarak LISA mekânsal uçdeğerlerin tespit edilmesini kolaylaştırır ve bu uçdeğerler komşularının değerlerine göre oldukça farklılık gösteren değerlere denir [28]. LISA Denklem (5) ve Denklem (6)'e göre hesaplanmaktadır [29]. Getis Ord G_i^* istatistiğinden farklı olarak LISA değerleri küresel Moran I değeri ile ilişkilidir bu nedenle bu çalışmada [17]. LISA değerlerinin aritmetik ortalamaları çalışma alanının küresel Moran I indeksini verir [17].

$$I_i = \frac{x_i - \bar{X}}{S_i^2} \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{i,j} (x_j - \bar{X}) \quad (5)$$

$$S_i^2 = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^n w_{i,j}^2}{n-1} - \bar{X}^2 \quad (6)$$

3 Bulgular ve tartışma

Türkiye'nin katı atık oluşum miktarlarının 2014,2016 ve 2018 yıllarına göre mekânsal dağılım sonuçları Tablo 2.'de verilmiştir. Bu tabloya göre, 2014 yılında I indeksi pozitif ve sıfırdan büyük bir değerdedir. Bu nedenle, 2014 yılına ait katı atık oluşum miktarlarının birbirine yakın olan illerde benzer olduğu anlaşılmaktadır. Benzer veri değerlerine sahip illerin birbirlerine yakın konumda oldukları %99 düzeyinde istatistiksel olarak anlamlıdır. 2016 yılında I istatistiği pozitif bu nedenle birbirine komşu olan illerdeki katı atık oluşum oranları da birbirlerine yakın olduğu ve bu yakınlığın %95 oranında anlamlı olduğu anlaşılmaktadır. 2018 yılında katı atık oluşum oranları da pozitif otokorelasyon göstermektedir. Bu pozitif otokorelasyon %95 oranında istatistiksel olarak anlamlıdır.

Geary'nin C istatistiğine göre 2014,2016 ve 2018 yıllarında katı atık oluşum oranlarının mekânsal dağılımları pozitif otokorelasyon göstermektedir. 2014 yılına ait Geary'nin C değeri %99 oranında anlamlıdır. 2016 ve 2018 yıllarına ait bu istatistik ise %95 anlamlı olduğu görülmüştür.

Şekil 3. LISA yerel otokorelasyon analiz sonuçlarının istatistiksel olarak anlamlı olanları göstermektedir İstatistiksel anlamlılık derecesi p değeri sonuçları yine Şekil 3.'de gösterilmiştir.

2014 yılı katı atık oluşum oranlarına göre batıda Tekirdağ, Kırklareli ve Çanakkale'de yüksek katı atık oluşum miktarları ve konumlarının yakınlığından küme oluşturmuşlardır.

Tablo 2. Küresel Mekânsal Otokorelasyon Analiz Sonuçları

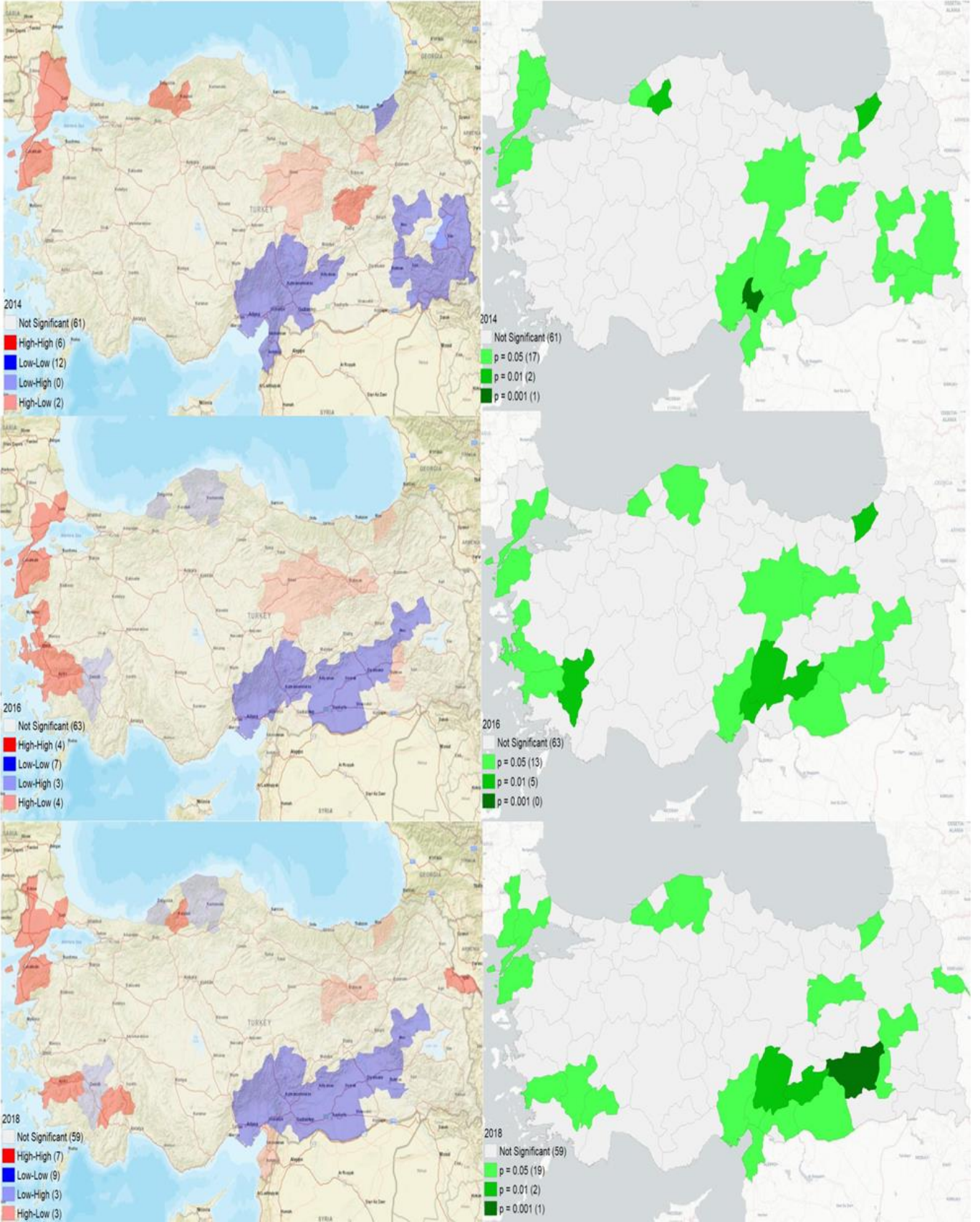
	2014	2016	2018	
Moran'ın I indeksi	I değeri	0.2980	0.1644	0.1991
	Z değeri	4.3042	2.4531	2.9338
	P değeri	0.00	0.007082	0.001674
Geary'nin C istatistiği	C değeri	0.6936	0.8042	0.7637
	Z değeri	3.9751	2.5393	3.0657
	P değeri	0.00	0.005554	0.001086

Güneydoğu Anadolu'da ise Van, Şırnak, Muş, Batman ve Siirt'in düşük değerlerle bir küme oluşturduğu görülmektedir. Kuzeyde Bayburt ve Rize'nin katı atık oluşum oranlarının düşük ve bu oranların birbirleri ile mekânsal ilişkilerinin olduğu görülmektedir. Güneyde ise Sivas, Adana, Kahramanmaraş, Osmaniye, Gaziantep, Adıyaman kümelenme açısından en büyük soğuk bölge kümelenmeyi oluşturmaktadır.

2016 yılında soğuk bölgelerin daha belirgin bir şekilde yoğun kümelendiği görülmektedir. Adana, Osmaniye, Sivas, Erzincan, Şanlıurfa, Diyarbakır, Batman ve Muş soğuk noktaları oluşturmaktadır. Ayrıca bu kümeden bağımsız olarak Rize katı atık oluşum oranının düşük olduğu ilimizdir. Sıcak noktalar Ege Bölgesinde İzmir, Aydın, Denizli illerinde kümelmiş, Marmara Bölgesinden Tekirdağ ve Çanakkale olmak üzere kümelmiştir.

2018 yılında ise Marmara bölgesindeki sıcak bölge kümeleşmesinin devam ettiği görülmektedir. Ege Bölgesinde Aydın, Denizli ve Burdur sıcak bölge kümesi oluşturmaktadır. 2016 yılında görülen soğuk bölgeden 2018 yılında Sivas'ın ayrıldığı ve Hatay'ın eklendiği görülmektedir. Şekil 3.'de görülen tek başına soğuk veya sıcak bölge özelliği gösteren iller ise istatistiksel anlamlılık güven düzeyi düşürüldüğünde potansiyel kümeleşmenin olacağı bölgeleri belirtmektedir.

Sivas'ın 2014 yılında ortalama katı atık oluşum miktarı komşu illerin katı atık değerlerine göre daha fazladır ve bu fark istatistiksel olarak anlamlıdır. 2014 yılında diğer bir dışsallık örneği gösteren il Bayburt olduğu görülmektedir. 2016 yılında Rize, Erzincan, Sivas ve Batman illeri komşularına göre daha fazla katı atık üreten iller olmuşlardır. Denizli, Zonguldak ve Kastamonu ise sınır komşularına göre günlük kişi başı ortalama katı atık miktarları daha azdır. Düşük değerlerin en belirgin kümeyi oluşturduğu 2018 yılında ise yüksek sapma verileri Hatay, Erzincan ve Rize illerinde, düşük sapma değerleri ise 2016 yılında olduğu gibi Denizli, Zonguldak ve Kastamonu illerinde görülmüştür.



Şekil 3. 2014, 2016 ve 2018 yılları LISA analiz sonuçları, solda sıcak bölge, soğuk bölge analizi; sağda, istatistiksel önem değerleri

4 Sonuçlar

Mekânsal otokorelasyon analizlerinin hem küresel hem de yerel boyutları kişi başı ortalama yıllık katı atık miktarları için anlamlı sonuçlar verdiği görülmüştür. Küresel otokorelasyon analizlerinin sonuçlarına göre Türkiye’de katı atık oluşum oran verileri pozitif otokorelasyon göstermektedir. Ayrıca bu mekânsal bağlantı istatistiksel güven düzeyleri arasındadır.

Yerel otokorelasyon analizleri sonucunda özellikle 2016 ve 2018 yıllarında Güneydoğu Anadolu Bölgesi ve Doğu Akdeniz bölgesinde günlük katı atık oluşum miktarlarının düşük olduğu illerin mekânsal olarak anlamlı bir şekilde bir arada bulunduğu görülmektedir. Nüfus verileri incelendiğinde bu kümelen illerin nüfuslarının çok değişken olduğu bilinmektedir.

Yerel otokorelasyon analizleri sonucu mekânsal ağırlıklı ortalamadan fazla olan katı atık değerlerinin Özellikle Ege ve Marmara Bölgesinin bazı illerinde görülmüştür. Ülke ortalamasından fazla değerlerin bir arada kümelenmeleri en belirgin olarak 2016 yılında görülmüştür:

Özellikle yerel boyuttaki mekânsal analiz yöntemleri problemi tespit etme veya değişimi belirleme için oldukça kullanışlı analiz yöntemleridir. Çevre alanında, katı atıkların oluşum miktarları bölgesel olarak değerlendirilmesi aşamasında, ya da bölgesel olarak atık oluşumunu azaltmaya yönelik uygulamaların sonuçlarının değerlendirilmesi için bu çalışmada kullanılan analiz yöntemleri durum değerlendirmesi ve çevre politikalarını yönetme açısından faydalı olacağı düşünülmektedir. Katı atık oluşum oranlarının mekânsal bir düzende değişiklik göstermesi ve istatistiksel olarak anlamlı olması diğer çevresel, demografik veya coğrafi parametreleri dahil edilmesi ile daha geniş kapsamlı neden sonuç ilişkileri ortaya koyması açısından önemli olacağı düşünülmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %6

Kaynaklar

- [1] C. O. Ugwu, C. G. Ozoegwu, and P. A. Ozor, Solid waste quantification and characterization in university of Nigeria, Nsukka campus, and recommendations for sustainable management. *Heliyon*, 6 (6), e04255, 2020. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04255>
- [2] E. Stunzenas and I. Kliopova, Optimizing municipal biodegradable waste management system to increase biogas output and nutrient recovery: a case study in Lithuania. *Energy Procedia*, 147, 641-648, 2018. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.083>
- [3] L. R. Luttenberger, Waste management challenges in transition to circular economy – Case of Croatia. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120495, 2020. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120495>
- [4] G. Gök, Estimation of methane generation and energy potential of Nigde landfill site using first order mathematical modelling approaches. *Journal of engineering sciences and design*, 7 (1), 126-135, 2019.
- [5] S. Keser, S. Duzgun, and A. Aksoy, Application of spatial and non-spatial data analysis in determination of the factors that impact municipal solid waste generation rates in Turkey. *Waste Management*, 32 (3), 359-71, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.10.017>
- [6] Y. Li, Y. Cui, B. Cai, J. Guo, T. Cheng, and F. Zheng, Spatial characteristics of CO2 emissions and PM2.5 concentrations in China based on gridded data. *Applied Energy*, 266, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114852>
- [7] F. Fan, H. Lian, X. Liu, and X. Wang, Can environmental regulation promote urban green innovation Efficiency? An empirical study based on Chinese cities. *Journal of Cleaner Production*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125060>
- [8] C. Zhang, L. Luo, W. Xu, and V. Ledwith, Use of local Moran's I and GIS to identify pollution hotspots of Pb in urban soils of Galway, Ireland. *Sci Total Environ*, 398 (1-3), 212-21, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.03.011>
- [9] M. Agovino, M. D'Uva, A. Garofalo, and K. Marchesano, Waste management performance in Italian provinces: Efficiency and spatial effects of local governments and citizen action. *Ecological Indicators*, 89, 680-695, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.02.045>
- [10] E. S. Thompson, P. Saveyn, M. Declercq, J. Meert, V. Guida, C.D. Eads, E.S.J. Robles, and M.M. Britton, Characterisation of heterogeneity and spatial autocorrelation in phase separating mixtures using Moran's I. *J Colloid Interface Sci*, 513, 180-187, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.10.115>
- [11] L. S. Premo, Local spatial autocorrelation statistics quantify multi-scale patterns in distributional data: an example from the Maya Lowlands. *Journal of Archaeological Science*, 31 (7), 855-866, 2004. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jas.2003.12.002>
- [12] E. M. Özgür and O. Aydın, Türkiye’de Evlilik Göçünün Mekânsal Veri Analizi Teknikleriyle Değerlendirilmesi (The Evaluation of Marriage Migration Using Spatial Data Analysis Techniques in Turkey). *Coğrafi Bilimler Dergisi/Turkish Journal of Geographical Sciences*, 9 (1), 29-40, 2011.
- [13] D. Yüncü, İ.O. Coşkun, Y. Mert Kantar, S. Günay Aktaş, and H. Sezerel, Turist Çekicilikleri Ve Turist Akişi Arasındaki İlişkilerin Mekansal Bağımlılığa Dayalı Olarak İncelenmesi. *e-Journal of New World Sciences Academy*, 12 (4), 232-247, 2017. <https://doi.org/10.12739/nwsa.2017.12.4.3c0168>
- [14] Ö. TÜRKŞEN, Mekansal istatistiklerin bir uygulaması: Simüle edilmiş fay düzlemine ilişkin jeodezik noktaların mekansal analizi. *Balıkesir Üniversitesi Fen*

- Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 1-13, 2019. <https://doi.org/10.25092/baunfbed.522967>
- [15] Ç. L. Uslu, Provincial Income Inequality and Spatial Autocorrelation Across Turkish Provinces: 1992-2013. *Sosyoekonomi*, 25 (34), 197-211, 2017. <https://doi.org/10.17233/sosyoekonomi.315759>
- [16] M. A. Kalkhan, *Spatial Statistics GeoSpatial Information Modeling and Thematic Mapping 2011*, Boca Raton, FL: CRC Press. 178.
- [17] L. Anselin, *Local Indicators of Spatial Association—LISA*. 27 (2), 93-115, 1995. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>
- [18] A. Getis and K. Ord, *The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics*. *Geographical Analysis*, 24, 189-206, 1992. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1992.tb00261.x>
- [19] TÜİK. Çevre İstatistikleri. [cited 2020 22.11.2020]; Available from: https://tuikweb.tuik.gov.tr/PreTablo.do?alt_id=1019.
- [20] TÜİK. Nüfus İstatistikleri. [cited 2020 22.11.2020]; Available from: <https://tuikweb.tuik.gov.tr/UstMenu.do?metod=temelist>.
- [21] K. Suryowati, R. D. Bektı, and A. Faradila, A Comparison of Weights Matrices on Computation of Dengue Spatial Autocorrelation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 335, 2018. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/335/1/012052>
- [22] R. E. Plant, *Spatial Data Analysis in Ecology and Agriculture Using R Vol. Second Edition*. 2019, Boca Raton, FL: CRC Press Taylor & Francis Group. 685.
- [23] A. Ghasemi and S. Zahediasl, Normality tests for statistical analysis: a guide for non-statisticians. *Int J Endocrinol Metab*, 10 (2), 486-9, 2012. <https://doi.org/10.5812/ijem.3505>
- [24] G. Tepanosyan, L. Sahakyan, C. Zhang, and A. Saghatelyan, The application of Local Moran's I to identify spatial clusters and hot spots of Pb, Mo and Ti in urban soils of Yerevan. *Applied Geochemistry*, 104, 116-123, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.03.022>
- [25] A. Neşe and M. Aytaç, Türkiye’de işsizliğin mekânsal analizi. *Öneri Dergisi*, 13 (49), 1-20, 2018.
- [26] K. M. Çubukçu, *Planlamada ve Coğrafyada Temel İstatistik ve Mekansal İstatistik*. Vol. 2. Basım. 2019: Nobel 323.
- [27] J. Lee, Wong, W. S., *Statistical Analysis with ArcView GIS 2001*, New York, NY: John Wiley & Sons.
- [28] S. Hafeez, M. Amin, and B.A. Munir, Spatial mapping of temporal risk to improve prevention measures: A case study of dengue epidemic in Lahore. *Spat Spatiotemporal Epidemiol*, 21, 77-85, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.sste.2017.04.001>
- [29] M. A. Dereli, Polat, Nizar, Boşanma Verilerinin Coğrafi Bilgi Sistemleri Destekli Mekânsal İstatistiksel Yöntemler ile İrdelenmesi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 3 (3), 112-118, 2018.





Hibrit olarak alüminyum ve demir elektrotlar kullanılarak elektrokoagülasyon prosesleri ile sulu çözeltilerden salisilik asit gideriminin araştırılması

Removal of salicylic acid from aqueous solutions by electrocoagulation processes using hybrid electrode

Fuat Özyonar¹ , Ömür Gökkuş^{2*} 

¹ Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 58140, Sivas, Türkiye

² Erciyes Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 38039, Kayseri, Türkiye

Özet

Bu çalışmada, elektrokoagülasyon prosesiyle sulu çözeltilerden önemli ve yaygın olarak kullanılan bir mikrokirletici sınıfa giren ve ilaç etken maddesi olan sulu çözeltilerden salisilik asitinin giderimi araştırılmıştır. Elektrokimyasal arıtma proseslerinde yaygın olarak kullanılan arıtma prosesleri elektrokoagülasyon ve elektroflotasyon teknikleridir. Elektrokimyasal proseslerde proses verimini belirleyen en temel değişkenlerden birisi, kullanılan elektrot materyalinin cinsidir. Bu çalışmada elektrokoagülasyon prosesiyle hibrit olarak demir ve alüminyum elektrot kombinasyonu kullanılmıştır. Elektrokoagülasyon prosesine etki eden parametrelerden akım yoğunluğu, başlangıç pH, elektroliz süresi ve elektriksel iletkenliğin etkisi salisilik asit giderim verimi üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla elektrokoagülasyon (EC) prosesinde akım yoğunluğu 20 A/m² ve 100 A/m² değerinde, başlangıç pH 5-8, Elektroliz süresi 2-50 dakika, elektriksel iletkenlik 250-1000 µs/cm aralığında ve elektrotlar monopolar paralel (MP-P) bağlantı türünde bağlanarak sulu çözeltilerden salisilik asit giderme verimleri incelenmiştir. En yüksek giderme verimi pH 6, Akım yoğunluğu 80 A/m², çözelti iletkenliği 750 µs/cm, ve Elektroliz süresi 40 dakika olarak elde edilmiştir. Bu işletme şartlarında %91.4 Salisilik asit giderimi, 0.8 kg/m³ çamur oluşumu ve 1.34 \$/m³ işletme maliyeti bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Hibrit elektrot, Elektrokoagülasyon, Salisilik asit, Mikrokirletici

1 Giriş

Her geçen gün şehirlerimizde içme, kullanma ve endüstriyel olarak suya olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Mevcut kullanılabilir su kaynaklarının hızlı bir şekilde tükenmesi ve doğal ve antropojenik olarak kirlenmeye uğraması bu kaynaklardan su temininde önemli bir sorun oluşturmaktadır.

İnsan, hayvan ve tarım sağlığının korunması için ilaç endüstrisi hızlı bir şekilde gelişmekte ve değişik türde ilaçlar tedavi amaçlı veya ürün miktar ve kalitesinin arttırmak amacıyla kullanılmaktadır. İnsan ve hayvan sağlığı korumak, hastalıkların teşhisi, tedavisi ve önlenmesi amacıyla kullanılmakta olan birçok ilaç, canlı metabolizmasında tamamıyla metabolize olmamakta ya

Abstract

In this study, salicylic acid, an important and widely used micropollutant in the pharmacy sector, removal by electrocoagulation process was investigated. Electrocoagulation and electroflotation processes are commonly used techniques in electrochemical treatment. The type of electrode material employing in electrochemical processes is one of the basic variables which determining the process performance. In the experiments, iron and aluminum plates were employed as a hybrid electrode combination in the electrocoagulation process. The effect of current density, initial pH, electrolysis time, and electrical conductivity were investigated. For this purpose, the current density was 20 A/m² and 100 A/m², initial pH 5-8, electrolysis time 2-50 min electrical conductivity 250-1000 µs/cm range and electrode connection type monopolar parallel (MP-P) salicylic acid removal efficiencies from aqueous solutions were investigated during the experimental studies. The best removal results were obtained at pH 6 with a current density of 80 A/m², solution conductivity of 750 µs/cm, and 40 min of electrolysis time. In these operation conditions, operation cost, amount of sludge, and removal efficiency of salicylic acid were determined as 1.34 \$/m³, 0.8 kg/m³, and 91.4%, respectively.

Keywords: Hybrid electrode, Electrocoagulation, Salicylic acid, Micropollutant.

olduğu gibi ya da bir başka ürüne dönüşerek vücuttan idrar, dışkı ve ter ile atılmaktadır. İlaç aktif maddeleri atıksulara insan dışkılarından ve hastane atıksularından ulaşabilmekte, ayrıca atıksu arıtma sisteminde arıtılmadan deşarj edilmektedir. Bu konu ile yapılan çalışmalar, su kaynaklarına ve besin zincirine değişik taşınımlar ile karışan ilaç aktif maddelerinin ve metabolitlerinin ekosistem ve insan sağlığı için gerçek bir tehdit oluşturduğunu göstermektedir [1].

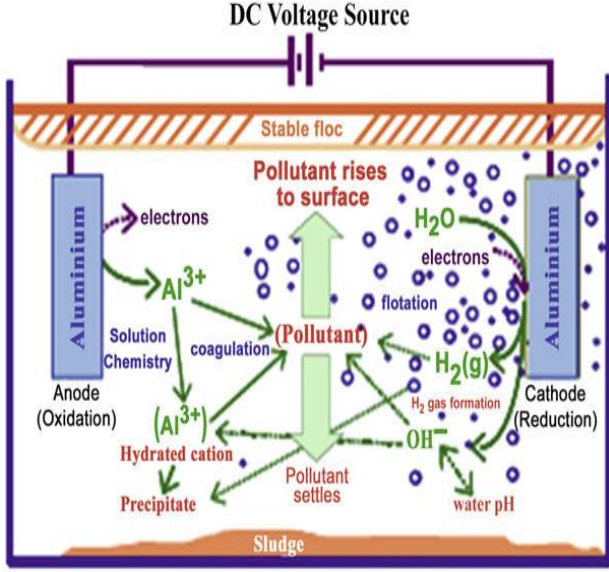
İlaç aktif maddeleri canlıların yapılarına girdikten sonra hedef noktaya ulaşması için enzimlere karşı ve midenin asidik pH'sına karşı dayanıklı olarak üretilmektedir. Bu nedenle ilaç etken/kalıntı maddeleri biyolojik olarak birikerek sucul ve karasal ortamda ekosisteme katılarak

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: omurgokkus@erciyes.edu.tr (Ö. Gökkuş)

Geliş / Received: 17.12.2020 Kabul / Accepted: 09.04.2021 Yayımlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.842616

en temel özellik kirleticilerin giderilmesini sağlayan elektrokimyasal prosesin şekli ve yapısıdır. Bu durumu belirleyen kullanılan elektrotların özellikleridir. Elektrokimyasal atıksu arıtımında en çok elektrooksidasyon, elektroflotasyon ve elektrokoagülasyon prosesleri kullanılmaktadır. Bu prosesler birlikte veya ayrı olarak bir sistem içerisinde olabilir. Atıksuda bulunan kirleticiler bu prosesler ile okside, adsorbe veya reaktör yüzeyinde birikerek ayırımı sağlanmaktadır. Temel olarak elektrokoagülasyon reaktör sisteminde elektroliz esnasında gerçekleşen mekanizmalar Şekil 4’de verilmektedir.



Şekil 4. Elektrokoagülasyon prosesinde gerçekleşen reaksiyonlar [15].

Elektrokoagülasyon prosesinde, anot olarak çözünen demir veya alüminyum elektrotlar kullanılması halinde bu elektrotlar çözünerek çözeltilere Al^{3+} ve Fe^{2+} , Fe^{3+} iyonları vermekte olup, bu iyonlar sudaki hidroksil iyonları ile birleşerek çok az çözünen $Al(OH)_3$, $Fe(OH)_2$ ve $Fe(OH)_3$ gibi metal hidroksitler oluşturmaktadır. Elektrokoagülasyon anında oluşan metal hidroksit partiküllerinin adsorpsiyon özellikleri çok yüksektir.

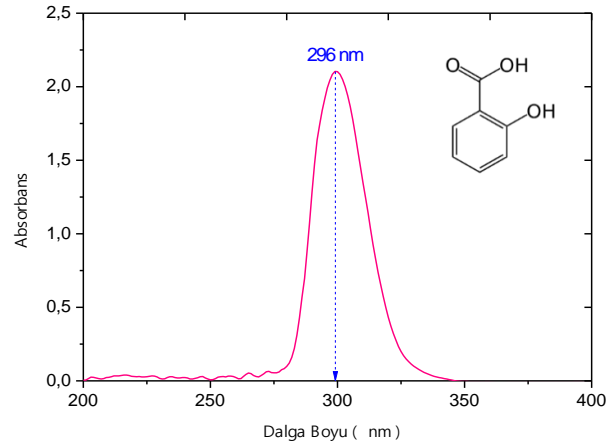
Koagüle edilen partiküller atıksularda bulunan mikro koloidal partikülleri ve iyonları kendilerine doğru çekerek adsorbe etmektedir. Oluşan yumaklar çökelmekte ve elektroflotasyonda oluşan gazlar yardımıyla su yüzeyine kaldırılabilir. Bu yöntem renk, $KOİ$, toplam organik karbon (TOK), askıda madde (AKM) ve ağır metallerin atıksulardan giderilmesinde kullanılmaktadır [16].

Bu çalışmada, salisilik asidin sulu çözeltilerden gidermek amacıyla Al-Fe-Fe-Al (Anot-Katot-Anot-Katot) elektrotlarının ve bağlantılarının kullanıldığı elektrokoagülasyon prosesine etki eden parametrelerden başlangıç pH, akım yoğunluğu, elektroliz süresi ve elektriksel etkisi araştırılmıştır. Elektrokoagülasyon prosesinde optimum şartları belirlemek için salisilik asit ve $KOİ$ parametreleri incelenmiştir.

2 Materyal ve metot

2.1 Malzeme

Çalışmada moleküler ağırlığı 138.121 g/mol olan SA (salisilik asit) saf suya ilave edilerek 100 mg/L konsantrasyonda SA içeren sulu çözeltiler hazırlanmıştır. SA içeren bu sulu çözeltiler optimum çalışma koşullarını belirlemek için farklı deneysel koşullar uygulanarak EC çalışmaları yapılmıştır. Deneysel çalışmalar esnasında SA gideriminin izleneceği dalga boyunu tespit etmek üzere UV bölgede (200-400 nm) arasında yapılan absorpsiyon taraması ile maksimum absorpsiyon veren dalga boyunun 296 nm olduğu belirlenmiştir. Ayrıca SA için kimyasal yapı çeşitli fizikokimyasal özellikler Şekil 5’de verilmektedir.

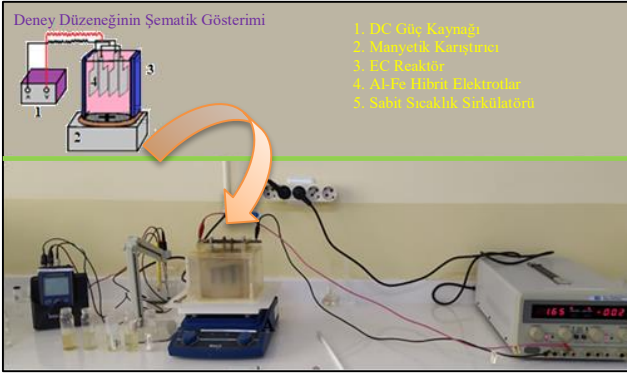


Şekil 5. Salisilik asit kimyasal özellikleri ve yapısı.

EC deneysel çalışmaları, Özyonar (2020) ve ark. tarafından daha önceki çalışmalarda detaylı olarak verilen elektrokimyasal çalışma düzeneğinde yürütülmüştür [17]. EC için her bir deneyde elektrotlar, elektrokoagülasyon reaktörüne yerleştirildikten sonra reaktör içerisinde 1000 ml’lik çözelti hacmi ile deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Güç kaynağı üzerinde istenen akım ve voltaj ayarlaması yapıldıktan sonra elektrokoagülasyon işlemine başlanmıştır.

2.2 Yöntem ve işletme maliyeti hesaplanması

Elektrokoagülasyon (EC) deneyleri Şekil 6’da sunulan deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Akım ve voltaj kontrollü, dijital bir güç kaynağı (GPC 6030D) ile sağlanmıştır. Karıştırma manyetik bir karıştırıcı ile gerçekleştirilmiştir. EC deneylerinde kullanılan 100 x 100 x 130 mm boyutlarındaki reaktör çift cidarlı olup, plexiglass’dan yapılmıştır. Reaktör ceketli olarak tasarlanıp reaksiyon sıcaklığının 25 °C’de sabit kalması için sürekli su sirkülasyonu sağlanmıştır. Reaktörde her bir deneyde 1000 ml su numunesi kullanılmıştır. Reaktörde farklı bağlantı modlarında 4 elektrot kullanılmıştır. Elektrotlar 20 mm aralıklarla yerleştirilmiş ve tamamen elektrolite batırılmış durumdadır. Elektrot materyali olarak 50 x 70 x 2 mm boyutlarında, 210 cm² aktif yüzey alanına sahip Al ve Fe plakalar kullanılmıştır. Kullanılan alüminyum plakalar, Al: % 99.53; Si: % 0.12; Fe: % 0.25 içeriğine, demir plakalar ise % 99.32 Fe içeriğine sahiptir.



Şekil 6. Deneysel çalışmada kullanılan elektrokoagülasyon deney düzeneğinin görünüşü.

EC işleminden sonra çözelti filtre edilmiş ve gerekli analizler yapılmıştır. EC işlemi sonunda oluşan çamur kuru ağırlık olarak tespit edilmiştir. EC sonunda tüm çözelti ve çamur karışımı oda sıcaklığında kaba filtre kâğıdından süzülerek ağırlığı hesaplanmıştır. Daha sonra etüvde 105 °C 'de kurutulup bekletildikten ve sabit tartıma getirildikten sonra çamur miktarları belirlenmiştir [2].

İşletme maliyeti enerji tüketimi ve elektrot tüketimi dikkate alınarak hesaplanmıştır. Elektrot maliyeti sadece elektrokoagülasyon prosesinde kullanılan Fe ve Al elektrotlar için dikkate alınmıştır (demir elektrot için 0.5 \$/kg, alüminyum elektrot için 1.7 \$/kg). İşletme maliyeti \$/m³ artırılmış atıksu olarak hesaplanmıştır [18].

$$C_{\text{enerji}} = \frac{V \times I \times t_{EC}}{\varrho} \quad (1)$$

$$C_{\text{elektrot}} = \frac{i \times t_{EC} \times M_w}{z \times F \times \varrho} \quad (2)$$

Burada C_{enerji} (m³ artırılan su başına kWh) ve C_{elektrot} (m³ artırılan su başına kg) enerji ve elektrot tüketimlerini ifade etmektedir. Ayrıca V uygulanan potansiyel değerini, t_{ec} elektroliz süresini (dakika veya saat), i uygulanan akım şiddetini (Amper), ρ sıvı hacmini (m³), M_w demir veya alüminyumun mol kütlelerini (g/m³ cinsinden), F Faraday sabitini (96485 C/mol), z ise metal atomu başına transfer edilen elektron sayısını (Fe: 2, Al: 3) ifade etmektedir [17].

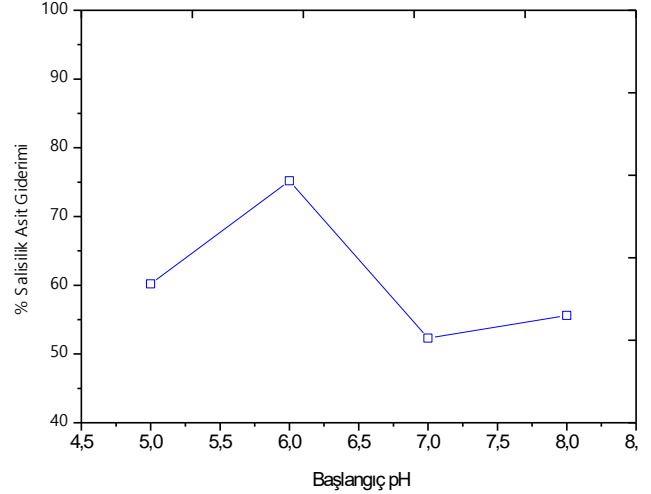
3 Bulgular ve tartışma

Al-Fe-Fe-Al (anot-katot-anot-katot) elektrotlarının kullanıldığı elektrokoagülasyon çalışmalarında, başlangıç pH 5-7 aralığında, akım yoğunluğu 20-100 A/m² aralığında, Saliyik asit konsantrasyonu 100 mg/L, elektriksel iletkenlik 250-1000 µs/cm ve elektroliz süresi 2-20 dakika aralığında, elektrot bağlantı türü monopolar paralel (MP-P) bağlantı türü uygulanarak sulu çözeltiden SA giderimi araştırılmıştır.

3.1 Saliyik asit giderimi üzerine pH'ın etkisi

Elektrokoagülasyon prosesinde önemli işletme parametrelerinden birisi de çözeltinin elektroliz öncesi pH değeridir. EC prosesinde pH çözelti içerisinde oluşan metal hidroksit formunun türlerini belirlemekle birlikte oluşacak kabarcık formunu ve boyutunu etkilemektedir. Dolayısıyla

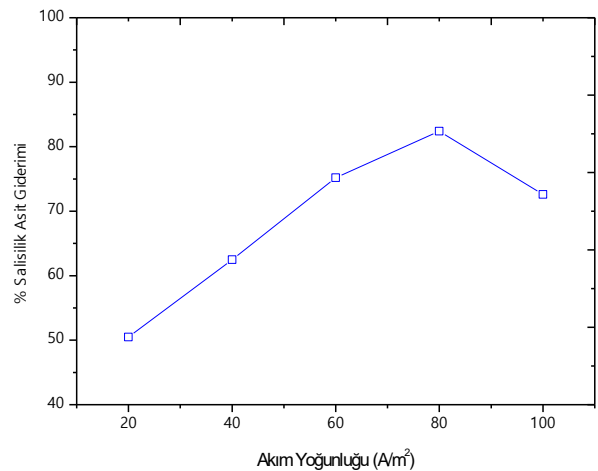
her atıksu veya kirlenmiş su için elektrokimyasal arıtmada en yüksek giderme veriminin elde edileceği pH değeri belirlenmelidir. Yapılan bu çalışmada pH 5-8 aralığında değiştirilerek incelenmiştir. Şekil 7'de görüldüğü gibi en yüksek giderme verimi pH 6'da elde edilmiştir.



Şekil 7. Farklı pH değerlerinde SA giderme verimi. (60 A/m² akım Yoğunluğunda, SA konsantrasyonu 100 mg/L, Elektriksel iletkenlik 750 µs/cm, Elektroliz süresi 20 dakika, Al-Fe-Fe-Al, MP-P bağlantı türünde).

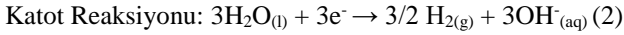
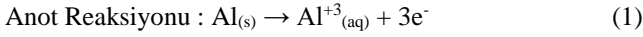
3.2 Saliyik asit giderimi üzerine akım yoğunluğunun etkisi

Elektrokoagülasyon prosesinde akım yoğunluğu kontrol edilebilen en önemli işletme parametrelerinden birisidir. Elektrokimyasal proseslerde akım yoğunluğu oluşan koagulant miktarını, kabarcık üretim hızını ve boyutunu belirlediği için prosesin verimini önemli derecede değiştirmektedir. Bu amaçla, akım yoğunluğunun SA giderimi üzerine etkisini incelemek için akım yoğunluğu 20-100 A/m² aralığında değiştirilerek uygulanmıştır. Şekil 8'de görüldüğü gibi en yüksek giderme verimi 80 A/m² akım yoğunluğunda elde edilmiştir.



Şekil 8. Farklı Akım yoğunluğu değerlerinde SA giderme verimi. (Başlangıç pH 6, SA konsantrasyonu 100 mg/L, Elektriksel iletkenlik 750 µs/cm, Elektroliz süresi 20 dakika, Al-Fe-Fe-Al, MP-P bağlantı türünde).

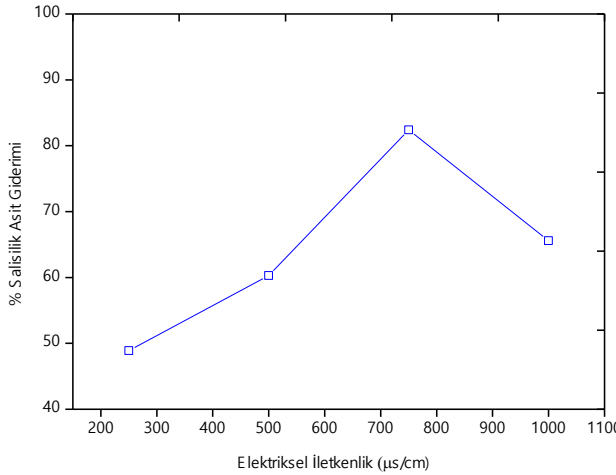
Şekil 8'den görüleceği üzere akım yoğunluğunun 20 A/m² değerinden 80 A/m² değerine artırılması ile birlikte salisilik asit giderim verimi %50.5'den %82.4'e artmıştır. Salisilik asit giderim veriminde meydana gelen bu artış, akım yoğunluğunun artırılması ile Faraday yasasına göre anotta çözünen metal iyonlarının artışı ile açıklanabilmektedir [19]. Ancak akım yoğunluğunun 80 A/m² değerinin üzerine çıkarılması salisilik gideriminde bir miktar azalışa neden olmuştur. Bu durumun olası sebebinin yüksek akım yoğunluğu değerlerinde **Reaksiyon 1** ve **Reaksiyon 2** gereğince katotta meydana gelen aşırı hidrojen gazı ve OH⁻ iyonlarına bağlı pH artışı olduğu düşünülmektedir [20, 21].



3.3 Salisilik asit giderimi üzerine iletkenliğin etkisi

Elektriksel iletkenlik elektrokoagülasyon prosesi üzerine etkisi hem maliyet hem de verim açısından etkisi olan diğer bir işletme parametresidir. Elektriksel iletkenlik çözeltinin iyonik gücü ile ilgilidir ve enerji tüketimi üzerinde değişikliğe sebebiyet verecek bir etkiye sahiptir.

Kullanılan elektrolit çözeltisi iletkenliği artırarak direnç düşüşüne sebep olur ve elektrik tüketimini azaltır. Bu çalışmada bu etkinin SA giderme verimini üzerine olan etkisini araştırmak amacıyla NaCl kullanılarak iletkenlik 250-1000 µs/cm aralığında değiştirilerek elektrokoagülasyon çalışmaları yürütülmüştür. Şekil 9 'da görüldüğü gibi en yüksek giderme verimi % 82.4 ile 750 µs/cm elektriksel iletkenlik değerinde elde edilmiştir.



Şekil 9. Farklı Elektriksel İletkenlik değerlerinde SA giderme verimi. (Başlangıç pH 6, Akım yoğunluğu 80 A/m², SA konsantrasyonu 100 mg/L, Elektroliz süresi 20 dakika, Al-Fe-Fe-Al, MP-P bağlantı türünde).

Çalışmada destek elektrolit olarak kullanılan NaCl, elektrokoagülasyon proselinin etkisinin yanı sıra, proses değerlendirilmesinin yapıldığı 50 dakika gibi kısa zaman periyotlarında bile aktif klor türlerinin oluşumunu sağlayarak (**Reaksiyon 3**) salisilik asidin maksimum oksidasyonuna neden olmuştur [22].

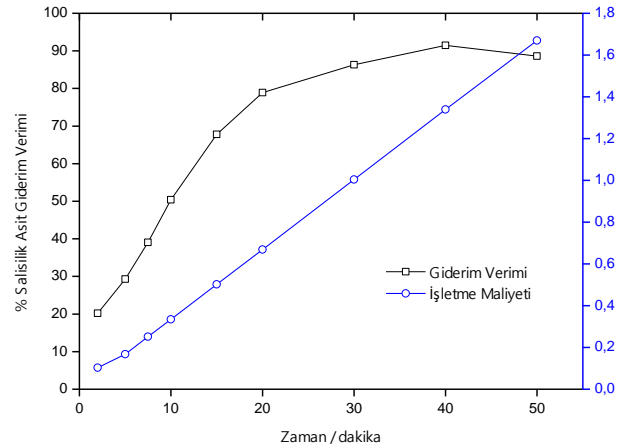


Aynı zamanda NaCl, oksidasyon performansı açısından değerlendirildiğinde, KOİ gideriminde de bir miktar etki gösterebilmektedir [23].

3.4 Salisilik Asit Giderimi Üzerine Elektroliz Süresinin Etkisi

Elektrokoagülasyon prosesinde elektroliz süresi oluşan metal hidroksit floklarının miktarı açısından önemlidir. Yeterli miktarda hidroksit floklarının oluşması için gerekli optimum sürenin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada 2-50 dakika aralığında elektroliz süresi değiştirilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Şekil 10'dan görüleceği üzere süre arttıkça **Eşitlik 1** ve **Eşitlik 2** den de hesaplandığı üzere hem işletme maliyeti artmakta hem de verim artışı görülmektedir.

Bu çalışmada, hibrit elektrotların kullanıldığı EC prosesi ile sulu çözeltilerden SA'nın giderimi araştırılmıştır. Bu amaçla EC prosesine etki eden parametrelerden başlangıç pH, akım yoğunluğu, Elektriksel iletkenlik ve elektroliz süresinin etkisi araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışma sonucunda en yüksek verimin alındığı SA için optimum şartlar başlangıç pH 6, akım yoğunluğu 80 A/m², elektriksel iletkenlik 750 µs/cm ve elektroliz süresi 40 dakika olarak bulunmuştur. Optimum işletme şartlarında SA verimleri % 91.4 olarak elde edilmiştir. Bu koşullardaki işletme maliyeti ise 1.34 \$/m³ olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak Al ve Fe elektrotlarının kullanıldığı çalışmada EC prosesi ile SA gideriminde yüksek SA giderme verimleri elde edilmiştir.

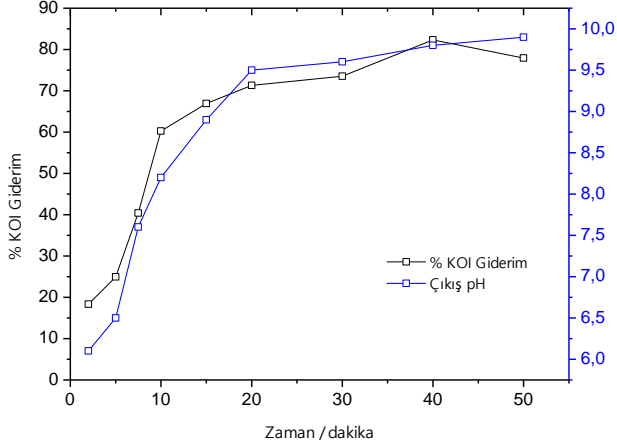


Şekil 10. Farklı Elektroliz sürelerinde SA giderme verimi ve işletme maliyeti. (Başlangıç pH 6, Akım Yoğunluğu 80 A/m², SA konsantrasyonu 100 mg/L, elektriksel iletkenlik 750 µs/cm, Al-Fe-Fe-Al, MP-P bağlantı türünde).

Şekil 10'da elektroliz süresine bağlı olarak SA gideriminin ve işletme maliyetlerinin değişimleri görülebilmektedir. Uygulanan elektriksel akıma bağlı olarak işletme maliyeti de lineer bir artış göstermektedir. 50 dakikalık elektroliz süresinde yaklaşık olarak 1.7 \$/m³'lük bir işletme maliyeti oluşmakla birlikte yaklaşık olarak %88'lik bir SA giderim verimine ulaşılmıştır. Ancak giderim

verimleri ve işletme maliyetleri birlikte göz önüne alındığında 40. dakikada daha makul sonuçlar elde edilebileceği anlaşılmaktadır.

Şekil 11’de ise elektroliz süresi ile KOİ giderimi ilişkisi verilmekle birlikte aynı zamanda elektroliz sonunda çözelti pH değerleri görülebilmektedir.



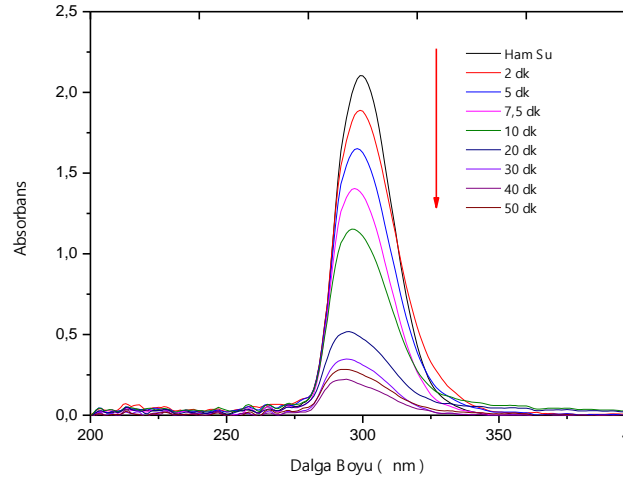
Şekil 11. Farklı Elektroliz sürelerinde KOİ giderim verimleri ve çözelti çıkış pH değerleri. (Başlangıç pH 6, Akım Yoğunluğu 80 A/m², SA konsantrasyonu 100 mg/L, elektriksel iletkenlik 750 µs/cm, Al-Fe-Fe-Al, MP-P bağlantı türünde).

Elektroliz süresinin artmasıyla birlikte KOİ gideriminin belirli bir süreye kadar artış gösterdiği ve 40 dakikalık elektroliz süresinden sonra ise KOİ giderim veriminin bir platoya ulaştığı görülebilir (Şekil 11). Diğer taraftan katot reaksiyonları gereğince (Eşitlik 2) ortamda OH⁻ iyonlarının varlığına bağlı olarak pH değerlerinin de artış gösterdiği görülmektedir. Başlangıç pH değeri 6 olan çözelti 50 dakikalık elektroliz süresi sonrasında pH 10 düzeylerine ulaşmıştır.

Elektrolitik reaktörde üretilen OH⁻ iyonları ile asidik ortamda hafif pH artması gerçekleşir veya çözelti bazik hale gelebilir. Bu iyonlar hem de alüminyum hidroksit formlarını oluşturur. Yapılan çalışmalarda EC prosesi için en uygun pH aralığının 5-8 aralığında olduğu yani hafif nötr yada nötr pH’larda oluşan Al(OH)₃ floklarının yüksek kirletici giderimde etkili olduğu belirtilmiştir [2].

Şekil 12’de optimum koşullarda uygulanan elektrokoagülasyon işleminde zamana bağlı olarak absorbans azalışı verilmektedir. Şekil 12’ye bakıldığında elektrokoagülasyon işleminin 50 dakikasından sonra neredeyse salisilik asidin tamamen yok olduğu anlaşılabilmektedir.

Çalışmada absorbans azalması mineralizasyon göstergesi olarak seçilmiş olup, arıtma sürecinin her bir kademesinde numune UV bölgede tarama yapılarak mineralizasyon değerlendirmesi yapılmıştır. Böylelikle SA’nın giderim verimi değerlendirilmiştir.



Şekil 12. Optimum koşullarda SA için elektroliz süresine bağlı absorbans azalması (Başlangıç pH 6, Akım Yoğunluğu 80 A/m², SA konsantrasyonu 100 mg/L, elektriksel iletkenlik 750 µs/cm, Al-Fe-Fe-Al, MP-P bağlantı türünde).

200-400 nm arasında gerçekleştirilen bu absorbans taramaları salisilik asidin elektrokimyasal olarak bozunması şeklinde açıklanabilmektedir. Ayrıca, 250 – 300 nm arasında görülen pikler, salisilik asit yapısında bulunan aromatik kısımların parçalanması ve salisilik asidin oluşan ara ürünlerine işaret etmektedir [24].

4 Sonuçlar

EC prosesinde SA gideriminde kullanılan elektrot tipinin son derece önemli olduğu görülmüştür. Çalışmada demir elektrotlarının alüminyum elektrotları kadar SA gideriminde etkili olmamıştır. Ayrıca hibrit bağlantı modlarında da yani demir ve alüminyum elektrotların birlikte kullanıldığında sadece alüminyum elektrotlarının kullanıldığı deneylerden daha düşük giderim sonuçları elde edilmiştir. Sonuç olarak alüminyum elektrotlarla SA gideriminde demir elektrotlardan daha yüksek giderim verimi elde edilmiştir. Bu durum EC prosesi esnasında oluşan Al(OH)₃ floklarına, SA bileşenlerinin adsorpsiyonun Fe(OH)₃ floklarına göre daha fazla gerçekleşmesi şeklinde açıklanabilir.

Çalışma sonuçlarına göre MP-P elektrot bağlantı türünde optimum deneysel koşullar, pH 6, 80 A/m² akım yoğunluğu, 750 µs/cm elektriksel iletkenlik, 20 dakikalık elektroliz süresi olarak bulunmuştur. Optimum işletme şartlarında SA verimleri % 91.4 olarak elde edilmiştir. Çalışma kapsamında yürütülen maliyet analizi sonuçlarına göre ise optimum şartlarda 1.34 \$/m³’lük bir arıtma maliyeti hesaplanmaktadır. Sonuç olarak Al ve Fe elektrotlarının kullanıldığı çalışmada EC prosesi ile SA gideriminde yüksek SA giderim verimleri elde edilmiştir.

Diğer taraftan KOİ açısından sonuçlar değerlendirildiğinde ise giderim verimleri yüksek olmakla birlikte belirli bir noktadan itibaren deneysel koşulların giderim verimini daha fazla arttırmadığı gözle çarpıcıdır. Önemli ölçüde çözünmüş KOİ’ye sahip olan SA çözeltisinin EC gibi fizikokimyasal bir yöntemle partikül KOİ’de oldukça iyi sonuçlar sağlamasına rağmen çözünmüş KOİ

giderimi noktasında sınırlı bir etkiye sahip olduğu söylenilebilir.

Optimum işletme şartlarında oluşan çamur miktarı 0.8 kg/m³ olarak bulunmuştur. EC prosesi çamur oluşumu bakımından konvansiyonel yöntemlere göre daha düşük çamur üretim miktarlarına sahip olmakla birlikte ortaya çıkan çamurun bertarafı konusunda dikkat edilmesi gerekir. Arıtma süreci sonrasında oluşan çamur mikrokirletici açısından daha yoğun bir içeriğe sahip olmasından dolayı çevresel anlamda risk oluşturmaktadır. Bu özellikteki çamurun yakma tesislerinde bertarafı uygun bir alternatif olarak görülmektedir.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar doğrultusunda farklı ilaç kalıntı maddelerinin veya metabolitlerinin EC prosesi ile gideriminin araştırılmasının yararlı olacağı önerilmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 14

Kaynaklar

- [1] G. Sönmez, M. Işık, Sulardaki ilaç kalıntılarının ileri oksidasyon yöntemleri ile giderimi. *Turkish Journal of Scientific Reviews*, 6, 68-73, 2013.
- [2] S. Aksoy, Elektrokoagülasyon prosesi ile sulu çözeltilerden salisilik asit giderimi. Çevre Mühendisliği ABD, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas, 2016.
- [3] A. H. Dökmeçi, Bazı farmasötik ilaç kalıntılarının sulardaki toksik etkileri, (2009).
- [4] İ. E. İ. Sendikası, Türkiye İlaç Pazarı, 2020.
- [5] W. H. Tsai, T. C. Huang, H. H. Chen, J.-J. Huang, M.-H. Hsue, H. Y. Chuang, and Y. W. Wu, Determination of tetracyclines in surface water and milk by the magnesium hydroxide coprecipitation method. *Journal of chromatography A*, 1217, 415-418, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2009.12.006>.
- [6] S. O'Connor, and D. S. Aga, Analysis of tetracycline antibiotics in soil: advances in extraction, clean-up, and quantification. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 26, 456-465, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2007.02.007>.
- [7] R.S. Valverde, M.D.G. García, M.M. Galera, and H.C. Goicoechea, Determination of tetracyclines in surface water by partial least squares using multivariate calibration transfer to correct the effect of solid phase preconcentration in photochemically induced fluorescence signals. *Analytica Chimica Acta*, 562, 85-93, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2006.01.035>.
- [8] Y. Luo, W. Guo, H.H. Ngo, L.D. Nghiem, F.I. Hai, J. Zhang, S. Liang, and X.C. Wang, A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment. *Science of the total environment*, 473, 619-641, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.12.065>.
- [9] M.H. Khan, H. Bae, and J.-Y. Jung, Tetracycline degradation by ozonation in the aqueous phase: proposed degradation intermediates and pathway. *Journal of hazardous materials*, 181, 659-665, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.05.063>.
- [10] I.R. Bautitz, and R.F.P. Nogueira, Degradation of tetracycline by photo-Fenton process—Solar irradiation and matrix effects. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 187, 33-39, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2006.09.009>.
- [11] Y. Liu, X. Gan, B. Zhou, B. Xiong, J. Li, C. Dong, J. Bai, and W. Cai, Photoelectrocatalytic degradation of tetracycline by highly effective TiO₂ nanopore arrays electrode. *Journal of Hazardous Materials*, 171, 678-683, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.06.054>.
- [12] Y.-J. Wang, D.-A. Jia, R.-J. Sun, H.-W. Zhu, and D.M. Zhou, Adsorption and cosorption of tetracycline and copper (II) on montmorillonite as affected by solution pH. *Environmental Science & Technology*, 42, 3254-3259, 2008. <https://doi.org/10.1021/es702641a>.
- [13] C. Reyes, J. Fernandez, J. Freer, M. Mondaca, C. Zaror, S. Malato, and H. Mansilla, Degradation and inactivation of tetracycline by TiO₂ photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 184, 141-146, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2006.04.007>.
- [14] D. Avisar, O. Primor, I. Gozlan, and H. Mamane, Sorption of sulfonamides and tetracyclines to montmorillonite clay. *Water, Air, & Soil Pollution*, 209, 439-450, (2010). <https://doi.org/10.1007/s11270-009-0212-8>.
- [15] S. Mondal, M.K. Purkait, and S. De, *Advances in dye removal technologie.*, Springer, 2018. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-6293-3>.
- [16] A. Romanov, M. Kobya, and A. Dimoglo, Atıksulardaki kolloidal partiküllerin elektroflotakoagülasyonla giderimi, in: İTÜ 7. Endüstriyel Kirlenme Kontrolü Sempozyumu, İstanbul, 2000, pp. 67-74.
- [17] F. Özyonar, Ö. Gökkuş, and M. Sabuni, Removal of disperse and reactive dyes from aqueous solutions using ultrasound-assisted electrocoagulation. *Chemosphere*, 127325, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127325>.
- [18] R. Sridhar, V. Sivakumar, V.P. Immanuel, and J.P. Maran, Treatment of pulp and paper industry bleaching effluent by electrocoagulant process. *Journal of Hazardous Materials*, 186, 1495-1502, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.12.028>.
- [19] M.Y.A. Mollah, R. Schennach, J.R. Parga, and D.L. Cocke, Electrocoagulation (EC)—science and applications. *J. Hazard. Mater.*, 84, 29-41, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00176-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00176-5).
- [20] Ö. Gökkuş, and Y.Ş. Yıldız, Application of electrocoagulation for treatment of medical waste sterilization plant wastewater and optimization of the experimental conditions. *Clean Technol. Environ. Policy*, 17, 1717-1725, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10098-014-0897-2>.

- [21] N. Flores, E. Brillas, F. Centellas, R.M. Rodríguez, P.L. Cabot, J.A. Garrido, and I. Sirés, Treatment of olive oil mill wastewater by single electrocoagulation with different electrodes and sequential electrocoagulation/electrochemical Fenton-based processes. *Journal of hazardous materials*, 347, 58-66, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.12.059>.
- [22] A. Thiam, M. Zhou, E. Brillas, and I. Sirés, A first pre-pilot system for the combined treatment of dye pollutants by electrocoagulation/EAOPs. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 89, 1136-1144, 2014. <https://doi.org/10.1002/jctb.4358>.
- [23] A. Thiam, M. Zhou, E. Brillas, and I. Sirés, Two-step mineralization of Tartrazine solutions: study of parameters and by-products during the coupling of electrocoagulation with electrochemical advanced oxidation processes, *Applied Catalysis B: Environmental*, 150, 116-125, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2013.12.011>.
- [24] F. Ozyonar, H. Muratcobanoglu, and O. Gokkus, Taguchi approach for color removal using electrocoagulation with different electrode connection types, *Feb-Fresenius Environmental Bulletin*, 7600, 2017





Acid Blue 264 azo boyasının Fenton ve ultras-es-Fenton oksidasyon yöntemleri ile renk ve KOİ gideriminin araştırılması

Investigation of color and COD removal of Acid Blue 264 azo dye by Fenton and ultrasound-Fenton oxidation methods

Dilan Toprak^{1,*} , Savaş Şener² 

¹ Harran Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 63510, Şanlıurfa, Türkiye

² Mersin Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 33110, Mersin, Türkiye

Özet

Bu çalışmada Acid blue 264 azo boyasının Fenton ve ultras-es-Fenton yöntemleri ile renk ve kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) giderimi araştırılmıştır. Bu amaçla, başlangıç pH'sı, H₂O₂ konsantrasyonu, Fe²⁺ konsantrasyonu ve reaksiyon süresi gibi parametrelerin etkisi karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Fenton prosesinde en yüksek renk ve KOİ giderimi pH = 3.5, [Fe²⁺] = 180 mg/L, [H₂O₂] = 125 mg/L ve reaksiyon süresi 75 dakika koşullarında sırasıyla %88.5 ve %76 olmuştur. Ultras-es-Fenton prosesinde 20 kHz ultras-es frekansta pH = 3.5, [Fe²⁺] = 180 mg/L, [H₂O₂] = 100 mg/L ve reaksiyon süresi 45 dakika olduğunda en iyi renk ve KOİ giderimi sırası ile %96.6 ve %88.5 olarak elde edilmiştir. Sonuçlar ultras-es-Fenton işleminde azalan kimyasal tüketimi ile renk ve KOİ gideriminin arttığını göstermiştir. Ayrıca Fenton prosesine kıyasla reaksiyon süresi de kısalmıştır. Elde edilen bulgulara göre ultras-es Fenton prosesi daha kısa reaksiyon süresi ve daha az kimyasal sarfiyatı ile Fenton yöntemine göre daha ekonomik şekilde Acid Blue 264 azo boyasının gideriminde alternatif bir yöntem olarak kullanılabilir.

Anahtar kelimeler: Ultras-es-Fenton oksidasyon, Fenton, azo boya, Acid Blue 264

Abstract

In this study, color and chemical oxygen demand (COD) removal of Acid blue 264 azo dye by Fenton and ultrasound-Fenton methods was investigated. For this purpose, the effects of parameters such as initial pH, H₂O₂ concentration, Fe²⁺ concentration and reaction time were studied comparatively. The highest color and COD removal for Fenton process found at the optimum condition of pH = 3.5, [Fe²⁺] = 180 mg / L, [H₂O₂] = 125 mg/L and reaction time 75 minutes were 88.5% and 76%, respectively. In the Ultras-es-Fenton process, at 20 kHz ultrasound frequency, when pH = 3.5, [Fe²⁺] = 180 mg/L, [H₂O₂] = 100 mg/L and reaction time was 45 minutes, the highest color and COD removal was achieved as 96.6% and 88.5%, respectively. The results showed that the color and COD removal increased with reduced chemical consumption in the ultrasound-Fenton process. In addition, the reaction time is shortened compared to the Fenton process. According to the data obtained, the ultrasound Fenton process can be used as an alternative method for the removal of Acid Blue 264 azo dye more economically than Fenton method with its shorter reaction time and less chemical consumption.

Keywords: Ultrasound-Fenton oxidation, Fenton, Azo dye, Acid Blue 264

1 Giriş

Endüstrilerin boyama faaliyetlerinde kullanılan organik boyar maddeler yaklaşık 12 sınıftan oluşmaktadır. Ticari boyaların 100 000'den fazla çeşidinin olduğu ve üretiminin tahminen yıllık 80 000 tonu aştığı belirtilmektedir[1, 2]. Boyalar; tekstil, seramik, plastik, mürekkep, kozmetik, sabun, boya, kağıt ve gıda gibi çeşitli endüstrilerde kullanılmaktadır[1]. Tekstil ve baskı endüstrilerinde genellikle N=N- bağını içeren azo boyaların kullanımı yaygındır[3]. Boyama işlemi sonrasında kullanılan boyanın %10-15'lik kısmı kalıntı olarak atıksuya geçmektedir[4]. Bu boyalar kullanıldıktan sonra atıksu bünyesinde düşük konsantrasyonlarda bulunsun da atılmadan doğaya deşarj edildiklerinde çevre sorunlarına sebep olmaktadır[5, 6]. Su kütlesindeki renk sadece estetik açıdan değil aynı zamanda ışığın nüfuz etmesine engel olarak fotosentezi de

azaltmaktadır. Birçok boyanın veya metabolitlerinin suda yaşayan canlılar ve insanlar üzerinde kanserojen, mutajenik ve toksik etkileri bulunmaktadır[3, 7].

Boya ve bileşikleri içerdikleri metal ve klorür gibi maddelerden dolayı sucul ekosistemdeki canlılar için toksik etkiye sahiptir[8]. Bu sebeple suda istenmeyen kirleticilerden olup deşarj edilmeden önce giderilmesi gerekir. Genel olarak boyalı atıksuların arıtılmasında biyolojik, kimyasal ve fiziksel yöntemler kullanılmaktadır. Azo boyalar zor ayrışan organik moleküler yapıda olduğundan aerobik arıtma yöntemlerine karşı dirençlidir. Bu durum yeterli düzeyde giderimini engellemektedir[9]. Anaerobik koşullarda ise azo boyaların bozunması sonucunda toksik aromatik aminler oluşmaktadır ve bunlar

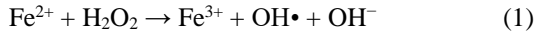
* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: dilantoprak1@gmail.com (D. Toprak)

Geliş / Received: 10.06.2020 Kabul / Accepted: 08.06.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.749438

başlangıçtaki durumlarından daha zararlı olabilmektedir [10]. Biyolojik arıtma, fiziksel ve kimyasal işlemlerle karşılaştırıldığında ekonomik olsa da toksik ve düşük biyobozunur boyaların gideriminde etkisi genellikle kısıtlı düzeydedir [11]. Bu sebeple azo boyaları içeren atıksuların arıtılması için adsorpsiyon [12], koagülasyon [13], elektrokoagülasyon, ozonlama [14] ve Fenton oksidasyonu gibi birçok farklı fizikokimyasal arıtma yöntemleri kullanılmaktadır. Adsorpsiyon verimi kullanılan adsorbent ve kirletici türüne bağlıdır. Kirleticilerin sıvı fazdan katı faza geçişine dayanan geçici bir arıtma yöntemidir. Ayrıca adsorbent malzemelerinin rejenerasyonu pahalıdır ve oluşan katı atıkların nihai arıtımı gerekmektedir. Koagülasyon, dispers boyaların gideriminde kullanılabilir, ancak çözünmüş boyalar için etkili bir yöntem olmayabilir. Ayrıca yine arıtılması gereken yüksek miktarlarda kimyasal arıtma çamuru oluşmaktadır. Renk giderimi için ozonlama yöntemi etkili bir yöntem olmakla birlikte yüksek maliyeti kullanımını sınırlamaktadır [15]. Fenton yöntemi ile boya gideriminde hidroksil radikalleri (OH•) gibi oldukça reaktif ve güçlü oksidan türlerinin oluşumuna dayanan, organik moleküllerin neredeyse tamamını mineralize eden, gelişmiş oksidasyon süreçlerini içeren daha etkili işlemlerin kullanılması gerekmektedir. Hidroksil radikallerinin renk gideriminde etkili olduğu bilinmektedir [16].

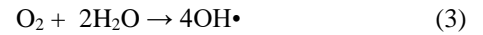
Fenton oksidasyonu en yaygın kullanılan ileri oksidasyon yöntemlerinden biridir. Fenton prosesi asit ilavesi ile pH'ın asidik seviyeye ayarlandığı, oksidasyon reaksiyonu, nötralizasyon ve koagülasyon olmak üzere dört aşamada gerçekleşmektedir [17]. Oksidasyon mekanizması, H₂O₂ 'in asidik koşullar altında katalizör demir iyonları (Fe²⁺) ile reaksiyonu sonucunda hidroksil radikallerinin (OH•) üretimine dayanır. Gerçekleşen reaksiyon Denklem 1'de sunulmuştur [18]. Hidroksil radikali en güçlü ikinci oksidanttır. Çoğu organik molekülün parçalanmasında etkili olup çok seçici değildir [19]. Tam mineralizasyon durumunda daha düşük moleküler ağırlıklı yeni ara maddeler veya karbondioksit ve su oluşmaktadır [20].



Fenton prosesinde Fe²⁺ katalizörü ile H₂O₂ reaksiyonu yavaş gerçekleşirken, Fe²⁺ katalizörü daha hızlı oluşan Fe³⁺'e dönüşebilir. Bu durum oksidasyon reaksiyonunda Fe²⁺ katalizörünün miktarını azalttığından Fenton reaksiyonunun hızını da azaltmaktadır. Bazı çalışmalarda Fe³⁺ 'ün Fe²⁺ ye dönüşümünün ultrases işlemi ile hızlandırılabilceği ve oksidasyon reaksiyonunu artırılabilceği belirtilmiştir[21, 22].

Ultrases işlemi güvenli, temiz, ikincil kirletici oluşturmaması ve yüksek geçirgenlik gibi avantajları nedeniyle dikkat çeken bir yöntemdir [23]. Ultrases işlemi suyun kaviteasyon olayına dayanmaktadır [24]. Ultrases kaviteasyonu ile suyun fiziksel ve kimyasal yapısı değiştirilerek hava kabarcıkları oluşur, büyür ve iç/dış basınç

etkisiyle patlar sonuç olarak H•, OH•, O• ve H₂O₂ gibi oksitleyici radikaller üretilir [25, 26]. Ultrases işleminde gerçekleşen reaksiyonlar Denklem 2 ve Denklem 3'te sunulmuştur. Üretilen radikaller zor ayrışan organik kirleticilerin bozunmasında kullanılmaktadır [27]. Fakat ultrases işlemi sınırlı bozunma oranına sahip olduğundan organik kirleticilerin arıtımında tek başına yeterli değildir [28]. Ayrıca ultrases işleminde pahalı ekipmanların kullanılması ve bunların yüksek enerjiye gereksinim duyması gerçek ölçekli su arıtma tesislerinde kullanımını kısıtlamaktadır. Bu nedenle ultraviyole gibi farklı enerji kaynaklarının kullanıldığı, katalizör ve kimyasal (Ör; Fenton reaktifleri, H₂O₂) ilavelerinin yapıldığı birleşik sistemler üzerine araştırmalar yapılmaktadır [29–31]. Son yıllardaki çalışmalarda kirletici gideriminde performansın artırılması amacıyla ultrases işlemi ile Fenton oksidasyon yönteminin birleştirildiği modifiye sistemlere ilgi artmıştır[23, 25, 32–34].



Literatürde renk ve KOİ gideriminde Fenton ve ultrases-Fenton proseslerinin kullanıldığı bazı çalışmalar mevcuttur. Fenton prosesi ile Direct Blue 71 boyasının giderildiği çalışmada başlangıç pH değeri, Fe²⁺ ve H₂O₂ konsantrasyonları, boya konsantrasyonu ve sıcaklık parametrelerinin renk ve KOİ giderimi üzerine etkisi kesikli reaktörlerde araştırılmış ve yöntemin performansını etkilediği belirtilmiştir. Deney sonuçlarına göre boya çözümlerinin 100 mg/L, pH 3, Fe²⁺ 'nin 3 mg/L ve H₂O₂ 'nin 125 mg/L ve reaksiyon süresinin 20 dk olduğu optimum koşullarda %94 renk ve %50.7 KOİ giderimi elde edilmiştir [18]. Ultrases-Fenton oksidasyonu ile Acid Red 88 sulu çözümlerinin gideriminin incelendiği bir çalışmada pH 3'te ve 40 kHz frekansta 135 dk'lık ultrases işlemi sonunda rengin %98.6'sı giderilmiştir [35]. Literatürde her iki yöntemin kullanılarak yapıldığı çalışmalar ile sinerjik etki oluştuğu ve azalan kimyasal sarfiyatı ve daha kısa reaksiyon süresi ile renk giderimleri elde edilmiştir. Özdemir vd. [15] Reactive Yellow 145 boyasıyla hazırladıkları sentetik atıksuyun renk ve KOİ gideriminde Fenton ve ultrases-Fenton yöntemlerinin performanslarını kıyaslamışlardır. Fenton oksidasyonu için optimum pH 3, Fe²⁺ ve H₂O₂ konsantrasyonları 20 mg/L koşullarında renk giderimi %91 ve KOİ giderimi %47 olmuştur. Ultrases-Fenton deneyleri ise su banyosunda 35 kHz frekans ve 80 W güçte gerçekleştirilmiş ve pH'ın 3, Fe²⁺ ve H₂O₂ konsantrasyonlarının sırasıyla 20 mg/L ve 15 mg/L olduğu optimum koşullarda %95 renk ve %51 KOİ giderimi sağlanmıştır [15]. Benzer bir çalışmayı Reactive Orange 127 boyası içinde gerçekleştirmişlerdir. Fenton oksidasyonu için Fe²⁺ ve H₂O₂ konsantrasyonları sırasıyla 20 mg/L ve 15 mg/L olduğunda renk giderimi %89.9 olarak belirtilmiştir. Ultrases-Fenton deneylerinde demir tüketiminde bir miktar artış olsada (25 mg/L) H₂O₂ konsantrasyonu azalmış ve 5 mg/L olmuştur. Renk giderimi ise %92 olarak hesaplanmıştır [36]. Acid Blue 15 boyasından hazırlanan 100 mg/L boya

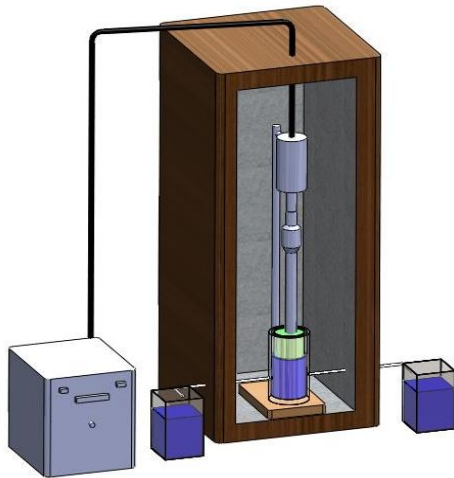
çözeltilisinin renk gideriminin araştırıldığı çalışmada ultrases-Fenton deney koşulları optimize edilmiştir. pH'ın 3, demir katalizörünün 1 g/L ve H₂O₂ konsantrasyonunun 10 mM olduğu koşullarda toplam organik karbon ve renk giderimi sırasıyla %40.4 ve %99.3 olmuştur. Fenton prosesinde boyanın renksizleşmesi ilk 30 dk içerisinde gerçekleşmiş ve 100 dk'lık reaksiyon süresinin sonunda ise boyanın bozduğu rapor edilmiştir. Ultrases-Fenton ile renk giderimi ilk 5 dk içerisinde hızla gerçekleşmiş ve boyanın bozunması 20 dk da gerçekleşmiştir. Sonuçlar doğrultusunda ultrases-Fenton ile sinerjik bir etki oluştuğu ve renk giderim performansını artırdığı belirtilmiştir [32].

Atıksudaki boyaaların arıtılması için Fenton ve modifiye Fenton yöntemlerinin kullanıldığı, renk ve KOİ giderim süreçleri üzerine çeşitli çalışmalar başarıyla gerçekleştirilmiştir. Tüm bu çalışmalara rağmen elyaf boyama ve baskı işleminde çokça kullanılan Acid Blue 264 [37] azo boyasının Fenton ve ultrases-Fenton yöntemi ile giderildiği herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu çalışmada, Acid Blue 264 boyasının Fenton ve ultrases-Fenton yöntemleri ile oksidatif bozunmasını etkileyen pH, demir konsantrasyonu, H₂O₂ konsantrasyonu ve reaksiyon süresi gibi deney parametrelerinin her bir yöntem için optimum değerlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Elde edilen renk ve KOİ giderim verimleri karşılaştırılarak performansları değerlendirilmiştir.

2 Materyal ve metot

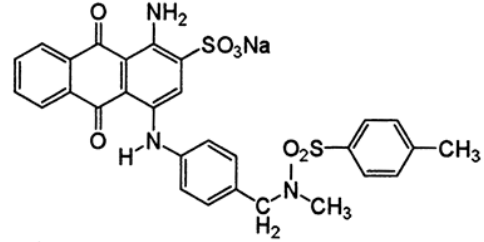
3.1. Materyal

Fenton oksidasyon çalışmaları için farklı devirlerde karıştırma ve zaman ayarlı olan WiseStir Jar Tester marka jar test cihazı kullanılmıştır. Ultrases-Fenton oksidasyon deneyleri ise ses yalıtımlı 30x20x60 cm boyutundaki bir kutuda yapılmıştır. Güç kaynağı kutunun dışında ve ultrases probu ise kutu içerisinde olup deney düzeneği Şekil 1'de gösterilmiştir. Ultrases-Fenton deneylerinde su cepli 600 mL'lik cam reaktör kullanılmıştır. Soğutma işlemi ise su cepli cam reaktöre bağlanan su hortumu ile gerçekleştirilmiştir. Ultrasonik işlem için 20 kHz sabit frekandaki Sonics VC 750 cihazı kullanılmıştır.



Şekil 1. Ultrases-Fenton prosesi için deney düzeneği

Deneylede kullanılan boya çözeltisi Acid blue 264 azo boyası (CAS NO 39351-90-7) ile hazırlanmıştır. Stok boya çözeltisi deiyonize su ile 1000 mg/L olarak hazırlanmıştır. Deney çalışmalarında stok çözeltisinden 100 mg/L'ye seyreltilen boya çözeltisi kullanılmıştır (Şekil 2). pH ayarlamaları için MERCK marka, analitik saflıkta 0,5 M NaOH ve 0,5 M H₂SO₄ çözeltileri kullanılmıştır. Fenton ve ultrases-Fenton oksidasyon deneylerinde kullanılan kimyasal maddeler MERCK marka, %35'lik H₂O₂ (yoğunluğu: 1,11 g/cm³) ve FeSO₄.7H₂O'dur.



Şekil 2. Acid Blue 264 boyasının moleküler yapısı [37]

2.2. Metot

Tüm deneylerde kullanılan Acid Blue 264 boya çözeltisinin başlangıç KOİ'si ve renk konsantrasyonu sırasıyla 146 mg/L ve 100 ppm olarak belirtilmiştir. Fenton ve ultrases-Fenton yöntemlerinin performansını etkileyen başlangıç pH'sı, H₂O₂ konsantrasyonu, Fe²⁺ konsantrasyonu ve reaksiyon süresi gibi parametrelerin denendiği koşullar Tablo 1'de belirtilmiştir. Tüm kesikli deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Fenton ve ultrases-Fenton oksidasyon yöntemlerine ait deneysel koşullar

Fenton Oksidasyon			
pH	FeSO ₄ .7H ₂ O (mg/L)	H ₂ O ₂ (mg/L)	Reaksiyon Süresi (dk)
2.0-4.5*	100	100	75
3.5	100-550**	100	75
3.5	180	50-300***	75
3.5	180	125	15-120****

*Test edilen pH değerleri 2/2.5/2.7/3.0/3.5/3.7/4.0/4.5
** Test edilen FeSO₄.7H₂O konsantrasyonları (mg/L)
100/120/130/140/150/160/180/190/200/300/400/500/550
***Test edilen H₂O₂ konsantrasyonları (mg/L)
50/75/100/125/150/175/200/225/250/300
****Reaksiyon süresi (dk) 15/30/45/60/75/90/120

Ultrases-Fenton Oksidasyon			
pH	FeSO ₄ .7H ₂ O (mg/L)	H ₂ O ₂ (mg/L)	Reaksiyon Süresi (dk)
2.0-4.5*	100	100	60
3.5	100-550**	100	60
3.5	180	50-300***	60
3.5	180	100	15-120****

*Test edilen pH değerleri 2/2.5/2.7/3.0/3.5/3.7/4.0/4.5
** Test edilen FeSO₄.7H₂O konsantrasyonları (mg/L)
100/120/130/140/150/160/180/190/200/300/400/500/550
***Test edilen H₂O₂ konsantrasyonları (mg/L)
50/75/100/125/150/175/200/225/250/300
****Reaksiyon süresi (dk) 15/30/45/60/75/90/120

Fenton oksidasyon yöntemi ile renk ve KOİ giderim çalışmalarında deneysel parametrelerin (pH, H₂O₂, Fe²⁺ ve reaksiyon süresi) optimizasyonu yapılmıştır. Bu amaçla Acid Blue 264 azo boyası ile hazırlanan boya çözeltilisinden 100 mL alınan numuneler cam beherlere ilave edilmiştir. İlk olarak numunelerin pH değerleri Tablo 1'de belirtilen değerlere getirilmiştir. Ardından FeSO₄.7H₂O ve H₂O₂ katalizörleri eklenmiştir. Numuneler jar test düzeneğinde sırasıyla 2 dk hızlı (90 rpm), 75 dk yavaş (20 rpm) karıştırılmıştır. Reaksiyon süresi sonunda reaktörlerin pH değerleri 8-10 aralığına getirilip numuneler 1 saat çökelmeye bırakılmıştır. Bu süre sonunda cam beherlerde oluşan duru fazdan 20 mL alınarak renk ve KOİ analizleri yapılmıştır.

Ultrases-Fenton oksidasyon çalışmalarında renk ve KOİ giderim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla yöntemin performansını etkileyen pH, H₂O₂, Fe²⁺ ve reaksiyon süresi gibi parametrelerin optimizasyon çalışmaları Tablo 1'de belirtilen değerler test edilerek yapılmıştır. Ultrases-Fenton deneylerinde 20 kHz sabit frekansta çalışan ultrasonik işletim cihazı kullanılmıştır. Bu cihazda bulunan ultrases probu direk olarak su cepli cam reaktörün içerisindeki boya çözeltilisine daldırılarak gerçekleştirilmiştir. pH ayarlaması yapılan reaktörlere, FeSO₄.7H₂O ve H₂O₂ kimyasalları ilave edilip 60 dk ultrasonik işleme tabi tutulmuştur. Reaksiyon süresi sonunda reaktörlerin pH değerleri 8-10 aralığına getirilip numuneler 1 saat çökelmeye bırakılmıştır. Reaktörün duru fazından 20 mL alınarak analitik yöntemlerde belirtilen standart metotlara göre renk ve KOİ analizleri yapılmıştır.

2.3. Analitik yöntemler

Fenton ve Ultrases-Fenton deneyleri tamamlandıktan sonra 20 mL'lik numuneler alınmıştır. Alınan numunelere renk ve KOİ analizi yapılmıştır. Renk analizleri için işlem sonrasında numuneler 0.45 µ şırınga filtreden süzülüp UV-Visible spektrofotometrede (Shimadzu 160A, Japonya) 643 nm dalga boyunda ölçülmüştür. KOİ analizlerinde Velp Scientifica Eco 16 termoreaktörü kullanılmıştır. KOİ analizi Standart Metotlar Metot No: 5220'ye göre hesaplanmıştır. pH ölçümleri için Hanna HI 221 model pH metre kullanılmıştır.

3 Bulgular ve tartışma

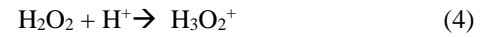
3.2. pH'in renk ve KOİ giderim verimine etkisi

Fenton prosesinde renk ve KOİ giderimi için asidik rejimin sağlanması önemlidir [38]. Radikaller asidik koşullarda oluştuğundan sistemin ideal pH'sının belirlenmesi gerekir. Diğer taraftan da Fe²⁺ iyonlarının pH 5 değerlerinde kararlı olmadığı belirtilmiştir [17]. Dolayısıyla deney planında her iki yöntem için pH'ın 2-4,5 arasındaki değerleri denenmiştir. 100 mg/L boya çözeltilisi ile gerçekleştirilen Fenton oksidasyon deneyleri Fe²⁺ konsantrasyonu 100 mg/L, H₂O₂ konsantrasyonu 100 mg/L, reaksiyon süresi 75 dk olduğu koşullarında ve Tablo 1'de belirtilen farklı pH değerlerinde denenmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 3'te belirtilmiştir. Renk giderimi pH 2 ve 2.5 değerlerinde benzer bulgular olsa da pH'ın 3'e yükselmesiyle artmış ve pH'ın 3.5 olduğu reaktörlerde % 82.6 verimle en yüksek renk giderimi elde edilmiştir. pH 4.5

'e yükseldiğinde renk giderim veriminde düşüş gözlemlenmiştir. En yüksek KOİ giderim verimi de pH 3.5 olduğunda %70.6 olarak elde edilmiştir.

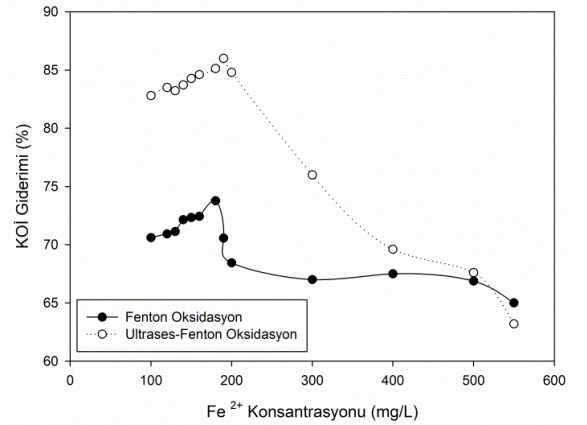
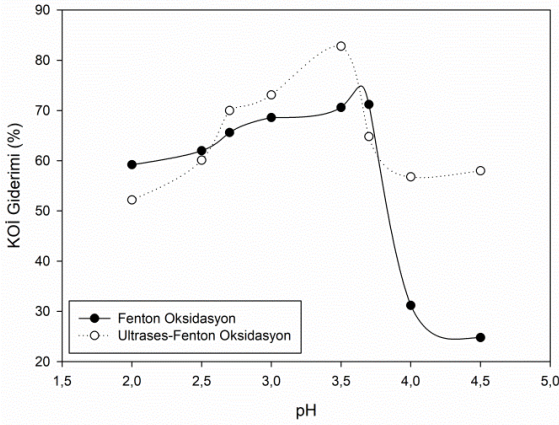
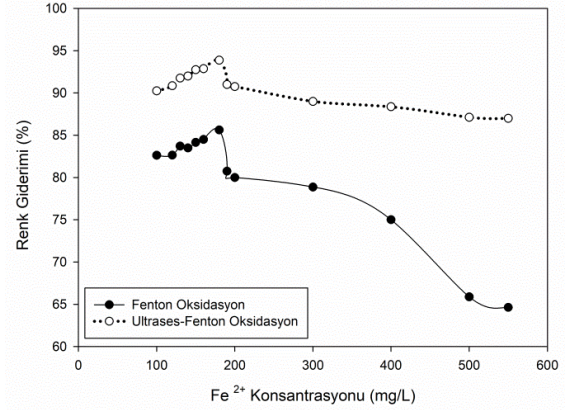
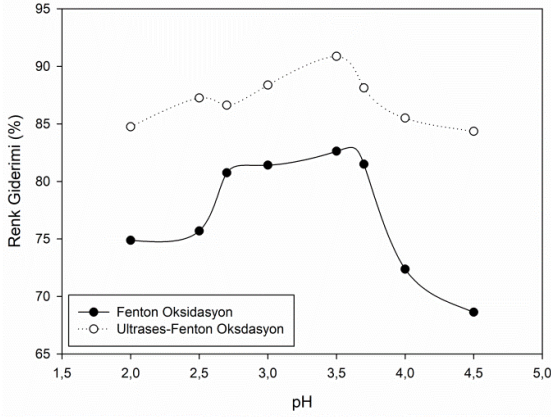
Ultrases-Fenton prosesinde deneyler 100 mg/L boya çözeltilisi, Fe²⁺ konsantrasyonu 100 mg/L, H₂O₂ konsantrasyonu 100 mg/L ve reaksiyon süresi 60dk olduğu koşullarda gerçekleştirilmiştir. Şekil 3'te belirtildiği gibi ultrases-Fenton deneylerinde renk giderimi pH'ın 3.5 değerine kadar artış göstermiştir. Daha yüksek pH değerlerinde ise renk gideriminde azalma meydana gelmiştir. KOİ giderimdeki sonuçlar da benzer eğilim göstermiştir. Ultrases-Fenton deneylerinde sırasıyla renk ve KOİ giderimi %90.8 ve %82.8 olarak hesaplanmıştır. Fenton oksidasyonu ile aynı ideal pH değeri elde edilse de sonuçlar göz önüne alındığında ultrases işlemiyle modifiye edilen deneylerde daha yüksek giderim performansı elde edilmiştir.

Özdemir vd. [15] yaptığı çalışma sonuçlarında da benzer bir eğilim gözlemlenmiştir. Kochany vd. [17] çalışmasında ise Fenton prosesi için ideal pH seviyesi 3.5 olarak belirlemiştir. Asidik pH koşullarında H₂O₂ ve demir iyonları daha dengeli ve kararlı yapıdadır [17]. Bu durum hidroksil radikallerinin oluşumunu ve organik kirleticilerin giderimini doğrudan etkilemektedir [39]. Yüksek pH değerlerinde Fe³⁺, Fe(OH)₃ olarak çökelebilmekte ve hidrojen peroksiti O₂ ve H₂O reaksiyonuna katalize etmektedir. Bu durum OH• üretimini azaltmaktadır. Ayrıca pH'ın 3.5'ten daha yüksek olduğu durumlarda genellikle Fenton işlemi yerine dengeğin Fe(OH)₃ tarafından kontrol edildiği ve koagülasyon gibi süreçlerin gerçekleştiği belirtilmiştir. Düşük pH'ta (pH<2) H₂O₂ bir proton alarak kararlı kalacağı okson iyonuna (H₃O₂⁺) dönüşür. Bu yüzden Fe²⁺ ile reaksiyonu yavaşlayabilmektedir (Denklem 4). Denklem 5'de belirtildiği gibi düşük pH seviyelerinde H⁺ iyonları hidroksil radikalleriyle reaksiyona girecektir [40].



3.3. Fe²⁺ konsantrasyonunun renk ve KOİ giderim verimine etkisi

Fenton prosesinde Fe²⁺ katalizörü kullanılarak H₂O₂ ayrıştırılmakta ve OH• üretilmektedir. Prosesin ihtiyaç duyduğu Fe²⁺ konsantrasyonunun optimizasyonu kimyasal arıtma çamuru miktarının azaltılması ve kimyasal sarfiyatından kaynaklı maliyetin düşürülmesi için önemlidir [15]. Fe²⁺ konsantrasyonları, Fenton ve ultrases-Fenton deneylerinde pH 3.5'te sabit H₂O₂ konsantrasyonunda (100 mg/L) ve sırasıyla 75 dk ve 60 dk reaksiyon süresinde Tablo 1'de (100 ile 550 mg/L) belirtilen aralıklarda denenmiştir. Şekil 4'te görüldüğü gibi renk ve KOİ giderimleri 100-180 mg/L aralığında artan Fe²⁺ konsantrasyonu ile artmış ve optimum seviyesinde en yüksek değere ulaşmıştır. Her iki oksidasyon yönteminde Acid Blue 264 azo boya çözeltilisinin en yüksek renk ve KOİ giderimi 180 mg/L Fe²⁺ konsantrasyonunda gerçekleşmiştir.



Şekil 3. Fenton ve Ultrases Fenton proseslerine pH'ın renk ve KOİ giderimine etkisi

Şekil 4. Fenton ve Ultrases Fenton proseslerine Fe²⁺konsantrasyonunun renk ve KOİ giderimine etkisi

Fenton oksidasyonu için giderim performansları sırasıyla %83.2 ve %73.77 iken ultrases-Fenton oksidasyonu için sırasıyla % 93.88 ve % 85.13 olarak hesaplanmıştır. Fazla Fe²⁺ konsantrasyonu hidroksil radikalleri ile tepkimeye girerek radikal süpürme etkisi gerçekleştirmektedir (Denklem 6). Bu durum kahverengi bir bulanıklık yarattığından fazla demir tüketiminden kaçınılmalıdır [15].



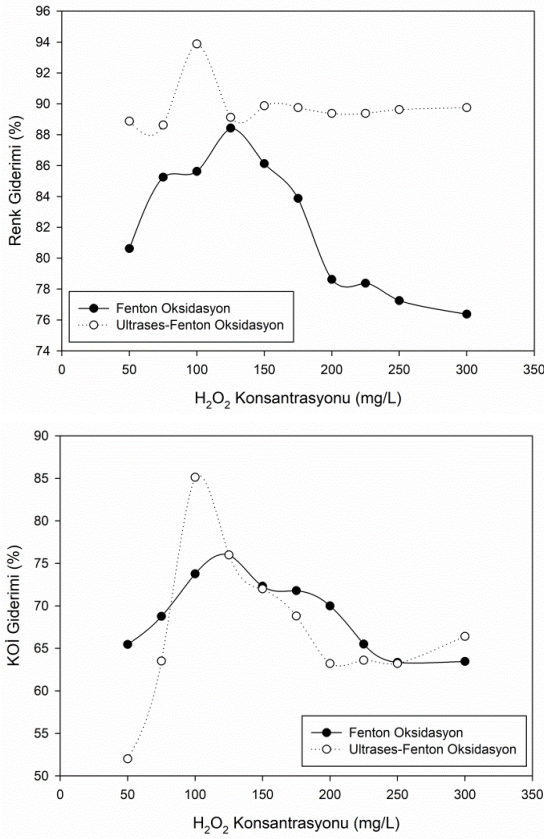
3.4. H₂O₂ konsantrasyonunun renk ve KOİ giderim verimine etkisi

Her iki yöntem için H₂O₂ konsantrasyonu 50-300 mg/L aralığında denenmiştir. Fenton ve ultrases-Fenton deney parametreleri 100 mg/L boya çözeltisi, pH 3.5'te, 180 mg/L Fe²⁺ konsantrasyonunda ve sırasıyla 75 dk ve 60 dk reaksiyon sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Optimum H₂O₂ konsantrasyonuna kadar her iki yöntemde renk ve KOİ giderimlerinde artış gerçekleşmiştir. Fenton oksidasyon yönteminde optimum H₂O₂ konsantrasyonu 125 mg/L iken bu değer Ultrases-Fenton oksidasyon yönteminde 100 mg/L olarak belirlenmiştir (Şekil 5). Elde edilen optimum H₂O₂ konsantrasyon değerlerinde renk ve KOİ giderim verimleri Fenton oksidasyonu için sırasıyla %88.4 ve %76 iken ultrases-Fenton oksidasyonunda %94 ve %86.1 olarak belirlenmiştir.

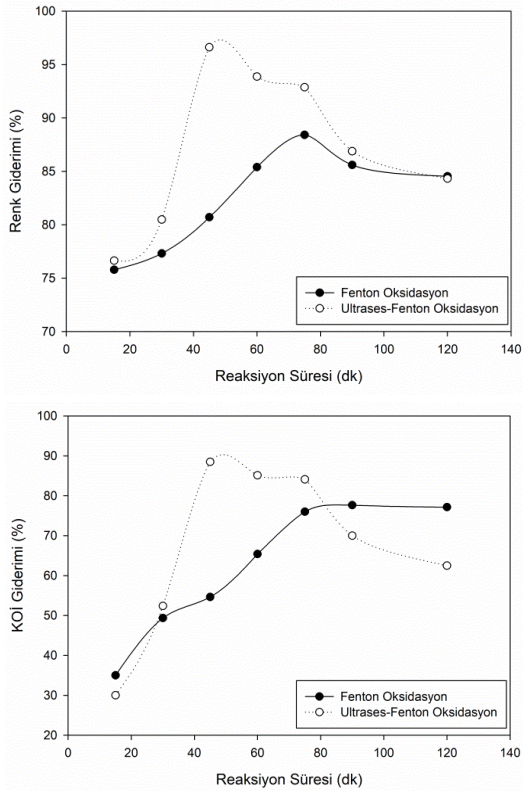
Ultrases-Fenton oksidasyonunda ultrases işleminin sinerjik etkisi ile kullanılan H₂O₂ miktarında azalma olmuştur. Fenton prosesinde radikallerin ana kaynağı H₂O₂ olduğundan bu parametrenin optimizasyonu her iki yöntem için önemlidir [38]. Çünkü çok yüksek H₂O₂ konsantrasyonunda ayrışma reaksiyonu yerine OH• radikalinin istenmeyen rekombinasyonu ve süpürme etkisi gerçekleşmektedir. Bu tür reaksiyonlar daha az oksidasyon potansiyeline sebep olmaktadır [41].

3.5. Reaksiyon süresinin renk ve KOİ giderim verimine etkisi

Fenton oksidasyonunda demir iyonu ile H₂O₂'in reaksiyonları ile hidroksil radikalleri üretilmektedir. Bu reaksiyonların kararlılığı ortamın pH'ına ve reaksiyonun tamamlanması için geçen reaksiyon süresine bağlıdır. Çalışmanın bu aşamasında Fenton ve ultrases-Fenton yöntemlerinin ideal reaksiyon süreleri belirlenmiştir. Fenton oksidasyon deneyleri pH 3.5, Fe²⁺ konsantrasyonu 180 mg/L, H₂O₂ konsantrasyonu 125 mg/L koşullarında gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'da belirtildiği üzere Fenton oksidasyon yönteminde en yüksek renk ve KOİ giderimi 75 dk'lık reaksiyon süresinin denendiği reaktörlerde elde edilmiştir. Renk ve KOİ giderim verimleri sırasıyla %88.5 ve %76 olmuştur.



Şekil 5. Fenton ve Ultras Fenton proseslerine H₂O₂ konsantrasyonunun renk ve KOİ giderimine etkisi



Şekil 6. Fenton ve Ultras Fenton proseslerine reaksiyon süresinin renk ve KOİ giderimine etkisi

Bu süreye kadar renksizleşme artmıştır. Fakat bu süreden sonra renk giderim verimi düşmüştür. KOİ gideriminde de optimum reaksiyon süresine kadar giderim performansında artış görülse de bu değerden sonra KOİ gideriminde değişiklik gözlenmemiştir. Ultras-Fenton deneyleri pH 3,5, Fe²⁺ konsantrasyonu 180 mg/L, H₂O₂ konsantrasyonu 100 mg/L ve 20 kHz ultrases koşullarında gerçekleştirilmiştir. En yüksek renk ve KOİ giderimlerine 45 dk'lık reaksiyon süresinin sonunda ulaşılmıştır. Analiz sonrasında renk ve KOİ giderimleri sırasıyla %96,6 ve %88,5 olarak hesaplanmıştır. Ultras-Fenton yönteminde reaksiyon süresi Fenton yöntemine kıyasla %40 kısalmıştır. Sonuçlar Şekil 6'da gösterilmiştir.

4 Sonuçlar

Acid Blue 264 boyası elyaf boyama ve baskı işlemlerinde yaygın olarak kullanılan bir azo boya türüdür. Uygulanan her iki yöntem ile azo boyası oksitlenerek renk ve KOİ giderilmiştir. Bu boyanın Fenton ve ultras-Fenton oksidasyon yöntemleri ile oksidatif bozunmasını etkileyen pH, demir konsantrasyonu, H₂O₂ konsantrasyonu ve reaksiyon süresi gibi önemli parametrelerin optimum seviyeleri her iki yöntem için belirlenmiştir. Fenton oksidasyon yöntemi için belirlenen optimum seviyeler pH = 3,5, Fe²⁺ konsantrasyonu 180 mg/L, H₂O₂ konsantrasyonu 125 mg/L ve reaksiyon süresi 75 dakikadır, ultras-Fenton oksidasyon yöntemi için pH = 3,5, Fe²⁺ konsantrasyonu 180 mg/L, H₂O₂ konsantrasyonu 100 mg/L ve reaksiyon süresi 45 dakikadır. Elde edilen optimizasyon çalışmalarının sonuçlarına göre Fenton oksidasyon yönteminde renk ve KOİ giderim verimleri sırasıyla %88,5 ve %76, Ultras-Fenton oksidasyon yönteminde elde edilen renk ve KOİ giderim verimi %96,6 ve %88,5 olarak hesaplanmıştır. Ultras-Fenton işlemi ile üretilen ekstra hidroksil üretimi sebebiyle ultras-Fenton yöntemindeki oksidasyon hızı ve verimliliği Fenton işlemine kıyasla daha yüksek olmuştur. Her iki yöntemin renk ve KOİ giderim performansları karşılaştırıldığında ultras-Fenton prosesinde reaksiyon süresi Fenton prosesine göre %40 kısalmıştır. Ultras-Fenton oksidasyonunda kaviteleme ile üretilen hidroksil radikallerinden dolayı sistemin ihtiyaç duyduğu H₂O₂ miktarı da azalmıştır. Böylelikle daha yüksek renk ve KOİ giderim performansının daha düşük H₂O₂ tüketimiyle sağlanması ultras-Fenton yönteminin bir diğer avantajı olmuştur. Çevrenin korunması kapsamında uygulanan yasalar doğrultusunda boyaların kullanıldığı tekstil, kağıt, baskı gibi endüstrilerin atıksuları deşarj edilmeden önce renk ve KOİ gibi parametrelerinin belirlenen sınır değerleri sağlanması gerekmektedir. Bu amaçla mevcut yöntemlerin birleştirildiği modifiye sistemler ile sinerjik etkinin oluşturulduğu ve arıtma performansının artırıldığı çalışmalar günümüzde önem arz etmektedir. Elde edilen sonuçlar ışığında Acid Blue 264 boyasının gideriminde Fenton ve ultras-Fenton yönteminin uygun olduğu ve belirlenen optimum koşullar atıksuyun pilot ölçekli çalışmalarında veya gerçek ölçekli arıtılmasında kullanılabilir.

Teşekkür

BAP-FBE ÇMB (DT)2013-4 protokol numaralı proje ile sağladıkları maddi kaynaktan dolayı Mersin Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederiz.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %9

Kaynaklar

- [1] J. Khan, M. Sayed, A. Fayaz and H.M. Khan, Removal of acid yellow 17 dye by Fenton oxidation process. *Zeitschrift Für Physikalische Chemie*, 232, 507-525, 2018. <https://doi.org/10.1515/zpch-2017-1072>.
- [2] Y. Anjaneyulu, N.S. Chary and D.S.S. Raj, Decolorization of industrial effluents—available methods and emerging technologies—a review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 4, 245–273, 2005. <https://doi.org/10.1007/s11157-005-1246-z>.
- [3] C.-H. Weng, Y.-T. Lin and H.-M. Yuan, Rapid decoloration of Reactive Black 5 by an advanced Fenton process in conjunction with ultrasound. *Separation and Purification Technology*, 117, 75–82, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.03.047>.
- [4] L. Aljerf, High-efficiency extraction of bromocresol purple dye and heavy metals as chromium from industrial effluent by adsorption onto a modified surface of zeolite: kinetics and equilibrium study. *Journal of Environmental Management*, 225, 120–132, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.048>.
- [5] S.-F. Kang, C.-H. Liao and S.-T. Po, Decolorization of textile wastewater by photo-Fenton oxidation technology. *Chemosphere*, 41, 1287–1294, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00524-X](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00524-X).
- [6] Ö. Demir, Synthesis of Fe₃O₄ Magnetic Nanoparticles and Investigation of Removal Capacity. *Journal of the Chemical Society of Pakistan*, 40, 111-122, 2018.
- [7] R. Gong, Y. Jin, F. Chen, J. Chen and Z. Liu, Enhanced malachite green removal from aqueous solution by citric acid modified rice straw. *Journal of Hazardous Materials*, 137, 865–870, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.03.010>.
- [8] E.A. Clarke and R. Anliker, *The Handbook of Environmental- Anthropogenic Compounds: Organic dyes and pigments*, . Springer, Berlin, 1980.
- [9] R.O. Yusuff and J.A. Sonibare, Characterization of textile industries' effluents in Kaduna, Nigeria and pollution implications. *Global Nest: The International Journal*, 6, 3,, 212–221, 2004.
- [10] S. Şahinkaya, COD and color removal from synthetic textile wastewater by ultrasound assisted electro-Fenton oxidation process. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 19, 601–605, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2012.09.023>.
- [11] G. Crini, Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: a review. *Bioresource Technology*, 97, 1061–1085, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.05.001>.
- [12] N. Thinakaran, P. Baskaralingam, K. V Thiruvengada Ravi, P. Panneerselvam and S. Sivanesan, Adsorptive removal of acid blue 15: equilibrium and kinetic study. *CLEAN–Soil, Air, Water*, 36, 798–804, 2008. <https://doi.org/10.1002/clen.200800027>.
- [13] S.-F. Kang, C.-H. Liao and M.-C. Chen, Pre-oxidation and coagulation of textile wastewater by the Fenton process. *Chemosphere*, 46, 923–928, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(01\)00159-X](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(01)00159-X).
- [14] M. Muthukumar and N. Selvakumar, Decoloration of acid dye effluent with ozone: effect of pH, salt concentration and treatment time. *Coloration Technology*, 121, 7–12, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.2005.tb00240.x>.
- [15] C. Özdemir, M.K. Öden, S. Şahinkaya and E. Kalipçi, Color removal from synthetic textile wastewater by sono-fenton process. *Clean–Soil, Air, Water*, 39, 60–67, 2011. <https://doi.org/10.1002/clen.201000263>.
- [16] H.-J. Hsing, P.-C. Chiang, E.-E. Chang and M.-Y. Chen, The decolorization and mineralization of Acid Orange 6 azo dye in aqueous solution by advanced oxidation processes: A comparative study. *Journal of Hazardous Materials*, 141, 8–16, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.05.122>.
- [17] S. Meriç, D. Kaptan and T. Ölmez, Color and COD removal from wastewater containing Reactive Black 5 using Fenton's oxidation process. *Chemosphere*, 54, 435–441, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2003.08.010>.
- [18] N. Ertugay and F.N. Acar, Removal of COD and color from Direct Blue 71 azo dye wastewater by Fenton's oxidation: Kinetic study. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S1158–S1163, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.arabj.2013.02.009>.
- [19] E.J. Rosenfeldt, P.J. Chen, S. Kullman and K.G. Linden, Destruction of estrogenic activity in water using UV advanced oxidation. *Science of the Total Environment*, 377, 105–113, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.01.096>.
- [20] M. Mohajerani, M. Mehrvar and F. Ein-Mozaffari, An overview of the integration of advanced oxidation technologies and other processes for water and wastewater treatment. *International Journal of Engineering*, 3, 120–146, 2009.
- [21] A. Mehrdad and R. Hashemzadeh, Ultrasonic degradation of Rhodamine B in the presence of hydrogen peroxide and some metal oxide. *Ultrasonics Sonochemistry*, 17, 168–172, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2009.07.003>.
- [22] Y.-S. Ma, C.-F. Sung and J.-G. Lin, Degradation of carbofuran in aqueous solution by ultrasound and Fenton processes: effect of system parameters and kinetic study. *Journal of Hazardous Materials*, 178, 320–325, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.01.081>.

- [23] N. Geng, W. Chen, H. Xu, M. Ding, T. Lin, Q. Wu and L. Zhang, Insights into the novel application of Fe-MOFs in ultrasound-assisted heterogeneous Fenton system: Efficiency, kinetics and mechanism. *Ultrasonics Sonochemistry*, 72, 105411, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105411>.
- [24] Y. Wang, L. Gai, W. Ma, H. Jiang, X. Peng and L. Zhao, Ultrasound-assisted catalytic degradation of methyl orange with Fe₃O₄/polyaniline in near neutral solution. *Industrial&Engineering Chemistry Research*, 54, 2279–2289, 2015. <https://doi.org/10.1021/ie504242k>.
- [25] N. Pokhrel, P.K. Vabbina and N. Pala, Sonochemistry: science and engineering. *Ultrasonics Sonochemistry*, 29, 104–128, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.07.023>.
- [26] Z. Guo, R. Feng, J. Li, Z. Zheng and Y. Zheng, Degradation of 2, 4-dinitrophenol by combining sonolysis and different additives. *Journal of Hazardous Materials*, 158, 164–169, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.01.056>.
- [27] S. Findik and G. Gündüz, Sonolytic degradation of acetic acid in aqueous solutions. *Ultrasonics Sonochemistry*, 14, 157–162, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2006.03.009>.
- [28] A.H. Alwash, A.Z. Abdullah and N. Ismail, Investigation on the catalytic behavior of Fe loaded on encapsulated titanium for sonocatalytic degradation of amaranth: characterization and reusability study. *Modern Research in Catalysis*, 2 (3), 2013. <https://doi.org/10.4236/mrc.2013.23015>.
- [29] Y.L. Pang, A.Z. Abdullah and S. Bhatia, Review on sonochemical methods in the presence of catalysts and chemical additives for treatment of organic pollutants in wastewater. *Desalination*, 277, 1–14, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.04.049>.
- [30] A.J. Sisi, M. Fathinia, A. Khataee and Y. Orooji, Systematic activation of potassium peroxydisulfate with ZIF-8 via sono-assisted catalytic process: mechanism and ecotoxicological analysis. *Journal of Molecular Liquids*, 308, 113018, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113018>.
- [31] T.S. Rad, Z. Ansarian, R.D.C. Soltani, A. Khataee, Y. Orooji and F. Vafaei, Sonophotocatalytic activities of FeCuMg and CrCuMg LDHs: influencing factors, antibacterial effects, and intermediate determination. *Journal of Hazardous Materials*, 399, 123062, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123062>.
- [32] L. V Prakash, A. Gopinath, R. Gandhimathi, S. Velmathi, S.T. Ramesh and P. V Nidheesh, Ultrasound aided heterogeneous Fenton degradation of Acid Blue 15 over green synthesized magnetite nanoparticles. *Separation and Purification Technology*, 266, 118230, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.118230>.
- [33] M. Dükkancı, M. Vinatoru and T.J. Mason, The sonochemical decolourisation of textile azo dye Orange II: effects of Fenton type reagents and UV light. *Ultrasonics Sonochemistry*, 21, 846–853, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.08.020>.
- [34] A. Maroudas, P.K. Pandis, A. Chatzopoulou, L.-R. Davellas, G. Sourkouni and C. Argirusis, Synergetic decolorization of azo dyes using ultrasounds, photocatalysis and photo-fenton reaction, *Ultrasonics Sonochemistry*, 71, 105367, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105367>.
- [35] Y. Song, J. Li and H. Chen, Degradation of CI Acid Red 88 aqueous solution by combination of Fenton's reagent and ultrasound irradiation. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 84, 578–583, 2009. <https://doi.org/10.1002/jctb.2083>.
- [36] C. Özdemir, M.K. Öden, S. Şahinkaya and D. Güçlü, The sonochemical decolourisation of textile azo dye CI Reactive Orange 127. *Coloration Technology*, 127, 268–273, 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.2011.00310.x>.
- [37] World Dye Variety, Acid Blue 264, 2021. <http://www.worlddyevariety.com/acid-dyes/acid-blue-264.html>.
- [38] S.G. Cetinkaya, M.H. Morcali, S. Akarsu, C.A. Ziba and M. Dolaz, Comparison of classic Fenton with ultrasound Fenton processes on industrial textile wastewater. *Sustainable Environment Research*, 28, 165–170, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2018.02.001>.
- [39] J. Kochany and E. Lipczynska-Kochany, Utilization of landfill leachate parameters for pretreatment by Fenton reaction and struvite precipitation—a comparative study. *Journal of Hazardous Materials*, 166, 248–254, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.11.017>.
- [40] P.V. Nidheesh, R. Gandhimathi and S.T. Ramesh, Degradation of dyes from aqueous solution by Fenton processes: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 20, 2099–2132, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-1385-z>.
- [41] P.B. Patil, S. Raut-Jadhav and A.B. Pandit, Effect of intensifying additives on the degradation of thiamethoxam using ultrasound cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70, 105310, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105310>.





Organize sanayi bölgesine ait atıksu arıtma tesisinde ECAM modellemesiyle karbon emisyonu değerlendirilmesi

Assessment of carbon emission from a wastewater treatment plant of an organized industrial district by ECAM modelling

Cansu Mıstıklar¹ , Süreyya Meriç^{2,*} 

¹ Murath OSB, Tekirdağ, Türkiye

² Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Bölümü, 59030, Tekirdağ, Türkiye

Özet

Günümüzde, iklim değişikliğine etkisi olan faktörlerden biri de atıksu arıtma tesisleridir. Atıksu arıtma tesislerinde meydana gelen temel sera gazı emisyonları; karbondioksit (CO₂), metan (CH₄) ve nitroz oksit (N₂O)'dir. Sera gazı emisyonu, atıksu arıtma tesisindeki işletme prosesi, elektrik tüketimi, çamur arıtımı, bertaraf için taşıma gibi faaliyetlerden kaynaklanmaktadır.

Bu çalışmanın amacı; Tekirdağ'da bulunan karışık atıksuların arıtıldığı bir Organize Sanayi Bölgesine ait atıksu arıtma tesisinde oluşan sera gazı emisyonlarının (CO₂, CH₄, N₂O) tahmin edilmesi ve sera gazı emisyonu optimizasyonu yapılmasıdır. Bu çalışmada, sera gazı emisyon hesabı için WaCCliM'in alt organizasyonu olan ECAM web tool programı kullanılmıştır. Çalışma iki bölümde incelenmiş olup, farklı aylardaki sera gazı emisyonu tahminleri yapılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Atıksu debisinin artması ve yük miktarının değişkenliği sonucunda en yüksek emisyon 226.573 kgCO₂eşdeğer/ay ile Aralık ayında oluşmuştur. Yaz aylarındaki sera gazı emisyon sonuçlarına göre en yüksek emisyon 195.174 kgCO₂eşdeğer/ay ile Temmuz ayında oluşmuştur. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre arıtma tesislerindeki emisyon kaynağının çoğunluğu elektrik enerjisi tüketimi ve çamur yönetiminden kaynaklandığı görülmüştür. Emisyonların minimize edilmesi için yenilenebilir enerji kaynak kullanımının artırılması ve çamur bertarafının azaltılması sağlanmalıdır.

Anahtar kelimeler: Sera gazı emisyonu, Atıksu arıtma tesisi, ECAM yazılımı, İklim değişikliği, Enerji verimliliği, Optimizasyon

1 Giriş

Sanayileşmenin başladığı dönemden günümüze kadar olan süreçte, sanayi alanındaki ilerlemeler sonucunda kontrolsüz ve bilinçsizce salınan gazlar, kentleşme faaliyetlerinin artışı, çevre kirliliği problemlerinin oluşmasına neden olmakta ve doğal dengenin bozularak iklim değişikliği olaylarına sebep olmaktadır.

Bu kapsamda iklim değişikliği ve çevresel sorunlara çözüm önerilerinin ilk adımları 1992 yılında gerçekleştirilen Rio Konferansı, 1997'de imzaya sunulduktan sonra 2005'te

Abstract

Nowadays, one of the factors that have an impact on climate change is wastewater treatment facilities. The main greenhouse gas (GHG) emissions are carbondioxide (CO₂), nitrous oxide (N₂O) and methane (CH₄) in waste water treatment plants. GHG emissions are caused by several items such as the electric consumption, treatment process, sludge treatment, sludge transportation for disposal in the WWTP.

The purpose of this paper is the optimization and estimation of GHG emissions from a central wastewater treatment plant in an organized industrial district in Tekirdag. GHG emissions from WWTP have been calculated using ECAM web tool that is designed by WaCCliM organization. This work analyzed GHG emissions are compared and estimated for different months with in two sections. The highest emissions were estimated in December to be 226.573 kgCO₂e/month because the wastewater flow and wastewater load were increased. The highest emission in summer months was estimated to be 195.174 kgCO₂e/month for July. The results of this work showed that the most of expenses are spent through electric energy consumption and sludge transportation and disposal in the WWTP. GHG emissions are minimized if it is increased the use of renewable energy sources and is decreased to produce disposal sludges.

Keywords: Greenhouse gas emission, Wastewater treatment plant, ECAM web tool, Climate change, Energy efficiency, Optimization

yürürlüğe giren Kyoto Protokolü ve 2015 yılında geniş bir katılım sağlanarak imzalanan Paris Anlaşması'dır.

1992 yılında 3-14 Haziran tarihleri arasında toplanan Birleşmiş Milletler Çevre ve Kalkınma Konferansında (Rio Dünya Zirvesi), United Nations Framework Convention on Climate Change (Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi-BMİDÇS) imzaya açılmıştır. Bu sözleşmenin amacı; atmosferde serbest haldeki sera gazı birikimlerinin, genel anlamda iklim üzerindeki insan kaynaklı etkisini önleyecek düzeyde başarmaktır. Aynı

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: smeric@nku.edu.tr (S. Meriç)

Geliş / Received: 15.01.2021 Kabul / Accepted: 25.06.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021

doi:10.28948/ngmuh.862187

zamanda böyle bir başarıya ulaşırken ekosistemin iklim değişikliğine doğal bir şekilde uyum sağlaması, gıda üretiminin zarar görmemesi ve ekonomik kalkınmanın sürdürülebilir şekilde devam etmesi amaçlanmıştır [1].

Kyoto Protokolünde baz alınan gazlar; Karbon dioksit (CO₂), Metan (CH₄), Nitroksit (N₂O), Hidrofloro Karbonlar (HFCs), Perfloro Karbonlar (PFCs) ve Sülfür Heksaflore (SF₆)'dir. Bu gazlar arasında en tehlikeli olan Sülfür Heksaflore ve en az tehlikeli olanı ise Karbon Dioksit olarak tanımlanmaktadır. Ancak atmosferdeki miktarı açısından CO₂ diğer gazlara oranla çok yüksek seviyede olmasından dolayı çevreye verdiği zarar açısından en tehlikeli gaz CO₂'dir [2].

2015 Aralık ayında gerçekleştirilen COP 21'de ise BMİDÇS'ye taraf olan 197 ülkenin hepsinin küresel iklim değişikliğini 2100 senesine kadar sanayi öncesi döneme göre 2 °C'nin altında ve mümkünse 1.5°C ile sınırlandırmasını öngören Paris Anlaşması imzalanmıştır. 2020'de işlerlik kazanacak olan bu yeni anlaşmayı günümüze kadar 185 ülkenin onayladığı görülmektedir [3].

Ülkemizde sera gazı emisyonlarına yönelik adımlar 17 Mayıs 2014 tarihli Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından hazırlanan "Sera Gazı Emisyonlarının Takibi (SGET) hakkında Yönetmelik" ile atılmıştır [4].

Ancak, yürürlükte olan mevzuatta, atıksu arıtma tesisleriyle ilgili bilgi verilmemiş olup, ilgili mevzuatın Ek-1 listesinde üretim yapan tesislere yönelik bilgiler verilmiştir. Mevzuat Ek-2 listesinde yer alan, sera gazı emisyonu kaynağı olarak yer verilmemiştir. Atıksu arıtma süreçlerinde üretilen temel sera gazları, karbondioksit (CO₂), metan (CH₄) ve nitroz oksit (NO₂)'tir. Karbondioksit üretimi arıtma prosesi ve elektrik tüketimi olmak üzere iki şekilde meydana gelir. Atıksudaki organik bileşiklerin anaerobik ortamda bozunmasıyla ve aerobik arıtma çamurlarının bertarafı esnasında CH₄ meydana gelir. CH₄ üretimi, birincil olarak atıksudaki bozunabilir organik madde miktarına, sıcaklık ve arıtma sistemi türüne bağlıdır. Atıksu arıtma tesislerinde üretilen metan, giriş KOI değerinin yaklaşık %0,85'ine denk gelmektedir [5]. Biyolojik atıksu arıtımında nitrifikasyon ve denitrifikasyon prosesleri sonucu N₂O emisyonları oluşabilir. Atıksu arıtma tesislerinin dışarıdan kaynaklanan N₂O emisyonları azot giderimine bağlı olarak gerçekleşen nitrifikasyon – denitrifikasyon bakterileri tarafından nitrojene dönüştürülmesinden kaynaklı olabilmektedir [6].

Bu çalışmada, atıksu arıtma tesislerinin ECAM (The Energy Performance and Carbon Emissions Assessment and Monitoring) modeli kullanılarak, meydana gelen sera gazı emisyonlarının (CO₂, CH₄, N₂O) miktarı ve kaynaklandığı yerin tespiti yapılarak, bu emisyonların oluşmasında etkili olan koşulların saptanması ve proses işletimindeki etkileri ile sera gazı emisyon optimizasyonu ve minimizasyonunun yapılması amaçlanmıştır. Bu çalışma kapsamında, Muratlı Organize Sanayi Bölgesi (Muratlı OSB)'ne ait evsel ve endüstriyel atıksuların arıtıldığı arıtma tesisi seçilmiştir.

2 Materyal ve metot

2.1 Muratlı organize sanayi bölgesi ve atıksu arıtma tesisi'nin tanıtımı

Çalışma alanı olan Muratlı OSB'ye ait kurulu atıksu arıtma tesisi, Tekirdağ il merkezinden 23 km uzaklıkta bulunan Muratlı ilçesinde yer almaktadır [7] (Şekil 1)

Organize Sanayi Bölgesi'ne ait evsel ve endüstriyel atıksuların arıtıldığı 25.000 m³/gün kurulu debi kapasitesine sahip merkezi arıtma tesisinin mevcut durumda günlük yaklaşık 5000 m³/gün atıksu debisi bulunmaktadır. Muratlı OSB'de toplamda 27 tane faaliyette olan firma olup, Muratlı OSB Atıksu Arıtma Tesisi'ne atıksu hattı bulunan 18 firma bulunmaktadır. Tesisin 2018 – 2019 (Eylül) yılları arasındaki işletme döneminde atıksu arıtma tesisine toplamda 3 firma bağlı bulunurken, 2019 yılı Eylül ayı itibarıyla ikinci altyapıların tamamlanmasıyla 15 firma daha eklenerek toplam 18 firmanın atıksu hattı Muratlı OSB Atıksu Arıtma Tesisine bağlanmıştır.

Kurulu endüstrilerin sektörel dağılımına bakıldığında; tekstil, kâğıt-karton geri dönüşüm, yağ, makine, kimya, gıda, otomotiv, kauçuk sektörleri yer almaktadır.

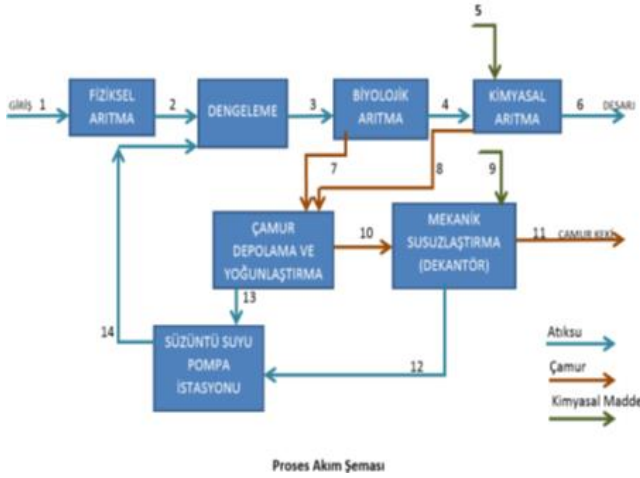


Şekil 1. Muratlı organize sanayi bölgesi

Firmalardan gelen atıksu, kaba ızgaralardan geçtikten sonra giriş terfi pompalarıyla terfi kazandırılarak fiziksel arıtma ön arıtma işlemlerine tabi tutulmaktadır. Fiziksel arıtmadan çıkan atıksu, dengeleme terfi pompaları yardımıyla biyolojik arıtma ünitesine iletilmektedir. Biyolojik arıtma ünitesinin ilk aşaması olan biyofosfor havuzunda, anaerobik ortam koşullarında anaerobik bakteriler tarafından atıksu içerisindeki yağ asitlerinin tüketimiyle, bünyelerinde bulunan polifosfatı ortofosfat olarak atıksu salınımı gerçekleştirilerek fosfor miktarı artırılır. Daha sonra anaerobik biyofosfor havuzundaki atıksu, havalandırma havuzlarına iletilerek aerobik ve anoksik ortam koşullarında salınmış fosforun aşırı depolanmasını sağlayarak fosfor giderimi gerçekleştirilir.

Havalandırma havuzları birden fazla proses işletimine göre tasarlanmış olup, %50 aktif çamur, %50 A²O prosesine göre işletimi sağlanmaktadır. Havalandırma havuzlarında, 0.4-1.6 mg/L çözülmüş oksijen varlığında nitrifikasyon ve denitrifikasyon işlemleri gerçekleştirilerek karbon, azot ve fosfor giderimi yapılmaktadır. Havalandırma havuzlarından çıkan atıksu, biyolojik çöktürme havuzlarına gelerek burada çöktürülerek çamur depolama havuzlarına ve çamur geri

devir istasyonuna iletilmektedir. Biyolojik çöktürme havuzlarında savaklardan çıkan arıtılmış atıksu kimyasal arıtma ünitesine iletilmektedir. Kimyasal arıtma ünitesinde hızlı ve yavaş karıştırıcı ünitelerinde gerekli durumlarda fosfor ve renk giderimi için kimyasal dozaj yapılmaktadır. Bu üniteden çıkan atıksu, kimyasal çöktürme havuzlarında çöktürülerek savaklardan çıkan atıksu çıkış yapısına iletilerek alıcı ortama (Kurudere) deşarjı sağlanmaktadır. Çamur depolama havuzları 2 adet olup, biyolojik arıtmadan oluşan çamurlar her iki havuzda da toplanabilmektedir. Burada biriktirilen çamurların, dekantörlerde kimyasallar kullanımı ile susuzlaştırılması sağlanarak yaklaşık %20 kuruluğa sahip çamur keki, kamyon kasasına doldurularak anlaşmalı lisanslı firmalar ile bertarafı sağlanmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. Muratlı OSB A.A.T. proses akım şeması

2.2 ECAM modeli

Dünya çapında 140 ülkede üyesi bulunan Uluslararası Su Organizasyonu (International Water Association-IWA), günümüzde su ve atıksu ile ilgili problemlere sürdürülebilir çözümler getiren uluslararası bir kuruluştur [8]. IWA'nın alt dalı olan İklim Değişikliği ile Mücadele amaçlı Su ve Atıksu Şirketleri (Water and Wastewater Companies for Climate Mitigation-WaCCliM) organizasyonu tarafından su ve atıksu yönetiminden kaynaklanan sera gazı emisyonlarının hesaplamaları için ECAM (Enerji Performansı ve Karbon Emisyonları İzleme ve Değerlendirme Aracı) modeli geliştirilmiştir. İnternet üzerinden ücretsiz erişim sağlanabilen ECAM modeli, su ve atıksu alanında karbon emisyonları için saptama ve optimizasyon sağlamaktadır.

Sera gazı emisyonu tahmini için ECAM model yazılımında iki ana değerlendirme yapılmaktadır. Birinci adım olan Faz I aşamasında, sistemin elektrik tüketimi ve sera gazı emisyonu hakkında pasta grafik ve şekiller üzerinde genel bir değerlendirme elde edilmektedir. İkinci adım olan Faz II aşamasında ise atıksu ve çamur yönetimi bölümleri hakkında detaylı bir değerlendirme yapılmaktadır. Yazılım üzerinde atıksu arıtma tesisi 4 adımda incelenmektedir. Bunlar; 1) Toplama, 2) Arıtma, 3) Deşarj/Geri Kullanım, 4) Bertaraf/Geri Kullanım'dır.

Bu çalışma kapsamında; Faz-1'de Muratlı OSB A.A.T. ne bağlı bulunan firmaların herhangi bir terfilendirme işlemine tabii tutulmadığı ve gelen atıksu kendi cazibesiyile

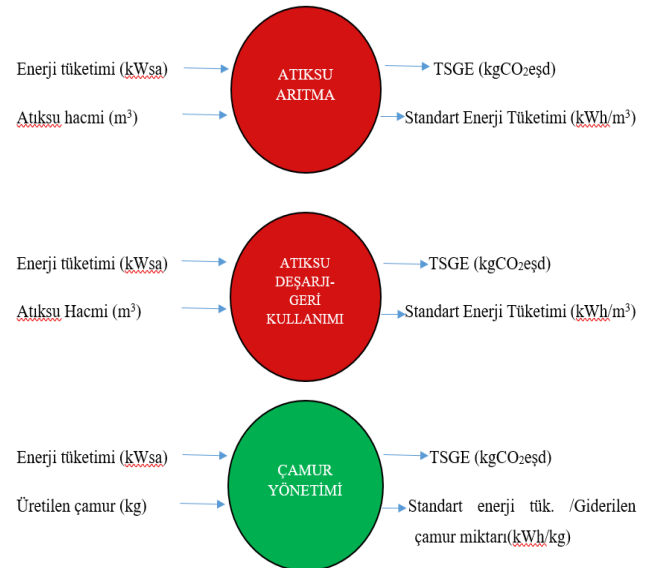
tesise giriş yaptığı için atıksu toplama adımı ihmal edilmiştir. Faz-2'de MOSB'ye yeni bağlanan tesislerin bağlı olduğu terfi istasyonu hesaplamaları ise atıksu arıtma bölümüne dahil edilmiştir.

İkinci adım olan arıtmada; ECAM modeli kentsel atıksu arıtma tesislerine yönelik tasarlandığı için BOI₅ parametresi kullanılmıştır. Enerji ve atıksu girdilerinin sağlanması ve arıtma tesisine ait kirlilik parametrelerinden BOI₅ yük verilerinin girilmesiyle BOI₅ kütle giderimi başına tüketilen enerji miktarı ve elektrik, işletme prosesi ve toplam sera gazı emisyonu hakkında çıktılar elde edilmiştir. Ancak arıtma tesisine ait BOI₅ verilerinin mevcut olmadığından dolayı tesisin BOI₅/KOI oranına üzerinden KOI verileri üzerinden BOI₅ yük verileri hesaplanmıştır.

Üçüncü adım olan deşarj/geri kullanımda ise; deşarj için tüketilen enerji miktarı, deşarj edilen atıksu miktarı, çıkış suyundaki toplam azot ve BOI₅ yükü girdileri sonucunda elektrik, toplam sera gazı emisyonu, deşarj edilen ve tekrar kullanılan atıksu için birim m³ başına düşen tüketimler hakkında detaylı bilgiler edinilmiştir. Arıtma tesisinde çıkış suyunun geri kullanımı, dekantörlerin çalışmasında gerekli olan kimyasalın çözelti olarak hazırlanması sırasında kullanılmaktadır.

Dördüncü adım olan çamur yönetiminde; Muratlı OSB A.A.T.'de çamur ünitesi sonucu son ürün olarak oluşan çamur keki, günlük olarak konteynerde toplanarak taşıma şirketine ait kamyon vasıtasıyla bertaraf edilmektedir. Çamur yönetimi adımında, çamur bertarafı için tüketilen enerji, atıksu miktarı ve toplam azot ve BOI₅ yük girdileri sonucunda bertaraftan kaynaklanan sera gazı emisyonu çıktıları elde edilmiştir.

ECAM Modeline ait girdi ve çıktılar Şekil 3'te özetlenmiştir.



Şekil 3. ECAM modelinde girdi ve çıktılar (TSGE: Toplam Sera Gazı Emisyonu)

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Debi ve atıksu karakteristikleri

Muratlı OSB Atıksu Arıtma Tesisi için farklı senaryolar üzerinde yaklaşım yapılmıştır. Birinci senaryoya göre veri akışının düzenli olarak sağlandığı 3 aylık zaman dilimi içerisinde, 2019 yılına ait Haziran, Temmuz ve Ağustos ayları için ECAM modeli kullanılarak doğrudan ve dolaylı sera gazı emisyonları tahmin edilmiş ve bu senaryo yaklaşımı Faz-1 olarak adlandırılmıştır. Aylık veriler sisteme girilerek seçilen her bir ay için sera gazı emisyon miktarları hesaplanmıştır. Çalışmada, Temmuz ayına ait verilerin ECAM model üzerinde kullanımına yönelik girdi ve çıktı hesaplamaları verilmiştir.

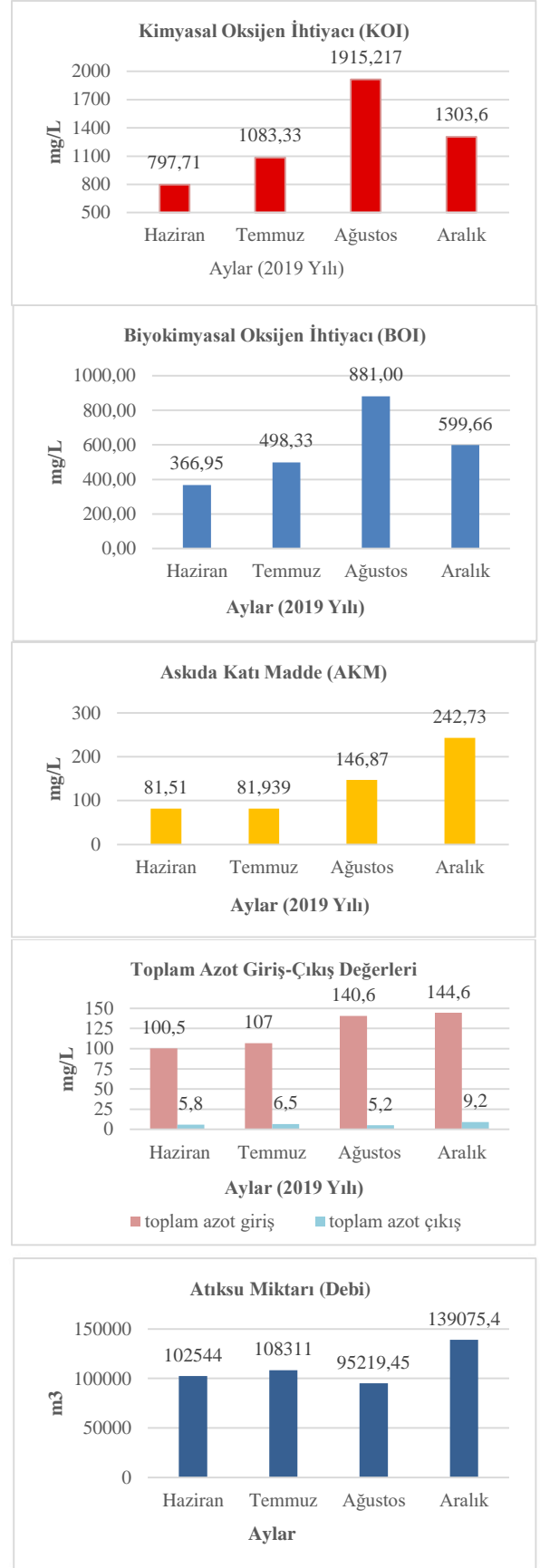
İkinci senaryoya göre, atıksu altyapı inşaat işlemlerinin tamamlanmasıyla atıksu arıtma tesisine 15 firma dahil edilmiştir. Toplamda 18 firmanın atıksuyunu verdiği 2019 yılına ait Aralık ayı üzerinde ECAM modeli uygulanmış ve sonuçların sera gazı emisyonunu ne şekilde etkilediği ve tahmin edilen miktarlar açısından nelerin değiştiği ile ilgili olarak yaklaşım sürdürülmüştür. Bu senaryoda kullanılan Aralık ayı verileri ve hesaplamaları Faz-2 olarak adlandırılmıştır. Faz-1 aşamasına göre değerlendirildiğinde, en yüksek kirlilik yüklerine Ağustos ayında rastlanılmıştır (Şekil 4). Faz-2 aşaması eklendiğinde, Faz-1 deki aylara göre kıyaslama yapıldığında AKM ile Toplam Azot kirlilik yüklerinde ve atıksu miktarında Aralık ayının en yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 4).

3.2 ECAM modeli sonuçları

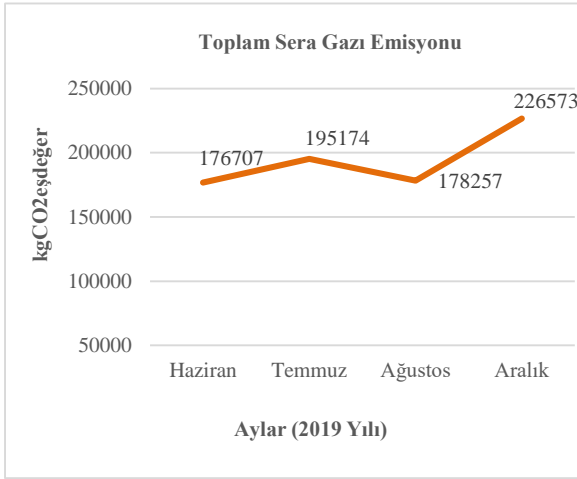
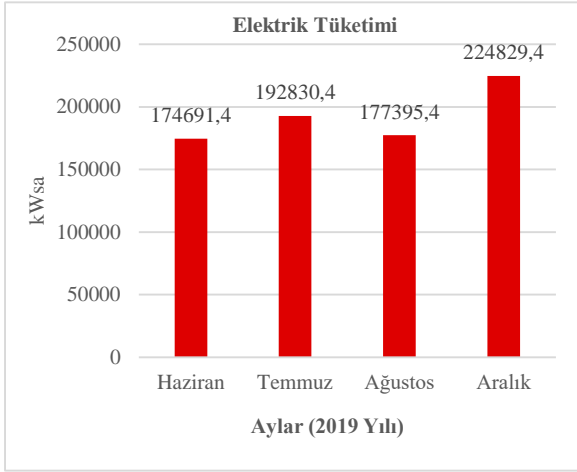
ECAM Model uygulamasında Haziran, Temmuz, Ağustos ve Aralık aylarındaki sera gazı emisyon tahmini yapılmıştır. Elektrik tüketiminin aylara göre dağılımına göre, 224.829,4 kWsa ile Aralık ayında en yüksek tüketim gerçekleşmiş; en düşük elektrik tüketiminin olduğu ay ise 174.691,4 ile Haziran ayı olmuştur (Şekil 5). Tahmin edilen toplam sera gazı emisyonu (TSGE) miktarlarına bakıldığında, 226.573 kgCO₂eşd. ile Aralık ayında en yüksek değer ve en düşük toplam sera gazı emisyonuna ise 176.707 kgCO₂eşd. ile Haziran ayında hesaplanmıştır (Şekil 5).

Çalışma alanına ait sera gazı emisyonu miktarları, ECAM programı ile bölümlere ayrılarak, bu bölümlerde oluşan direkt ve dolaylı sera gazı emisyonu miktarları hesaplanarak Tablo 1’de verilmiştir. Enerji tüketiminden oluşan sera gazı emisyonları dolaylı sera gazı emisyonları olarak adlandırılmaktadır. Arıtma tesisi işletme prosesi sonucu oluşanlar ise direkt sera gazı emisyonları olarak adlandırılmaktadır. Toplam sera gazı emisyonları, dolaylı ve direkt sera gazı emisyonlarının toplamına eşittir.

Faz-1’de Muratlı OSB A.A.T. sera gazı emisyonu değerlendirmesi yapılmış ve buna göre 2019 yılı yaz ayları kapsamında Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında tahmin edilen en yüksek emisyon miktarı, Temmuz ayına ait olduğu görülmüştür (Tablo 1). Faz-2’de altyapı hizmetlerinin tamamlanmasıyla atıksu arıtma tesisine firmalar bağlanmış olup, artan yük ve debi ile program ikinci kez çalıştırılmıştır. 2019 Aralık ayına ait veriler kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır.



Şekil 4. Aylara göre tesis işletme verileri



Şekil 5. 2019 yılına ait aylara göre elektrik tüketimi ve toplam sera gazı emisyonu dağılımı

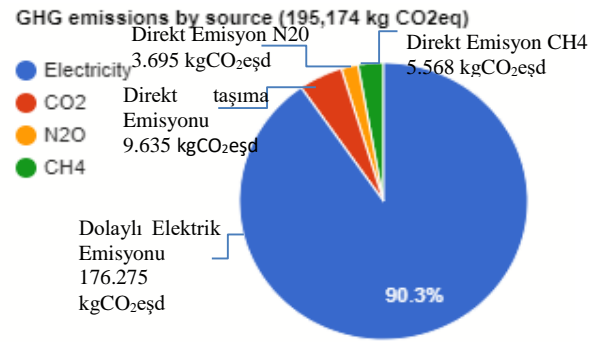
Tablo 1. Aylara göre direkt ve dolaylı sera gazı emisyonlarının (SGE) tahmini (Birim: kgCO₂eşd.)

ECAM tool hesaplama adimleri	SGE türü	FAZ-1				FAZ-2
		Haziran 2019	Temmuz 2019	Ağustos 2019	Aralık 2019	
Arıtma	Dolaylı SGE	142.913	157.577	145.254	185.797	
	Direkt SGE	1.674	1.769	1.506	2.271	
Deşarj/Geri Kullanım	Dolaylı SGE	8.310	9.349	8.310	8.830	
	Direkt SGE	6.488	7.326	6.162	11.586	
Çamur Yönetimi	Dolaylı SGE	8.310	9.349	8.310	8.830	
	Direkt SGE	8.714	9.804	8.714	9.259	
Toplam SGE		176.707	195.174	178.257	226.573	

Örnek hesaplama olarak, Temmuz ayına ait ECAM modelleme metoduyla yapılan hesaplamalar aşağıda verilmiştir.

3.3 FAZ-1 temmuz ayı genel sera gazı emisyonu değerlendirilmesi (A aşaması)

Yaz ayları verilerinin kullanıldığı Faz-1 aşamasına göre, atıksu arıtma tesisi için genel sera gazı değerlendirilmesinde; en yüksek sera gazı emisyonu 195,174 kgCO₂eş ile Temmuz 2019 ayı olduğu görülmüştür. Temmuz ayı değerlendirilmesinde; direkt emisyon kaynağı olan CH₄ miktarı %2.9 oranında 5,568 kgCO₂eş; diğer bir direkt emisyon kaynağı N₂O miktarı %1.9 oranında 3,695 kgCO₂eş; dolaylı emisyon kaynağı elektrik tüketiminden oluşan sera gazı emisyonu %90.3 oranında 176,275 kgCO₂eş; taşımadan kaynaklı oluşan CO₂ miktarı %4.9 oranında 9,635 kgCO₂eş ve toplam sera gazı emisyonu 195,174 kgCO₂eş olarak hesaplanmıştır (Şekil 6).



Şekil 6. Temmuz ayı direkt (N₂O ve CH₄) ve dolaylı (elektrik ve taşımadan kaynaklı CO₂) emisyon miktar dağılımı

3.4 FAZ-1 temmuz ayı sera gazı emisyonu değerlendirilmesi (B aşaması)

3.4.1 Arıtma bölümünden kaynaklanan sera gazı emisyonları

B aşaması atıksu adımı için gerekli girdiler Tablo 2'de verilmiştir:

Tablo 2. ECAM modelinde atıksu bölümü girdi verileri

Arıtma Girdiler	Temmuz	Birim
Şebekeden tüketilen enerji (wwt_nrg_cons)	182.030	kWsa
Hizmet edilen nüfus (wwt_serv_pop)	17.470	kişi
Artılmış atıksu hacmi (wwt_vol_trea)	108.311	m ³
CH ₄ emisyon faktörü (wwt_ch4_efac)	0	kgCH ₄ /kgBOI
BOI giriş yükü (wwt_bod_infl)	53.975	kg
BOI çıkış yükü (wwt_bod_effl)	2.721	kg
Çamurda giderilen BOI (wwt_bod_slud)	35.084	kg
Giderilen BOI ₅ kütlesi	51.254	kg

B aşaması atıksu bölümünde elde edilen çıktılar ve toplam sera gazı emisyonu Temmuz ayı için Tablo 3'te verilmiştir:

Tablo 3. ECAM modelinde atıksu bölümü çıktı verileri

Çıktılar -TSGE	Temmuz	Birim
Elektrik Emisyonu (wwt_KPI_GHG_elec)	157.577	kgCO ₂ eşd/ay
Aritma Prosesi Emisyonu (wwt_KPI_GHG_tre)	1.769	kgCO ₂ eşd/ay
Toplam Aritma Sera Gazı Emisyonu (wwt_KPI_GHG)	159.346	kgCO ₂ eşd/ay

Bu çalışmada, ECAM modeli üzerinde her bir ülkeye göre elektrik şebekesinden gelen elektrik tüketim değerleri için “Elektrik emisyon faktörü” belirlenmiştir. Türkiye için elektrik emisyon faktörü 0,87 kgCO₂/kWh’tir [9]. Buna göre, Temmuz ayına ait elektrik tüketiminden kaynaklanan dolaylı sera gazı emisyon hesapları aşağıda yer almaktadır:

3.4.1.1 Dolaylı sera gazı emisyonu hesapları – arıtma prosesi– elektrik emisyonu

Temmuz ayı arıtma prosesinde elektrikten kaynaklanan dolaylı sera gazı emisyonu **Denklem (1)**’den hesaplanarak 157.577 kgCO₂eşdeğer olarak tahmin edilmiştir.

$$\text{Elektrik emisyonu} = \text{Şebekeden tüketilen enerji} \times \text{Elektrik emisyon faktörü} \quad (1)$$

3.4.1.2 Direkt sera gazı emisyonu hesapları – arıtma prosesi – CH₄-N₂O emisyonları

Aritma prosesinde oluşan CH₄ emisyonu hesabı, biyolojik atıksu arıtma proseslerindeki CH₄ emisyon faktörü, arıtma türüne göre değişkenlik göstermektedir. **Tablo 4** e göre bu tesis için aktif çamur – iyi yönetilmiş seçeneği seçildiğinden dolayı 0 kgCH₄/kgBOI olarak alınmıştır.

Tablo 4. IPCC 2006’ya göre metan emisyon faktörleri [10]

Aritma türü	Metan Düzeltme Faktörü (MCF)	Emisyon Faktörü (EF)
Merkezi aerobik arıtma tesisi (iyi yönetilen)	0	0
Merkezi aerobik arıtma tesisi, küçük gözenekli havalı bölgeler	0.1	0.06
Merkezi aerobik arıtma tesisi, bazı havalı bölgeler ile	0.2	0.12
Merkezi aerobik arıtma tesisi (iyi yönetilmeyen)	0.3	0.18

Metan emisyonu hesabında, iyi yönetilen tesisler için metan emisyon faktörü 0 kgCH₄/kgBOI; metanın karbondioksit eşdeğeri olarak 34 alındığında, ECAM model denklemine kullanılarak 0 kgCO₂eşd olarak hesaplanmıştır.

Aritma prosesinde oluşan N₂O emisyonu hesabı; arıtmadan kaynaklanan nitroz oksit emisyonu hesabında, N₂O’nun karbondioksit eşdeğeri 298 kattır. Yani IPCC 5th

AR (2014/2013) CCF raporu küresel ısınma potansiyeli tablosuna göre 1 CO₂eşdeğeri, 298 N₂O’ya eşittir [11].

Model formülasyonunda kullanılarak arıtma prosesinde oluşan nitroz oksit emisyonu 1.769 kgCO₂eşd olarak hesaplanmıştır.

Aritma Prosesinde oluşan sera gazı emisyonu arıtma prosesinden kaynaklanan CH₄ emisyonu ve N₂O emisyonunun toplamına eşittir.

$$\text{Aritma prosesi sera gazı emisyonu} = \text{Aritma prosesindeki CH}_4 \text{ emisyonu} + \text{Aritma prosesindeki N}_2\text{O emisyonu} \quad (2)$$

Aritma prosesinde oluşan sera gazı emisyonu **Denklem (2)** kullanılarak 1.769 kgCO₂eşd olarak hesaplanmıştır.

3.4.1.3 Arıtmadan kaynaklı toplam sera gazı emisyonu

Arıtmadan kaynaklı toplam sera gazı emisyonu, arıtma için tüketilen enerjiden kaynaklanan dolaylı sera gazı emisyonu olan elektrik ve arıtmadan kaynaklanan CH₄ ve N₂O emisyonlarının toplamına eşittir. **Tablo 5**’te Temmuz ayına ait enerji performansı ve hizmet düzeyi faktörleri çıktıları verilmiştir:

$$\text{Toplam Sera Gazı Emisyonu} = \text{Dolaylı sera gazı emisyonu (Elektrik)} + \text{Direkt sera gazı emisyonu (CH}_4\text{+N}_2\text{O)} \quad (3)$$

Denklem (3) ile arıtma prosesinden kaynaklanan toplam sera gazı emisyonu 159.346 kgCO₂eşd olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5. Temmuz ayı enerji performansı ve hizmet düzeyi faktör çıktıları - arıtma prosesi

Çıktılar -Enerji Performansı ve Hizmet Düzeyi Faktörleri	Temmuz	Birim
Artılmış atıksu başına enerji tüketimi (wwt_KPI_nrg_per_m3)	1.68	kWha/m ³
BOİ5 kütle giderimi başına enerji tüketimi (wwt_KPI_nrg_per_kg)	3.55	kWha/kg
Günde kişi başına artılmış atıksu (wwt_SL_vol_pday)	200	L/hizmet edilen nüfusu/gün

3.4.2 Deşarj/ geri kullanım bölümünden kaynaklanan sera gazı emisyonu tahmini

Muratlı OSB A.A.T. için ECAM programında deşarj/geri kullanım bölümüne ait Temmuz ayı girdileri **Tablo 6**’da verilmiştir:

Deşarj/Geri kullanım bölümüne ait sera gazı emisyonu çıktıları **Tablo 7**’de gösterilmiştir:

Tablo 8’de deşarj/geri kullanım bölümüne ait enerji performansı ve hizmet düzeyi faktörleri çıktıları verilmiştir:

Tablo 6. ECAM model deşarj/geri kullanım bölümü girdi verileri

Deşarj	Temmuz	Birim
Girdiler		
Şebekeden tüketilen enerji (wwd_nrg_cons)	10.800	kWsa
Alıcı ortama deşarj edilen atıksu hacmi (wwd_vol_disc)	108.311	m ³
Çıkış BOI yükü (wwd_bod_effl)	2.721	kg
Çıkıştaki toplam azot konsantrasyonu (wwd_n2o_effl)	7	mg/L
CH4 emisyon faktörü (wwd_ch4_efac)	0,06	kgCH ₄ /kgBOI
Geri kullanılan çıkış suyu hacmi (wwd_vol_nonp)	200	m ³

Tablo 7. ECAM model deşarj/geri kullanım bölümü çıktı verileri

Çıktılar - TSGE	Temmuz	Birim
Elektrik Emisyonu (wwd_KPI_GHG_elec)	9.349	kgCO ₂ eşd/ay
Deşarj atıksuyu sera gazı Emisyonu(wwd_KPI_GHG_tre)	7.326	kgCO ₂ eşd/ay
Toplam GHG Deşarj/Geri kullanılan atıksu Emisyonu (wwd_KPI_GHG)	16.675	kgCO ₂ eşd/ay

Tablo 8. Temmuz ayı enerji performansı ve hizmet düzeyi faktör çıktıları -deşarj bölümü

Çıktılar - Enerji Performansı ve Hizmet düzeyi faktörleri	Temmuz	Birim
Deşarj edilen atıksu başına enerji tüketimi (wwd_KPI_nrg_per_m3)	0,1	kWsa/m ³
Toplam deşarj/geri kullanılan atıksu sera gazı emisyonu (wwd_total_m3)	108.311	m ³

3.4.2.1 Dolaylı sera gazı emisyonları - atıksu deşarj/geri kullanım – elektrik emisyonu

Atıksu deşarj/Geri kullanım bölümünden kaynaklanan dolaylı sera gazı emisyonları **Denklem (4)** kullanılarak 9.349 kgCO₂eşd olarak tahmin edilmiştir.

$$\text{Elektrik Emisyonu} = \text{Şebekeden tüketilen enerji} \times \text{Elektrik emisyon faktörü} \quad (4)$$

3.4.2.2 Direkt sera gazı emisyon hesapları – atıksu deşarj/geri kullanımını prosesi - CH₄-N₂O emisyonları

Atıksu deşarj/geri kullanımdan kaynaklanan N₂O emisyon hesabında, N₂O'in CO₂ eşdeğeri 298 olduğundan model denklem hesaplaması sonucu 1.775 kgCO₂eşdeğer N₂O emisyonu oluştuğu hesaplanmıştır.

Atıksu deşarj/geri kullanımdan kaynaklanan CH₄ emisyon hesabında, CH₄'ün CO₂ eşdeğeri 34 olarak alındığında, model denklemi sonucunda 5.551 kgCO₂eşd emisyon oluştuğu tahmin edilmiştir.

Toplam atıksu deşarjından kaynaklanan direkt sera gazı emisyonları, atıksu deşarj/geri kullanımından kaynaklanan

N₂O ve CH₄ emisyonlarının toplamına eşit olduğundan dolayı 7.326 kgCO₂eşd olarak tahmin edilmiştir.

3.4.2.3 Atıksu deşarj/geri kullanımdan kaynaklanan toplam sera gazı emisyonu

2019 yılı Temmuz ayında atıksu deşarj/geri kullanımdan meydana gelen sera gazı emisyonları, bu bölüm için kullanılan elektrik tüketiminden oluşan emisyonlar ve N₂O, CH₄ emisyonlarının toplamına eşittir.

Toplam Sera Gazı Emisyonu =Dolaylı sera gazı emisyonu (Elektrik) + Direkt sera gazı emisyonu (5) (Deşarj/Geri kullanımdan kaynaklanan toplam emisyon)

Denklem (5) ile 16.675 kgCO₂eşd atıksu deşarj/geri kullanım bölümünden kaynaklanan toplam sera gazı emisyonu hesaplanmıştır.

3.4.3 Çamur yönetiminden kaynaklanan sera gazı emisyon tahmini

Çamur yönetimi bölümünde çamurun bertaraf edilmesi için kullanılan veriler "**Tablo 9**"da verilmiştir:

Tablo 9. ECAM model çamur yönetimi bölümü girdi verileri

Bertaraf-Girdiler	Temmuz	Birim
Şebekeden tüketilen enerji (fsr_nrg_cons)	10.800	kWsa
Yakıt türü (fsr_trck_typ)	Dizel	
Tüketilen yakıt miktarı (fsr_vol_trck)	3.600	L

Temmuz ayına ait çamur yönetimi bölümünde tahmin edilen sera gazı emisyon miktarları **Tablo 10**'da verilmiştir:

Tablo 10. ECAM model çamur yönetimi bölümü çıktı verileri

Çıktılar - TSGE	Temmuz	Birim
Elektrik emisyonu (fsr_KPI_GHG_elec)	9.349	kgCO ₂ eşd/ay
Taşıma emisyonu (fsr_KPI_GHG_trck)	9.804	kgCO ₂ eşd/ay
Toplam çamur bertarafı sera gazı emisyonu (fsr_KPI_GHG)	19.153	kgCO ₂ eşd/ay

3.4.3.1 Dolaylı sera gazı emisyonları – bertaraf -elektrik emisyonu

Bu aşamada meydana gelen dolaylı sera gazı emisyonları, aylık şebekeden tüketilen enerji ile Türkiye için belirlenen elektrik emisyon faktörünün çarpımı sonucunda elde edilen değerlerdir.

Denklem (6) ile Temmuz ayında 9.349 kgCO₂eşd bertaraf bölümünden kaynaklı dolaylı sera gazı emisyonları tahmin edilmiştir.

$$\text{Elektrik emisyonu} = \text{Çamur ünitesinde tüketilen enerji} \times \text{Elektrik emisyon faktörü} \quad (6)$$

3.4.3.2 Direkt sera gazı emisyonu hesapları- taşıma emisyonları

ECAM modelinde 3 tipte yakıt türü seçeneği bulunmaktadır. Çalışmada, bertaraf için kullanılan taşıtlarda kullanılan yakıt türü dizel tipidir.

Tablo 11. IPCC, (2006) yakıt türü tablosuna göre [12];

Dizel yakıt türü için;

CO ₂ emisyon faktörü (EFCO ₂)	74.100 kgCO ₂ /TJ
Net kalorifik değeri (fuel.NCV)	43 TJ/Gg
Yakıt yoğunluğu (fuel.FD)	0.84 kg/L
Araçlar için N ₂ O emisyon faktörü (fuel.EFN ₂ O.vehicles)	3.9 kgN ₂ O/TJ
Araçlar için CH ₄ emisyon faktörü (fuel.EFCH ₄ .vehicles)	3.9 kgCH ₄ /TJ
Nitroz oksit CO ₂ eşdeğeri	298 kgCO ₂ eşdeğer/ kgN ₂ O
Metan CO ₂ eşdeğeri	34 kgCO ₂ eşdeğer/ kgCH ₄
Haziran ayı tüketilen yakıt miktarı	3.6 m ³

Taşımadan kaynaklı CO₂ emisyonu, Tablo 11’de verilen dönüşüm katsayıları kullanılarak yakıt miktarı ile CO₂ emisyon faktörü çarpımı sonucu 9.635 kgCO₂eşd olarak bulunmuştur. Tablo 11’de verilen dönüşüm katsayıları kullanılarak ECAM model denklemlerinde sırasıyla taşımadan kaynaklanan N₂O ve CH₄ emisyonu; 151,1 kgCO₂eşd ve 17,24 kgCO₂eşd olarak tahmin edilmiştir.

Taşımadan kaynaklanan toplam sera gazı emisyonu, CO₂, N₂O ve CH₄ emisyonlarının toplamına eşit olduğundan 9.804 kgCO₂eşd olarak bulunmuştur.

3.4.3.3 Çamur yönetiminden kaynaklanan toplam sera gazı emisyonu

Denklem (7) ile bertaraf bölümünden Temmuz ayında 19.153 kgCO₂eşd toplam sera gazı emisyonu oluştuğu tahmin edilmiştir.

$$\text{Toplam sera gazı emisyonu} = \text{Dolaylı sera gazı emisyonu (elektrik)} + \text{Direkt sera gazı emisyonu (taşıma kaynaklı toplam emisyon)} \quad (7)$$

4 Tartışma

Literatürde benzer çalışmalar incelendiğinde, Fighir, Teodosiu, Fiore (2019)’da yaptıkları bir çalışmada, Kentsel Atıksu Arıtma Tesislerinden kaynaklanan sera gazı emisyonu değerlendirmesinde ECAM programını kullanarak 4 farklı tesis incelenmişlerdir. Bu tesislerden ikisi İtalya’da, diğer ikisi ise Romanya’da bulunmaktadır. Yapılan çalışmada, tesislerin toplam sera gazı emisyon miktarları A (İtalya-1) tesisinde 25,41 kgCO₂/yıl/nüfus.; B (İtalya-2) tesisinde 26,81 kgCO₂/yıl/nüfus.; C (Romanya-1) tesisinde 64,32 kgCO₂/yıl/nüfus ve D (Romanya-2) tesisinde 68,36 kgCO₂/yıl/nüfus olarak tahmin edilmiştir. Sera gazı emisyon miktarlarına bakıldığında ülkelerin elektrik emisyon faktörünün düşük olduğu İtalya’da sera gazı emisyon miktarları da Romanya’daki kentsel atıksu arıtma tesislerine göre daha düşük olduğu görülmüştür [13]. Bu çalışma ile kıyaslandığında, elektrik emisyon faktörü bakımından İtalya

ve Romanya ülkeleri arasında kalan Türkiye için elektrik emisyon faktörünün 0,86 kgCO₂/kWh olduğu ele alınarak ECAM modellemesi sonuçlarında, Faz-1 aşamasında en yüksek sera gazı emisyonu Temmuz ayı 195.174 kgCO₂eşd./ay; Faz-2 aşamasında ise en yüksek sera gazı emisyonu Aralık ayı 226.573 kgCO₂eşd./ay olarak tahmin edilmiştir. Tahmin edilen sonuçlara göre karışık atıksuların arıtıldığı arıtma tesisindeki sera gazı emisyonları, İtalya ve Romanya’da bulunan kentsel atıksu arıtma tesislerinden oldukça fazladır.

Saidan vd. (2019), Ürdün’ün Madaba kentinde yaptıkları çalışmada kentin su tesisleri için ECAM programı ile genel bir sera gazı emisyonu değerlendirmesi yapmışlardır. Çalışmada kentsel su arıtma tesislerinden kaynaklanan doğrudan ve dolaylı sera gazı emisyonlarının azaltılması amaçlanmıştır. Çalışma alanı olan Madaba’daki giriş suyu ve atıksuyu sistemlerinden kaynaklanan toplam sera gazı emisyonu yaklaşık yılda 28.122 milyon kgCO₂ bulunmuştur. Emisyonların %62,4’ünün su kaynaklarından, %37,6’sı atıksu arıtımından ve septik tanklardan taşınan atıksulardan oluştuğu belirtilmiştir [14]. Bu çalışma bulguları ile karşılaştırıldığında, sera gazı emisyonlarının yaklaşık %90’ı elektrik enerjisinden; geri kalanı ise çamur bertarafı ve suyun geri kullanımından kaynaklanmaktadır.

De Gisi vd. (2017), kentsel atıksu arıtma tesisine ait çamur yakmadan oluşan sera gazı emisyonlarını incelemişlerdir. Çalışmada birincil ve ikincil çamur yönetimi, anaerobik çürütme, çamurun mekanik olarak susuzlaştırılarak gömülmesi ve enerji geri kazanımı ile akışkan yatak teknolojisine sahip çamur yakma yöntemini içeren sera gazı emisyonlarını ECAM 2.0 programıyla değerlendirmişlerdir. Ek yakıt tüketiminin azaltılması için konvansiyonel yakma yöntemi yerine, entegre termal çamur arıtımı (kurutma + yakma) uygulanması sonucunda %98 oranında sera gazı emisyonu azalmış olacağı tahmin edilmiştir [15]. Bu çalışma ile karşılaştırıldığında, Muratlı O.S.B A.A.T’nde sadece çamur susuzlaştırma yöntemi olarak dekantör kullanılmakta olup, kamyon vasıtasıyla bertaraf yöntemi uygulanmaktadır. Enerji tüketiminden sonra emisyonuna sebep olan kısmın, çamur yönetimine ait olduğu tahmin edilmiştir.

Ülkemizde ECAM modeli ile yayınlanmış çalışma bulunmamaktadır. Ancak literatürde arıtma tesislerinin maliyet hesaplarında kullanılmış modellere göre sera gazı emisyon sonuçları aşağıda özetlenmiştir. Gülhan vd. (2018)’de yaptıkları çalışmada İstanbul’da bulunan 9 adet biyolojik atıksu arıtma tesisinin General Purpose Simulator (GPS-X) sürüm 6.5 model programıyla sera gazı emisyonlarını hesaplamış, atıksu karakterizasyonu ve işletim prosesinin sera gazı emisyonu üzerine etkileri incelemişlerdir. Program sonuçlarına göre CH₄ gazı emisyonu 45.497 tCO₂ eşd/yıl ve net N₂O gazı emisyonu 697.942 tCO₂ eşd/yıl olarak tahmin edilmiştir. Çamurdan enerji elde edilen dört tesiste, fosil yakıt tasarrufu ile kazanılan CO₂ emisyonu miktarı 46.257 tCO₂/yıl’dır. Dokuz tesisin toplam sera gazı emisyonu ise 697.182 tCO₂eşd/yıl’dır. İşletme prosesinin sera gazı emisyonunu belirleyici faktör olduğu görülmüştür [16]. Literatürdeki çalışmada kullanılan 4 tesiste biyogaz üretimi yapılmaktadır.

Biyogaz üretimi yapılan tesislerde kaçak emisyonları arttırdığı tespit edilmiştir. Bu çalışmada, çamur bertarafında taşımadan kaynaklı toplam emisyonlar en fazla 19.153 kgCO₂eşd/ay ve yılda yaklaşık 229 bin kgCO₂eşd. olarak tahmin edilmiş olup, literatürde verilen çalışma verilerinden daha düşüktür.

Yapıcıoğlu (2018)'de yaptığı bir çalışmada, biri evsel diğeri endüstriyel olmak üzere iki A.A.T.'ne ait sera gazı emisyonu değerlendirmesi yapmıştır. Tesislerden kaynaklanan sera gazı emisyonlarını hesaplamak için kapalı çember metodu ve tesislerdeki sistem optimizasyonunu sağlamak için de Monte Carlo simülasyonu olmak üzere iki farklı yöntem kullanılmıştır. Çalışmada evsel A.A.T.'nde en yüksek emisyon miktarı 23.328 kg CO₂eşd/gün; endüstriyel nitelikli atıksuyu olan Şanlıurfa Organize Sanayi Bölgesi Merkezi Atıksu Arıtma Tesisinde ise 977,76 kg CO₂eşd/gün olarak hesaplanmıştır [14]. Bu çalışmada, 5.000 m³/gün debi için tahmin edilen emisyon miktarları, Yapıcıoğlu vd [17] çalışmasında incelenen 17.000 m³ ve 4.000 m³ kapasiteli tesislerde oluşan emisyon miktarları arasında yer almıştır.

Külah (2013), İzmir'de bulunan bir gıda firmasına ait endüstriyel atıksu arıtma tesisinin sera gazı emisyonu değerlendirmiştir. Sera gazı emisyonu hesaplamak için ISO14064-I standartlarına göre Sera Gazı Protokolü seçilmiştir. Sonuçlarına göre, 2.178,35 ton/yıl doğrudan sera gazı emisyonu; elektrik kullanımından kaynaklı 903,37 ton/yıl ile dolaylı sera gazı emisyonları hesaplanmış [18] olup, bu çalışmadaki ECAM modeliyle hesaplanan sera gazı emisyonları sonuçları ile benzerlik göstermektedir.

4.1 Karbon salınımlarının azaltılması için öneriler

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılmasıyla elektrik enerjisi geri kazanımı sağlayabilir, işletme maliyetleri indirgenerek sera gazı emisyonları bu yöntemle azaltılabilir.

Bölge içerisinde çamur yönetiminin yetersiz olması sebebiyle, taşımadan kaynaklı emisyonları azaltmak ve bertarafı sağlamak amacıyla çamur yakma sistemleri kurulabilir. Ancak yüksek yatırım maliyetleri sebebiyle tercih edilememektedir.

Ayrıca, düşük maliyetli ve uygulanabilirliği en basit karbon azaltma yöntemi ağaçlandırma çalışmalarıdır. Arıtma tesisi için ön görülen sera gazı emisyonu azaltma için ağaçlandırma hesapları yapıldığında bir yılda tahmini CO₂ emilimini sağlamak için gerekli ağaç maliyeti 131.064 TL olmaktadır.

5 Sonuçlar

Bu çalışmada, WaCCliM organizasyonu tarafından geliştirilen ECAM v2.2 web tool programı ile Muratlı OSB A.A.T.'ne ait genel sera gazı emisyonu değerlendirmesi yapılmış olup, optimizasyon ve sera gazı emisyonlarının azaltılması yönünde çeşitli öneriler sunulmuştur. Yapılan bu çalışma, atıksu arıtma tesisinde elektrik enerjisi tüketimi ve çamur yönetimi bölümlerinden kaynaklı sera gazı emisyonu oluşumunu sergilemektedir.

Faz-1'e göre ilk senaryoda 3 firmanın bağlı bulunduğu Muratlı OSB A.A.T.'de 2019 yılına ait yaz ayları (Haziran, Temmuz ve Ağustos) verileri kullanılarak çalıştırılan ECAM program veri sonuçlarına göre, en yüksek sera gazı emisyonu

195.174 kgCO₂eşdeğer/ay ile Temmuz ayında; en düşük sera gazı emisyonu ise 176.707 kgCO₂eşdeğer/ay ile Haziran ayında olduğu tahmin edilmiştir.

Faz-2'de toplamda 18 firmanın bağlı olduğu Aralık ayında atıksu miktarının artmasıyla sera gazı emisyonlarını arttırıcı etki gösterdiği ortaya çıkmıştır. Kirlilik parametrelerinin sera gazı emisyonunu etkilediği ancak doğru orantılı olduğuyla ilgili bir şey söylenememektedir.

Bölgesel çamur bertaraf tesislerinin yetersizliğinden dolayı uzak mesafeli ve düşük maliyetli bertaraf tesisleri seçilmekte olup, taşımacılıktan kaynaklanan emisyonlar yüksek hesaplanmaktadır. Bir diğer önemli emisyon kaynağı elektrik enerjisi tüketimidir. Projelendirme hataları sonucu güçlü ekipmanların tükettiği enerji dolayısıyla yüksek işletme maliyetleri oluşturduğundan dolayı emisyonlara neden olmaktadır.

Atıksu arıtma tesislerinde enerji verimliliğini arttırıcı ve emisyonları azaltıcı öneriler sırasıyla sunulmuştur. Rüzgar enerjisi, güneş enerjisi, biyokütle enerjisi gibi temiz enerji kaynaklarının kullanımı ve ağaçlandırma çalışmaları sera gazı emisyonu azaltımında düşük maliyetli yatırımlardır. Çamur bertarafı taşımacılığında, fosil yakıt kullanımı ve miktarından kaynaklanan sera gazı emisyonunda yakıt türünün değiştirilmesiyle emisyonlar indirgenebilir. Çamur kurutma gibi nihai bertaraf yöntemlerinin atıksu arıtma tesislerinde kullanımının yaygınlaştırılmasıyla enerji kazanımı artırılarak aynı zamanda sera gazı emisyonu miktarları düşürülebilir.

Teşekkür

İşyerim olan ve bana bu çalışmayı yapmama izin veren Muratlı Organize Sanayi Bölge Müdürlüğü yetkililerine ve Atıksu Arıtma Tesisindeki yetkililere ve çalışma arkadaşlarıma katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %13

Kaynaklar

- [1] DSİ Genel Müdürlüğü, Etüd ve Plan Dairesi Başkanlığı, İklim Değişikliği Birimi İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi, Kyoto Protokolü ve Türkiye. http://www.dsi.gov.tr/iklim/sozlesmeler/cerceve_sozle_sme_kyoto/iklim_degisikligi_cerceve_sozlesmesi_ve_turkiye.pdf. Erişim 30.03.2021
- [2] Elektrik Mühendisleri Odası, Tarımda Karbon Ayak İzi Sürdürülebilir Kalkınmanın Yeni Kuralı: Karbon Ayak İzi. https://www.emo.org.tr/ekler/49c17cab08ed10e_ek.pdf. Erişim 12.05.2021
- [3] M. Öztürk ve A. Öztürk, BMİDÇS'den Paris Anlaşması'na: Birleşmiş Milletler'in iklim değişikliğiyle mücadele çabaları. Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 12(4), 527-541, 2019. <https://doi.org/10.25287/ohuiibf.494667>
- [4] Resmi Gazete Sayısı:29003, Sera Gazı Emisyonlarının Takibi Hakkında Yönetmelik, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara, 2014.

- [5] S. Eggleston, L. Buendia, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Emissions Inventories. Institute for Global Environmental Strategies, Japonya, 2006.
- [6] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2007: the physical science basis, contribution of working group I to the fourth assessment. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4_wg1_full_report-1.pdf. Erişim 05.01.2021
- [7] Muratlı Organize Sanayi Bölgesi. <https://www.muratliosb.org/kurumsal/>. Erişim 06.01.2021
- [8] International Water Association. <https://iwa-network.org/about-us/>. Erişim 06.01.2021
- [9] M. Brander, A. Sood, C. Wylie, A. Haughton, J. Lovell, Electricity-specific emission factors for grid electricity. Technical Paper, August 2011.
- [10] Water and Wastewater Companies for Climate Mitigation, Ecam 2.2. methodology energy performance and carbon emissions assessment and monitoring tool. <https://wacclim.org/wp-content/uploads/2018/01/ECAM-Methodology-Guide-Jan-2019.pdf>. Erişim 17.01.2021
- [11] S. Eggleston, L. Buendia, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Emissions Inventories. Institute for Global Environmental Strategies, Japonya, 2006.
- [12] S. Eggleston, L. Buendia, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Emissions Inventories. Institute for Global Environmental Strategies, Japonya, 2006.
- [13] D. Fighir, C. Teodosiu, S. Fiore, Environmental and energy assessment of municipal wastewater treatment plants in Italy and Romania: a comparative study. *Water*, 11, 1611, 2019. <https://doi.org/10.3390/w11081611>.
- [14] M. Saidan, H. J. Khasawneh., H. Aboelgna, S. Meric, I. Kalavrouziotis, A.H. Jasem., B.O. Hayek, S. Al-Momany, M. Al Malla, J.C. Porro, Baseline carbon emission assessment in water utilities in Jordan using ecam tool. *Journal of Water Supply: Research and Technology -AQUA*. 68.6, 2019. <https://doi:10.2166/aqua.2019.040>
- [15] S. De Gisi, A. Gherghel, G. Iannone, M. Notarnicola, C. Teodosiu, Evaluating the greenhouse gas emissions of a municipal wastewater treatment plant with sludge incineration. *Polytechnic University of Bari - Gheorghie Asachi Technical University of Iasi*, 2017.
- [16] H. Gülhan, H. Özgün, M.E. Erşahin, R.K. Dereli, İ. Öztürk, İstanbul'daki biyolojik atıksu arıtma tesislerinin sera gazı emisyonunun modelleme metodu ile tahmini. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilim Dergisi*, 30(1), 59-67, 2018. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/433459>
- [17] P. Yapıcıoğlu, Atıksu arıtma tesislerinin sera gazı emisyonlarının minimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2018.
- [18] S. Külah, Greenhouse gas inventory for an industrial wastewater treatment plant. Master's Thesis, Dokuz Eylül University Graduated School of Natural and Applied Sciences, Turkey, 2013.





SBR sisteminin antibiyotik (tetrasiklin/klortetrasiklin) ve ağrı kesici (parasetamol) etkisinde nitrifikasyon ve denitrifikasyon performansının belirlenmesi

Determination of nitrification and denitrification performance in antibiotic (tetracycline/chlortetracycline) and pain relief (paracetamol) effect in the SBR system

Aytekin Çelik^{1,*} 

¹ Fırat Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 23000, Elazığ, Türkiye

Özet

Antibiyotikler ve ağrı kesiciler diğer farmasötikler gibi sucul ortamda biyolojik yaşama olumsuz yönde etki etmektedir. Bu amaçla bu tür kirleticilerin sucul veya buldukları ortamdaki giderilmesi önem arz etmektedir. Bu çalışmada, tetrasiklin/parasetamol ve klortetrasiklin /parasetamol ikilisinin SBR prosesine eş zamanlı verilmesi ile nitrifikasyon ve denitrifikasyon üzerine ne gibi etkileri olduğu araştırılmıştır. Çalışmada iki ayrı reaktör kullanılmıştır, ve toplam da 9 periyot uygulanarak yürütülmüştür. Tetrasiklin/parasetamol ve klortetrasiklin /parasetamol varlığında nitrifikasyon en çok 6. şartta etkilenmiş olup, nitrifikasyon verimi %33 civarında tespit edilmiştir. Aynı şekilde 6. şarttaki NO₂-N birikimi de diğer şartlara göre çok yüksek olup, 8.5mg/L civarında gözlenmiştir. Tetrasiklin/parasetamol ve klortetrasiklin/parasetamol varlığında denitrifikasyon ise en çok 9. şartta etkilenmiş olup, bu şartta %1 civarında denitrifikasyon verimi elde edilmiştir. Sonuç olarak, Tetrasiklin/parasetamol ve klortetrasiklin/parasetamol ikilisi altındaki nitrifikasyon ve denitrifikasyon verimi, düşük hidrolik alıkonma sürelerinde ve 100 mg/L üzeri TC/PCT ve CTC/PCT konsantrasyonlarında nitriye ve denitriye bakterilerine olumsuz yönde etki ettiği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Denitrifikasyon, Nitrifikasyon, Parasetamol, Tetrasiklin

1 Giriş

Yaygın bir analjezik ve antipiretik ilaç olan PCT [1], birçok ilacın hammaddesi olarak yaygın bir kullanıma sahiptir. Başka bir deyişle, PCT (N-asetil-4-amino-fenol), yetişkinlerde ve çocuklarda baş ağrısı, artralji, kanserden kronik ağrı ve ateş tedavisinde yaygın olarak kullanılan bir asillenmiş aromatik amiddir [2]. İyi bir ağrı kesici olmasının yanı sıra, kahverengi ağaç yılanlarını kontrol etmek ve insanlarda hepatoksisiteye neden olmak için belirli bir miktar PCT de kullanılabilir. Çevrede çok sayıda organizma olduğundan ve her organizmanın farklı hassasiyetleri olduğundan, farmasötikler çevre için risk faktörleri olarak nitelendirilebilir [1].

Abstract

Antibiotics and painkillers, like other pharmaceuticals, negatively affect biological life in the aquatic environment. For this purpose, it is important to remove such pollutants from their aquatic or environment. In this study, the effects of tetracycline/paracetamol and chlortetracycline /paracetamol on nitrification and denitrification were investigated by simultaneously giving to the SBR process. Two separate reactors were used in the study and a total of 9 periods were applied. In the presence of tetracycline/paracetamol and chlortetracycline/paracetamol, nitrification was most affected under the 6th condition and nitrification efficiency was determined around 33%. Likewise, the NO₂-N accumulation in the 6th condition is very high compared to other conditions and has been observed around 8.5mg/L. Denitrification in the presence of tetracycline/paracetamol and chlortetracycline/paracetamol was most affected in the 9th condition and denitrification efficiency of around 1% was achieved in this condition. As a result, nitrification and denitrification efficiency under tetracycline/paracetamol and chlortetracycline/paracetamol were found to adversely affect nitrification and denitrification bacteria during low hydraulic detention times and concentrations of TC/PCT and CTC/PCT above 100 mg/L.

Keywords: Denitrification, Nitrification, Paracetamol, Tetracycline

Geniş spektrumlu bir antibakteriyel ilaç olarak tetrasiklin (TC), antibakteriyel ve düşük maliyetli avantajları nedeniyle insan ve hayvan hastalıklarının önlenmesi ve tedavisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [3]. Bununla birlikte, sadece insan veya hayvan vücutlarına alınan TC miktarı az miktarda metabolize edilir ve ayrışır ve kalan TC tortuları, ham ilaçlar veya metabolitler olarak su ortamına salınır ve sürekli olarak su kütlesinde birikir [4, 5].

Kullanım ömrünü tamamlamış antibiyotiklerin çöp kutusu, tuvalet veya lavabolara dökülmesiyle, ağız yoluyla alınan antibiyotiklerin ise büyük kısmının bağırsaklarda emilmeden doğrudan dışkı ile kanalizasyona, buradan da yeraltı ve yerüstü sularına karışması, sucul veya karıştığı ortam canlılarının yaşam kalitesini tehdit etmektedir.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: aytekincelik@firat.edu.tr (A.Çelik)

Geliş / Received: 16.09.2020 Kabul / Accepted: 25.06.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021

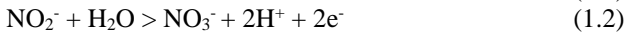
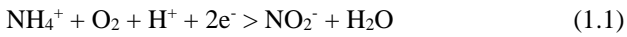
doi: 10.28948/ngumuh.795716

İlaveten, günümüzde antibiyotikler, tavuk ve balık başta olmak üzere, hayvanların büyümelerinin hızlandırılmasında da kullanılmaktadır [6]. Örneğin; Sülfonamidler, biyolojik bozulmaya dirençlidirler ve uzun süre doğada kalabilirler. Topraktaki emilimlerinin düşük olması sebebiyle de yeraltı sularına veya diğer kaynaklara hızlıca ulaşabilirler. Çevreye salındığında sudaki çözünürlüğünün yüksek olması sebebiyle de kolayca yüzey sularına ulaşabilirler [7].

Tetrasiklinler (TC) birçok bakteriyal enfeksiyonun tedavisi için önemli farmasötik antibiyotikler olup, hayvan hastalıklarını tedavi etmek ve hayvanların büyümelerini hızlandırmak için hayvansal gıdalara eklenebilmektedir. Hayvansal dışkıların bitkiler için gübre olarak kullanılması nedeniyle de toprağa veya su ortamına karışabilmekte, bu da antibiyotiğe dirençli bakterilere ve TC'den daha yüksek kirletici özelliğindeki yeni kirletici bileşikler oluşumuna neden olabilmektedir [8].

Nitrifikasyon, amonyağın nitrite, nitritin de nitrate aerobik oksidasyonu ile olan azot (N) döngü işlemidir. [9] Nitrat (NO₃⁻) en yaygın su kirleticilerinden biridir ve dünyanın birçok bölgesinde ciddi bir çevresel kaygıdır[10]. Son yıllarda, Amerikan ve Avrupa nehirlerindeki nitrat konsantrasyonları önemli ölçüde artmış ve 100 yıl öncesine göre 15 kat daha yüksek konsantrasyonlara ulaşmıştır [11]. Biyolojik denitrifikasyon, sınırlı miktarda enerji ve kimyasallar gerektirdiği için iyon değişimi, adsorpsiyon ve ters ozmoz gibi fiziko kimyasal işlemlerden daha uygun maliyetli ve çevre dostu bir nitrat oluşturma yöntemidir. Diğer yandan, denitrifikasyon mikroorganizmaları kirlenmiş suyun fiziksel ve kimyasal parametrelerine karşı çok hassastır. Bununla birlikte, biyolojik denitrifikasyon, nitratça zengin çeşitli endüstriyel atıksuların arıtılması için yaygın olarak kullanılmaktadır [12].

Nitrifikasyonun ilk kademesinde AOB'ler Eşitlik (1.1)'e göre NH₄⁺'ü NO₂⁻'ye, İkinci kademede ise NOB'ler nitrit oksidoredüktaz enzimi yardımıyla oksijen varlığında NO₂⁻'nin NO₃⁻'e (Eşitlik 1.2) oksidasyonunu sağlarlar [13];



Ardışık kesikli reaktör (SBR), bir dizi doldurma ve çekme çevrimi üzerinde çalışan, aktif çamur esaslı atık su arıtma sistemlerine verilen addir. Bir SBR'de yer alan birim işlemler, geleneksel aktif çamur sistemlerine eşdeğerdir. Bu nedenle havalandırma ve sedimentasyon-berraklaştırma yapılır. Sistemler arasındaki fark, geleneksel sistemlerde, bu iki işlemin iki farklı tankta gerçekleşmesi, SBR sistemlerinde ise aynı tankta sırayla gerçekleşmeleridir[14]. Bu kesikli sistemlerin avantajlarından biri, kirletici konsantrasyonlarının sürekli değişimleri için kolaylıkla uyarlanabilmeleridir [15].

Ardışık Kesikli Reaktör (SBR), organik karbon ve nütrient gideriminde en yaygın kullanılan reaktördür. SBR'de uygulanan kolay ve esnek işletimde %90'dan fazla toplam azot giderimi, %25 havalandırma maliyeti tasarrufu, yüksek çamur yaşı ile az, spesifik ve iyi çökelen çamur oluşumu elde edilir [16].

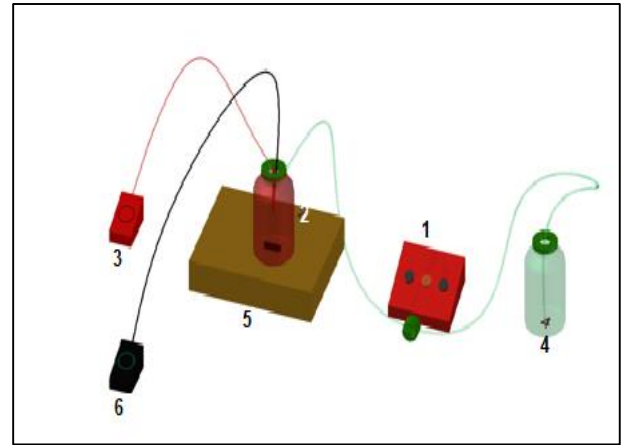
TC ve PCT'nin özellikleri ve çevresel su ortamında etkileri yukarıda ifade edilmiştir. Literatürde TC/PCT ve CTC/PCT ikililerinin nitrifiye ve denitrifiye bakterileri üzerine toksik etki oluşturma hakkında çalışma bulunmamaktadır. Malumdur ki bu iki ilaç türü sucul çevrede birlikte bulunma durumları çok geneldir.

Bu çalışmada aerobik/anaerobik SBR reaktörlerinde TC/PCT ve CTC/PCT'nin nitrifiye ve denitrifiye bakterileri üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda havalandırma süresi, hidrolik bekleme zamanı, çözünmüş oksijen konsantrasyonu, TC, PCT ve CTC konsantrasyonları ve sisteme anaerobik fazda eklenen asetat miktarı gibi bazı parametreler açısından sistemin azot giderim performansı araştırılmıştır.

2 Materyal ve metot

2.1 SBR

Çalışmada kullandığımız SBR reaktörü Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu reaktör alıştırma devresi hariç toplamda 93 gün işletilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı üzere 1 numara sistemi besleyen pompayı, 2 numara SBR reaktörünü, 3 numara hava pompasını, 4 numara zaman ayarlayıcıyı, 5 numara ise çıkış reaktörünü göstermektedir. Ayrıca kullanılan reaktör hacmi 1L dir.



Şekil 1. SBR sistemi

2.2 Adaptasyon süreci ve işletme şartları

Hem nitrifikasyon hem de denitrifikasyon sistemi olan atıksu arıtma tesisinden alınan çamur reaktör hacminin 10⁴ da 1'i olacak şekilde reaktöre ilave edilmiştir. Başlangıçta nitrifikasyon/denitrifikasyon bakterilerin sisteme uyumu için sentetik atıksu hazırlanıp oksijen verilip/kesilmesi ile yaklaşık 10-15 gün bu şekilde çalışılmıştır. Daha sonra çalışma periyotları birer birer uygulanarak tetrasiklinler ve parastemolun aynı reaktörde nitrifikasyon ve denitrifikasyon bakterileri ile giderim performansı bir birlerine kıyasla incelenmiştir. Bu çalışmada reaktör toplamda 93 gün işletilmiş olup, kısa periyot sürelerinin sistem üzerinde etkileri de ayrıca araştırılmıştır. Ayrıca NO₃⁻, NO₂⁻, NH₄⁺ analizleri Shimadzu marka iyon chromatograph cihazında yapılmıştır. Ayrıca Tablo 1'de işletme şartları belirtilmiştir.

Tablo 1. İşletim şartları

Periyot	Tetrasiklin/Klortetrasiklin Konsantrasyonu (mg/L)	Parasetamol Konsantrasyonu (mg/L)	Zaman (Gün)	Aerobik Bekleme Zamanı (st)	Anoksik Bekleme Zamanı (st)	Sodyum Asetat (gr)	Çözünmüş Oksijen (mg/L)
P1	0.4-0.5	0.5-0.55	18-33	9	14	0.14	1-2
P2	“	“	33-40	14	9	0.3	4-5
P3	“	“	40-58	9	14	“	4-5
P4	1-1.1	1.95-2.1	58-68	14	9	0.6	“
P5	0.95-1	1.95-2.0	68-77	9	14	“	“
P6	0.9-1	1.9-2	77-83	3	5	“	“
P7	“	4.9-5	83-88	14	9	“	“
P8	Beslenmedi	100-110 mg/L (Aerobik fazla)	88-98	14	9	0.04	“
P9	Beslenmedi	500-515 mg/L (Anaerobik fazla)	98-101	12	11	0.04	“

2.3 Kimyasallar

Tetrasiklin hidroklorid (CAS No. 2058-46-0), klortetrasiklin (CAS No. 64-72-2) Applichem and Sigma–Aldrich firmasından satın alındı. Parasetamol ise (CAS No. AC102332500) Across Organics firmasından satın alındı. Diğer kimyasallar, NaCl, Na₂SO₄, NaNO₃, ise ACS markalıdır.

2.4 Sentetik atıksu içeriği

Sentetik atıksu içeriği litre başına aşağıdaki gibidir: 0.115g (NH₄Cl), 0.50g NaHCO₃, 0.13g KH₂PO₄, 0.1g MgSO₄.7H₂O, 0.001 g CaCl₂x2H₂O, 0.001g FeSO₄x7H₂O, Farklı miktarlarda (0.14, 0.30 ve 0.60g) CH₃COONaxH₂O ve 2ml eser mineral çözeltisi. Eser mineral çözeltisi litre başına: 100mg ZnSO₄.7H₂O, 30mg MnCl₂.4H₂O, 300mg H₃BO₃, 200mg CoCl₂.6H₂O, 10mg CuCl₂.2H₂O, 10mg NiCl₂.6H₂O olarak hazırlanmıştır.

3 Bulgular ve tartışma

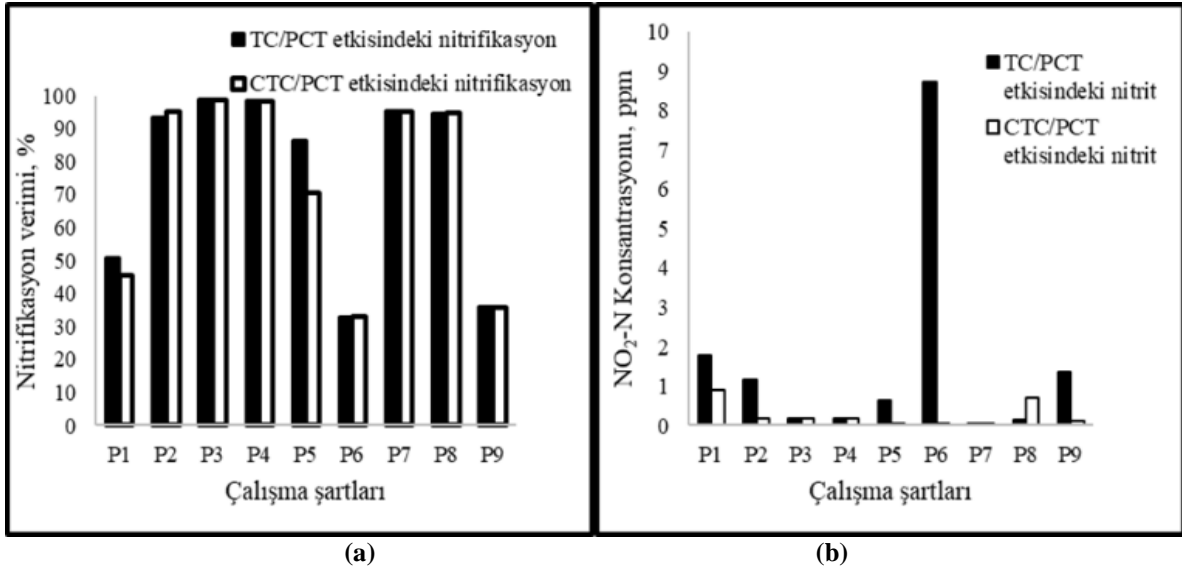
Tetrasiklin/Parasetamol ve klortetrasiklin/Parasetamolun SBR reaktöründeki nitrifikasyon ve denitrifikasyon üzerine etkileri aşağıda tartışılmıştır. Çalışma toplamda 9 periyottan oluşmaktadır.

3.1 Tetrasiklin/Parasetamol klortetrasiklin/parasetamol ikilisinin nitrifikasyon üzerine etkisi

Şekil 2a Tetrasiklin/Parasetamol ve Klortetrasiklin/Parasetamol ikilisinin nitrifikasyon üzerine etkisini göstermektedir. Bu çalışmada toplamda 9 periyot uygulanmıştır. P1 de TC/PCT ve CTC/PCT ikilisinin sebep olduğu nitrifikasyon verimi sırasıyla %50.7 ve %45.6 olmuştur. CTC/PCT’ nin nitrifikasyon üzerine daha fazla etki ettiği P1 de açıkça görülmüştür. Ayrıca P1 de nitrifikasyon verimlerinin düşük olmalarının sebebi de çözünmüş oksijenin bu şartta 1-2mg/L mg/L arasında olmasıdır. P2’ de ise nitrifikasyon verimi artarak TC/PCT ve CTC/PCT ikilisi için sırasıyla %93.5 ve %94.9 olmuştur. Yapılan bir çalışmada, domuz çiftliği atık suyunda pilot ölçekli SBR prosesi kullanılmış ve 600 ile 1600 mg/L NH₄ konsantrasyonunda %80 üzeri nitrifikasyon ve %90 üzeri denitrifikasyon verimi sağlandığı rapor edilmiştir [17]. P3’ de de nitrifikasyon verimi artarak TC/PCT ve CTC/PCT için

%98.82 olmuştur. Bu ilk 3 periyotta TC/PCT ve CTC/PCT besleme konsantrasyonu ikili için 0.5/0.5 mg/L olmuştur. Bu ilk üç periyot incelendiğinde genel olarak 0.5 mg/L’lik TC/PCT ve CTC/PCT’ nin nitrifikasyon üzerine önemli tesiri olmamıştır. P4’te TC, PCT, CTC konsantrasyonları 2 katına çıkartılarak sırasıyla, 1.2 ve 1 mg/L’e yükseltilmiştir. TC, CTC ve PCT konsantrasyonu 2 katına çıkartılmasına rağmen bu periyotta nitrifikasyona önemli ölçüde tesir etmediği görülmüştür. P5’de nitrifikasyon verimi biraz düşmüştür. Bu duruma en büyük sebebin hidrolik bekleme süresinin bir önceki şarta göre daha düşük olmasıdır. P5’te elde edilen nitrifikasyon verimi TC/PCT etkisinde %86.2 ve CTC/PCT etkisinde ise %70.5 olarak elde edilmiştir. Bu şartta da nitrifikasyon için CTC’ nin TC’ den daha etkili olduğu bir kez daha anlaşılmıştır. P6’da hidrolik bekleme süresi 3 saate düşürülerek nitrifikasyon veriminde büyük bir düşüş yaşanmıştır. Bu şartta elde edilen nitrifikasyon verimi yaklaşık %33 olmuştur. Dikkat çeken diğer bir husus da, TC/PCT ve CTC/PCT etkisindeki nitrifikasyon verimlerinin aynı olmasıdır. P7’de Parasetamol 5mg/L çıkarılmasına rağmen nitrifikasyon verimi TC/PCT ve CTC/PCT etkisinde %95.2 olarak elde edilmiştir. Bu şartta TC ve CTC sabit tutulmuştur. P8’de Parasetamol konsantrasyonu 100 mg/L’e çıkartılmış olup, nitrifikasyon verimi de önemli derecede etkilenmeyerek %94.7 olarak elde edilmiştir. P9’da anoksik fazda parasetamol 500 mg/L civarında beslenmiş olup nitrifikasyon verimi TC/PCT ve CTC/PCT etkisinde %36 civarında elde edilmiştir. Parasetamol’ün anaerobik fazda beslenmesi nitrifikasyonun tamamen bitmesini engellemiştir.

Şekil 2b TC/PCT ve CTC/PCT ikilisinin nitrifikasyonda oluşan NO₂-N konsantrasyonunu gösteriyor. Şekil incelendiğinde TC/PCT etkisindeki nitrit oluşumu CTC/PCT etkisindekinden daha fazla olmuştur. P1 de TC/PCT ve CTC/PCT etkisindeki nitrit konsantrasyonları sırasıyla, 1.77 ve 0.88mg/L olmuştur. P1 de nitritin yüksek olması düşük çözünmüş oksijenden kaynaklanmıştır. P2 de nitrit oluşumu giderek azalmış olup, TC/PCT ve CTC/PCT için sırasıyla, 1.17 ve 0.178 mg/L olmuştur. Bu periyotta çözünmüş oksijen konsantrasyonu 4-5mg/L arasına yükseltilmiştir. P3, P4 ve P5 de nitrit oluşumu stabilize olmuş, TC/PCT ve CTC/PCT için sırasıyla, 0.17, 0.19 ve 0.6 ve 0.06 olmuştur. P6 da aerobik hidrolik bekleme süresi 3 saate



Şekil 2. Tetrasiklin/Parasetamol ve Klortetrasiklin/Parasetamol ikilisinin (a) nitrifikasyon, (b) nitrit oluşumu üzerine etkisi

düşürüldüğünde TC/PCT ve CTC/PCT etkisinde nitrit oluşumu sırasıyla 8.7 ve 0.014 mg/L olmuştur. Bu periyotta TC/PCT etkisindeki nitrit oluşumu nitriti nitrate çeviren bakterilerin TC'ye karşı daha hassas olduğunun göstergesi olmuştur. P7 ve P8'deki TC/PCT ve CTC/PCT etkisindeki nitrit oluşumu sırasıyla, 0.018 ve 0.16 ve 0.7 mg/L olmuştur. P9'da ise bu oran 1.35 ve 0.125 mg/L olmuştur. Şekil genel olarak incelendiğinde TC, CTC ve PCT konsantrasyonlarının artması nitrit oluşumunu önemli derecede etkilemediğini göstermiştir.

3.2 Tetrasiklin/Parasetamol ve klortetrasiklin/Parasetamol ikilisinin denitrifikasyon üzerine etkisi

Şekil 3 TC/PCT ve CTC/PCT ikilisinin denitrifikasyon üzerine etkisini göstermektedir. Bu çalışmada toplamda 9 periyot uygulanmıştır. P1'de TC/PCT ve CTC/PCT ikilisinin sebep olduğu denitrifikasyon verimi sırasıyla %89.45 ve %88.5 olmuştur. CTC/PCT'nin denitrifikasyon üzerine daha fazla etki ettiği P1'de görülmüştür. Ayrıca P1'de nitrifikasyon verimlerinin düşük olmalarının sebebi de anaerobik fazda verilen sodyum asetatın 0.14 gr olmasıdır. P2'de ise denitrifikasyon verimi artarak TC/PCT ve CTC/PCT ikilisi için %92.6 olmuştur.

P3'te de denitrifikasyon verimi artarak TC/PCT ve CTC/PCT %96.9 olmuştur. Bu ilk 3 periyotta TC/PCT ve CTC/PCT besleme konsantrasyonu ikili için 0.5/0.5 mg/L olmuştur. Bu ilk üç periyot incelendiğinde genel olarak 0.5 mg/L lik TC/PCT ve CTC/PCT'nin denitrifikasyon üzerine önemli tesiri olmamıştır. P4'te TC, CTC ve PCT konsantrasyonları 2 katına çıkartılarak sırasıyla, 1, 2 ve 1 mg/L'e yükseltilmiştir. TC, CTC ve PCT'nin 2 katına çıkartılmasına rağmen bu periyotta denitrifikasyona önemli ölçüde tesir etmediği görülmüştür. Ayrıca bu periyotta sodyum asetat konsantrasyonu 0.6 mg/L'e yükseltilmiştir.

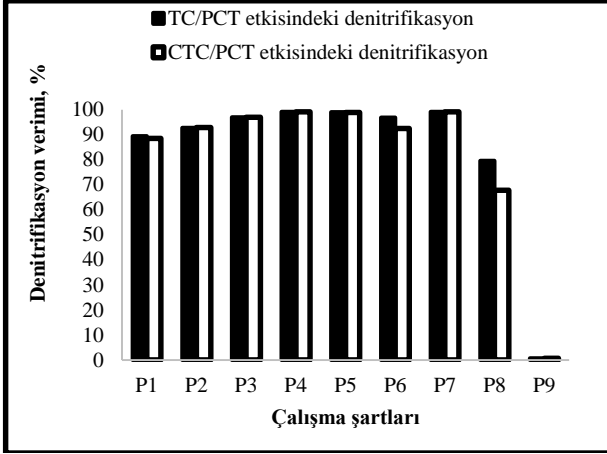
P5'te elde edilen denitrifikasyon verimi TC/PCT etkisinde ve CTC/PCT etkisinde %98.8 olmuştur. P6'da anaerobik hidrolitik bekleme zamanı 5 saate düşürülerek denitrifikasyon veriminde biraz düşüş yaşanmıştır. Bu şartta

elde edilen denitrifikasyon verimi yaklaşık TC/PCT ve CTC/PCT için sırasıyla %96.8 ve %92.4 olmuştur. CTC/PCT ikilisinin TC/PCT ikilisine göre denitrifikasyon üzerine etkisi daha fazla olmuştur. P7'de Parasetamol 5 mg/L'e çıkarılmasına rağmen denitrifikasyon verimi TC/PCT ve CTC/PCT etkisinde %99.1 olarak elde edilmiştir. Bu şartta TC ve CTC sabit tutulmuştur. P8'de Parasetamol konsantrasyonu 100 mg/L'e çıkartılmış olup, denitrifikasyon verimi önemli derecede etkilenerek TC/PCT ve CTC/PCT etkisinde sırasıyla %79.49 ve %67.7 olarak elde edilmiştir. P9'da anaerobik fazda parasetamol 500 mg/L civarında beslenmiş olup denitrifikasyon verimi TC/PCT ve CTC/PCT etkisinde %0.7 civarında elde edilmiştir. Parasetamolün anaerobik fazda beslenmesi denitrifikasyonun tamamen bitmesini sağlamıştır.

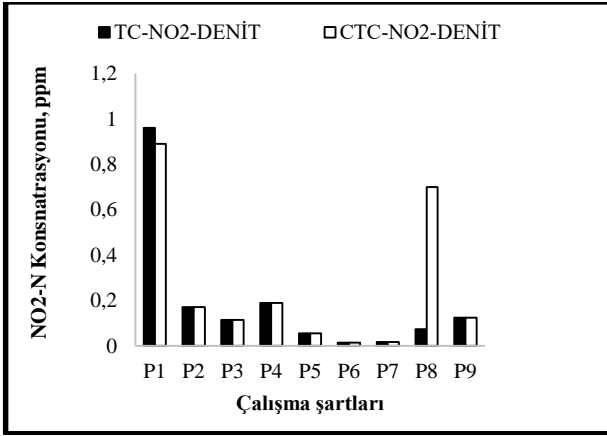
Şekil 4 TC/PCT ve CTC/PCT ikilisinin denitrifikasyonda oluşan NO₂-N konsantrasyonunu gösteriyor. Şekil incelendiğinde TC/PCT etkisindeki nitrit oluşumu CTC/PCT etkisindekinden bazen fazla bazen de az olarak kararsız davranmıştır. P1'de TC/PCT ve CTC/PCT etkisindeki nitrit konsantrasyonları sırasıyla, 0.96 ve 0.88 mg/L olmuştur.

P1'de nitritin yüksek olması sistemin başlangıç şartı olmasından kaynaklanmıştır. P2'de nitrit oluşumu giderek azalmış olup, TC/PCT ve CTC/PCT için 0.17 mg/L olmuştur. P3, P4 ve P5'de nitrit oluşumu stabilleşmiş, TC/PCT ve CTC/PCT için sırasıyla, 0.11, 0.19 ve 0.055 olmuştur. P6'da anaerobik hidrolitik bekleme zamanı 5 saate düşürüldüğünde TC/PCT ve CTC/PCT etkisinde nitrit oluşumu her ikili için 0.014 mg/L olmuştur. P7'de de nitrit oluşumu düşük olup 0.018 mg/L olmuştur. P8'deki TC/PCT ve CTC/PCT etkisindeki nitrit oluşumu sırasıyla, 0.07 ve 0.7 mg/L olmuştur.

P9'da ise bu oran 0.125 mg/L olmuştur. Şekil genel olarak incelendiğinde TC, PCT ve CTC konsantrasyonlarının artması nitrit oluşumunu önemli derecede etkilemediği anlaşılmıştır.



Şekil 3. Tetrasiklin/Parasetamol ve Klortetrasiklin/Parasetamol ikilisinin denitrifikasyon üzerine etkisi



Şekil 4. Tetrasiklin/Parasetamol ve Klortetrasiklin/parasetamol ikilisinin nitrit oluşumu üzerine etkisi

4 Sonuçlar

Çalışmadan çıkarılan önemli sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

1. Hem nitrifikasyon hem de denitrifikasyonda CTC/PCT ikilisi TC/PCT ikilisine nazaran daha toksik etki oluşturmuştur.

2. 100 mg/L'e kadar Parasetamol nitrifikasyon ve denitrifikasyon üzerine önemli derecede toksik etki oluşturmamıştır.

3. SBR sistemlerinde 3 saatin altındaki hidrolik bekleme süresi bu tür kirleticilerin olduğu nitrifikasyon ve denitrifikasyonda azotlu bileşiklerin dönüştürülmesinde uygun olmadığı görülmüştür.

4. 500 mg/L Parasetamol nitrifikasyonda %36 verim elde edilmesine sebep olurken, denitrifikasyonda %1'lere düşmüştür.

5. Denitrifiye bakterilerin nitrifiye bakterilerine nazaran farmasotiklere karşı daha hassas olduğu belirlenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazar, çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] I. Sirés Sadornil, Electrochemical advanced oxidation processes for the removal of the drugs paracetamol, clofibric acid and chlorophene from waters. Universitat de Barcelona, 2007.
- [2] G. Chen, J. Ye, H. Bao, P. Yang, Determination of the rate constants and activation energy of acetaminophen hydrolysis by capillary electrophoresis. J.Pharm. Biomed. Anal. 29, 843–850, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0731-7085\(02\)00211-X](https://doi.org/10.1016/S0731-7085(02)00211-X)
- [3] C. Yan, Y. Yang, J. Zhou, M. Liu, M. Nie, H. Shi, and L. Gu, Antibiotics in the surface water of the Yangtze Estuary: Occurrence, distribution and risk assessment. Environ. Pollut. 175, 22–29, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.12.008>
- [4] J. P. Bound, and N. Voulvoulis, Pharmaceuticals in the aquatic environment—a comparison of risk assessment strategies, Chemosphere 56, 1143–1155, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.05.010>
- [5] K. Kummerer, Antibiotics in the aquatic environment – A review – Part II. Chemosphere 75, 435–441, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.12.006>
- [6] Ş. Saygı, D. Battal ve N. Ö. Şahin, Çevre ve insan sağlığı yönünden ilaç atıklarının önemi, Marmara Pharmaceutical Journal, 16, 82-90, 2002. <https://doi.org/10.12991/201216406>
- [7] A. Septian, S. Oh, and W. S. Shin, Sorption of antibiotics onto montmorillonite and kaolinite: competition modelling. Environmental Technology, 40, 22, 2940-2953, 2019. <https://doi.org/10.1080/09593330.2018.1459870>
- [8] M. J. Ahmed, Adsorption of quinolone, tetracycline, and penicillin antibiotics from aqueous solution using activated carbons: Review. Environmental Toxicology and Pharmacology, 50, 1-10, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2017.01.004>
- [9] H. Koch, A. H. Maartje, J. van Kessel, and S. Lücker, Complete nitrification: insights into the ecophysiology of comammox Nitrospira. Applied Microbiology and Biotechnology, 103, 177–189, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9486-3>
- [10] M. H. Ward, T. M. de Kok, P. Levallois, J. Brender, G. Gulis, B. T. Nolan, and J. VanDerslice, Work group report: drinking water nitrate and health Recent findings and research needs. Environ. Health Perspect, 113, 1607-1614, 2005. <https://doi.org/10.1289/ehp.8043>.
- [11] S. Fields, Global nitrogen: Cycling out of control. Environ. Health Perspect, 112, A556–A563, 2009.
- [12] J. Y. Park and Y. J. Yoo, Biological nitrate removal in industrial wastewater treatment: Which electron donor we can choose. Appl.Microbiol.Biotechnol, 82, 415–429, <https://doi.org/10.1007/s00253-008-1799-1> 2009.
- [13] M. T. Oğuz, Investigation of nitrifying bacterial activities by monitoring nitrite oxidation, nitrate

- formation and carbon dioxide fixation during activated sludge treatment in the presence of metabolic inhibitors allylthiourea and azide. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 21 (1-2), 154-165, 2005.
- [14] S. Mace and J. Mata-Alvarez, Utilization of SBR technology for wastewater treatment: An Overview, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 41, 5539-5553, 2002. <https://doi.org/10.1021/ie0201821>
- [15] R. L. Irvine, P. A. Wilderer, and H. C. Flemming, Controlled unsteady-state processes An overview. *Water Sci. Technol.*, 1997, 35 (1), 1, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(96\)00872-4](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(96)00872-4)
- [16] M. Singh, and R. K. Srivastava, Sequencing batch reactor technology for biological wastewater treatment: A review. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 6, 3–13, 2011. <https://doi.org/10.1002/apj.490>
- [17] D. Scaglione, G. Tornotti, A. Teli, E. Ficara, R. Canziani, and F. Malpei, Nitrification denitrification via nitrite in a pilot-scale SBR treating the liquid fraction of co-digested piggery/poultry manure and agro-wastes. *Chemical Engineering Journal*, 228, 935–943, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.05.075>





Sivas havzasındaki Eosen volkanizmasından kaynaklanan arsenik kirliliği: Yalıncağ köyü (Hafik, Sivas) eski içme suyu kaynağı

Arsenic pollution caused by Eocene volcanism in the Sivas basin: The old drinking water source of the Yalıncağ village (Hafik, Sivas)

Birsen F. Biçgel¹ , Mehmet A. Kurt^{2,*} , Ümit Yıldırım³ , Cüneyt Güler⁴ , Onur Güven⁵ 

¹ Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Çiftlikköy Kampüsü, 33343, Yenişehir, Mersin, Türkiye

² Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Çiftlikköy Kampüsü, 33343, Yenişehir, Mersin, Türkiye

³ Bayburt Üniversitesi, Sanat ve Tasarım Fakültesi, Çevre Tasarımı Bölümü, Babert Külliyesi, 69100, Bayburt, Türkiye

⁴ Mersin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Çiftlikköy Kampüsü, 33343, Yenişehir, Mersin, Türkiye

⁵ Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Çiftlikköy Kampüsü, 33343, Yenişehir, Mersin, Türkiye

Özet

Bu çalışmanın amacı, Yalıncağ köyü (Hafik, Sivas) eski içme suyu kaynağındaki yüksek arsenik (As) derişiminin (1512 µg/L) kökeninin araştırılmasıdır. Bu amaçla, içme suyu kaynağının beslenme alanında yüzeyleyen kayalardan 48 adet örnek alınmıştır. Kayaç örneklerinin ana oksit içerikleri XRF yöntemiyle, mineralojik bileşimleri polarizan mikroskop ve XRD yöntemleriyle, minerallerin As derişimleri ise SEM-EDS yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda, sulardaki arseniğin kaynağının, piroksen ve plajiyoklaz mineralleri ile birlikte değişik köken ve boyuta sahip volkanik cam parçaları içeren tüfit birimi olduğu tespit edilmiştir. Kayaç örneklerindeki arsenik oksit (As₂O₃) derişimleri %0.01 ve %0.14 arasında değişmekte olup bazı minerallerde %14'e varan As mevcuttur. Çalışma sonucunda, bölgedeki yüzey ve yeraltı sularındaki arsenik kirliliğinin Sivas Havzası'ndaki Eosen yaşlı Bozbel formasyonu içindeki tüfitlerde bulunan FeAsS (arsenopirit) ve BA₂O₄ (borarsenat) minerallerinin çözünmesinden (su-kaya reaksiyonu yoluyla) kaynaklandığı belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Yalıncağ köyü (Hafik), İçme suyunda arsenik, Tüfit, Arsenopirit, Borarsenat

1 Giriş

Antik çağlardan beri bilinen ve zehir olarak kullanılan arsenik (As), canlılar üzerinde ciddi olumsuz etkilere sahiptir. Yer kabuğunda bulunan birçok mineralin bileşeni olarak karşımıza çıkan arsenik, tarım, tıp, sanayi, vb. alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Metaloid özelliği sergileyen As, doğada +5, +3, 0 ve -3 değerlikleri alabilmekte ve atmosferde, toprakta, doğal sularda ve organizmalarda sıklıkla +3 ve +5 değerliklerde bulunmaktadır [2]. Doğada realgar ve orpiment gibi kendi mineralleri olan ve 200'den fazla mineralin kristal yapısında bulunduğu bilinen arsenik [2]; iklimsel olaylar ve volkanik aktiviteler gibi doğal süreçlerle veya madencilik, tarımsal faaliyetler (pestisit ve insektisit kullanımı), fosil yakıtların yakılması ve cevherlerin ergitilmesi gibi antropojenik

Abstract

The aim of this study is to investigate the origin of the high concentration (1512 µg/L) of arsenic (As) in the old drinking water source of Yalıncağ village (Hafik, Sivas). For this purpose, 48 samples were collected from the rocks outcropping in the recharge area of the drinking water source. The major oxide contents of the rock samples were determined by XRF method, mineralogical compositions by polarizing microscope and XRD methods and As concentrations of minerals were determined by using SEM-EDS method. As revealed by these analyses, the source of arsenic in the waters of the region was found out to be tuffite unit, containing pyroxene and plagioclase minerals, as well as volcanic glass fragments of different origins and sizes. It has been detected that arsenic oxide (As₂O₃) concentrations in rock samples vary between 0.01% and 0.14% and some minerals contain As up to 14%. It was determined that arsenic pollution in surface and groundwater in the region was caused by the dissolution (by water-rock interaction) of FeAsS (arsenopyrite) and BA₂O₄ (boron arsenate) minerals found in the tuffites of the Eocene age Bozbel formation in the Sivas Basin.

Keywords: Yalıncağ village (Hafik), Arsenic pollution drinking in water, Tuffite, Arsenopyrite, Boron arsenate

faaliyetler sonucunda da toprağa ve suya karışabilmektedir [3]. Su ve hava ile birlikte uzun mesafeler kat edebilen arsenik, akifer ortamı tarafından sağlanan uygun indirgenme koşullarında çözünerek mobil hale gelebilmekte ve su kaynaklarında arsenik kirliliğine sebep olabilmektedir [4]. Ayrıca, arsenikli mineraller barındıran akifer kayalarında meydana gelen su-kayaç etkileşimi ve jeotermal ortamlardaki yüksek basınç/sıcaklık koşulları altında kolayca çözünerek yüzey ve yeraltı sularına karışarak kirliliğe neden olabilmektedir [2].

Günümüzde, dünyanın farklı bölgelerinde bulunan yeraltı ve yerüstü sularında, Dünya Sağlık Örgütü'nün [5] içme suyu sınır değerini (10 µg/L) aşan arsenik (As) derişimleri görüldüğü ve bu suları kullanmaktan başka imkânı olmayan milyonlarca insanın yüksek As

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mehmetalikurt@gmail.com (M. A. Kurt)

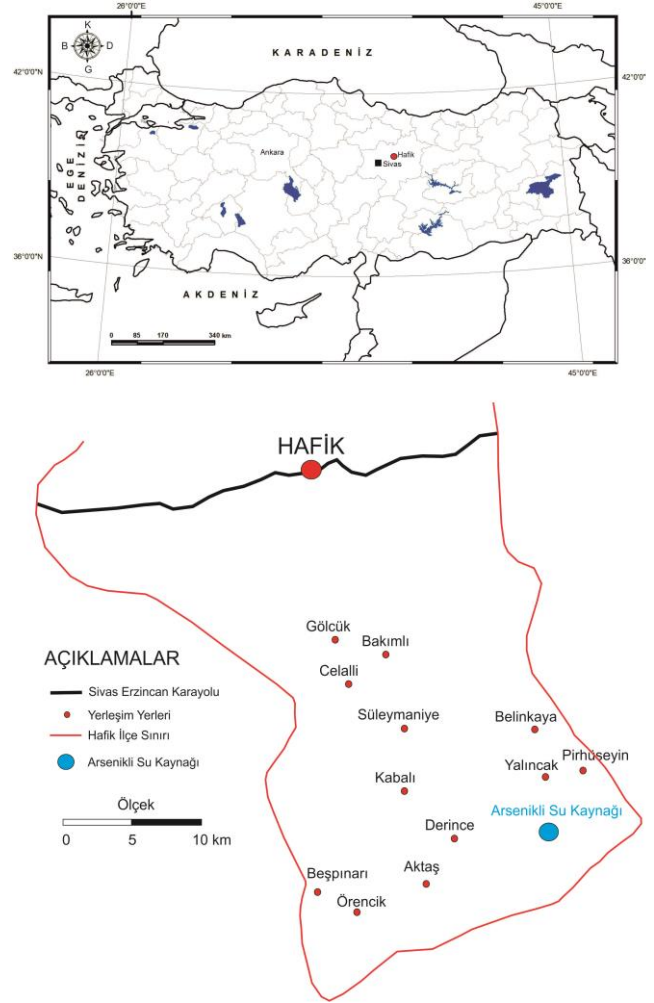
Geliş / Received: 04.05.2021 Kabul / Accepted: 30.06.2021 Yayımlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.932689

derişimlerine maruz kaldığı ve sağlıklarının bu durumdan olumsuz etkilendiği bilinmektedir. Yapılan çok sayıdaki bilimsel çalışma tarafından da ortaya konulduğu üzere; Bangladeş, Çin, Hindistan, Macaristan, Romanya, Arjantin, Şili, Meksika, Tayvan, Amerika Birleşik Devletleri ve Vietnam gibi ülkelerde, özellikle yeraltı sularında oldukça yüksek arsenik derişimleri görülmektedir [2-4, 6-8]. Türkiye'nin özellikle Batı ve Orta Anadolu bölgelerinde yapılan çalışmalarda, yüksek derişimlerde arsenik içeren suların bulunduğu bildirilmiştir. Geçmişte volkanik aktivitenin yoğun olduğu bölgelerden biri olan Batı Anadolu'da yapılan çalışmalarda; Emet ve Kütahya içme suyu kaynağında 448 µg/L [9], Hisarcık ve Kütahya'da 510 µg/L [10], İğdeköy-Kütahya-Emet dolaylarında 7745 µg/L [11], Bigadiç ve Balıkesir'de 911 µg/L [12] değerlerine ulaşan yüksek arsenik derişimleri tespit edilmiştir. Gemici vd. [12] tarafından yapılan çalışmada, arsenik derişiminin Bigadiç bor yatağı ve civarındaki yeraltı sularında yüksek olduğu vurgulanmış, bunun bor cevherleşmesi ile ilişkili olduğunu belirtilmiştir. Helvacı [13], Emet bor yatağı civarında yaptığı çalışmada, bor cevherlerinin ara katmanlarındaki tüfit ve kil örneklerinde yüksek derişimlerde arsenik bulunduğunu belirlemiştir. Türkiye'nin Orta Anadolu bölgesinde yer alan Kapadokya bölgesi de arsenik probleminin görüldüğü bölgelerden biri olup içme sularında yüksek derişimlerde (500 µg/L) arsenik bulunduğu ve kökeninin yörede yaygın olarak görülen volkanik oluşumlar, jeotermal sular, kömür içeren katmanlar ve piritli tortul kayaçlar olduğu belirtilmiştir [14]. Çeliker vd. [15], Uluova havzasında (Elazığ) yaptıkları çalışmada; yeraltı sularında 367 µg/L, kaynak sularında 4842 µg/L ve akarsularda 31 µg/L'ye varan yüksek derişimlerde arsenik tespit etmişler ve bölgedeki kirliliğin hem jeojenik kökenli hem de havzanın hidroloji-hidrojeokimyasını etkileyen antropojenik aktivitelerden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Kurt vd. [16] ise Turhal (Tokat) dolaylarında yaptıkları çalışmada, bölgedeki antimonit cevherleşmesiyle ilişkili olarak yeraltı sularında belirgin bir arsenik kirliliğinin (429 µg/L) olduğunu belirtmişlerdir. Şimşek [17] tarafından Orta Anadolu bölgesinde bulunan Şarkışla (Sivas) Ovası'nda yapılan çalışmada, yeraltı sularında 0.5-345 µg/L arasında değişen derişimlerde arsenik tespit edilmiştir. Bu çalışmada, Şarkışla Ovası'ndaki arsenik kirliliğinin Pliyosen yaşlı kumtaşı ve Kuvaterner yaşlı alüvyon akiferlerindeki su-kayaç etkileşimi sonucu meydana geldiği belirtilmiştir [17]. Kurt vd. [18]'nin Hafik ilçesine (Sivas) bağlı Pirhüseyin ve Yalınca köyleri civarında yaptıkları çalışmada da benzer şekilde bazı kaynak ve şebeke sularında yüksek arsenik derişimleri (1064 µg/L) tespit edilmiştir. Kurt [19] tarafından aynı bölgede yapılan başka bir çalışmada ise, Yalınca köyü şebeke suyunun kaynağında 1512 µg/L arsenik tespit edilmiş ve kaynağın Gürlevik Dağı eteklerinde yüzeyleyen volkanik breş-tüfit ve marn-kumtaşı-şeyl-kireçtaşı ardalanmasıyla karakterize olan Bozbel formasyonu içerisinde boşalım yaptığı vurgulanmıştır. Ancak bu çalışmada, sudaki arseniğin kökeninin belirlenmesine yönelik sistematik bir kayaç örnekleme yapılmamıştır.

Bu çalışma, Yalınca köyü (Hafik, Sivas) eski içme suyu kaynağındaki (Şekil 1) yüksek arsenik derişiminin kökenini

(antropojenik veya jeojenik) belirlemek amacıyla yapılmıştır.



Şekil 1. Çalışma alanının yer bulduru haritası [20]

2 Materyal ve metot

Bu çalışma kapsamında, Ağustos 2017'de Yalınca köyü (Hafik, Sivas) eski içme suyu kaynağından bir adet su örneği ve kaynağın beslenme alanında yüzeyleyen birimlerden 48 adet kayaç örneği alınmıştır. Kayaç örnekleme, su kaynağının beslenme alanını kapsayacak şekilde iki ayrı istif içerisinde yapılmış olup birinci istiftten 16, ikinci istiftten ise 32 örnek alınmıştır. Alınan kayaç örnekleri diskli öğütücüde 1000 rpm devirde 2 dakika süre ile bileşen boyutları yaklaşık 80 mikrometre olacak şekilde öğütülmüştür. Elde edilen toz numune 1/10 oranında selüloz ile homojen bir şekilde karıştırıldıktan sonra yaklaşık 40 tonluk bir basınçla preslenerek pastil haline getirilmiştir. Pastil numuneler X ışını floresans spektroskopisi (XRF) ile analiz edilerek Na₂O, MgO, Al₂O₃, SiO₂, P₂O₅, SO₃, K₂O, CaO, TiO₂, V₂O₅, Cr₂O₃, MnO, Fe₂O₃, NiO, CuO, ZnO, As₂O₃, Rb₂O, SrO, ZrO₂ ve BaO oksit değerleri belirlenmiştir. Kayaçların petrografik özelliklerini belirlemek ve kayaç adlandırması yapmak için ince kesitler hazırlanarak polarizan mikroskop altında incelenmiştir. Elektron mikroskopunda SEM-EDS yöntemiyle minerallerin arsenik içerikleri ve XRD tüm kayaç mineralojisi yöntemiyle örneklerin mineralojik

Tablo 1. Mevcut çalışma kapsamında kullanılan analitik yöntemler ve kullanılan cihazlar

Parametre	Birim	Analitik Yöntem	Kullanılan Cihaz, Marka, Model
pH	Standart	Elektrometrik metot (pH probu) (SM 4500-H + B)	Portatif multiparametre cihazı (Hach Lange HQ40d)
Yükseltgenme-indirgenme potansiyeli	mV	Elektrometrik metot (Eh probu) (SM 4500-H + B)	Portatif multiparametre cihazı (Hach Lange HQ40d)
Çözünmüş oksijen	mg/L	Elektrometrik metot (Oksijen probu) (SM 4500-O G)	Portatif multiparametre cihazı (Hach Lange HQ40d)
Elektriksel iletkenlik	µSiemens/cm	Elektrometrik metot (İletkenlik probu) (SM 2510 B)	Portatif multiparametre cihazı (Hach Lange HQ40d)
Anyon: Cl ⁻ , F ⁻ , NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , SO ₄ ⁻²	mg/L	TS EN ISO 14911 Su Kalitesi IC	İyon kromatografisi (Dionex IC 3000)
Anyon: HCO ₃ ⁻ ve CO ₃ ⁻²	mg/L	TS 3790 EN ISO 9963-1 (Titrimetrik)	Dijital büret
Kasyon: Ca ⁺² , Mg ⁺² , Na ⁺ , K ⁺ , NH ₄ ⁺	mg/L	TS EN ISO 14911 Su Kalitesi IC	İyon kromatografisi (Dionex IC 3000)
İz elementler (kayaç ve su)	mg/kg veya µg/kg	TS EN ISO 17294-2	İndüktif eşleşmiş plazma kütle spektrometresi (Agilent 7500ce ICP-MS)
Kayaçlarda oksit yüzdeleri	%	WD-XRF Yöntemi (TS EN 15309)	XRF (Rigaku ZSX Primus II)
Kayaç mineralojisi	-	XRD Yöntemi (SM tüm kayaç mineralojisi)	XRD (Rigaku Smart Lab)
Görüntüleme ve EDS	-	SEM-EDS	SEM (Zeis)
İnce kesit	-	Polarizan mikroskop	Olympus

bileşimleri belirlenmiştir. Arsenikli kaynaktan su örneklemeleri için 250 ml'lik iki adet polietilen (PE) numune kabı kullanılmıştır. Alınan numuneler filtrelendikten (0,45 µm açıklıklı) sonra birinin içerisine pH <2 olacak şekilde 2 ml HNO₃ arazide eklenmiştir. Yalınca köyü eski içme suyu kaynağından alınan su örneğinin (n = 1) fiziksel (pH, iletkenlik, yükseltgenme-indirgenme potansiyeli) ve kimyasal özellikleri (anyon, kasyon, iz elementler) belirlenmiştir. Çalışma kapsamında yapılan analizlere ait yöntemler Tablo 1'de sunulmuştur.

3 Bulgular ve tartışma

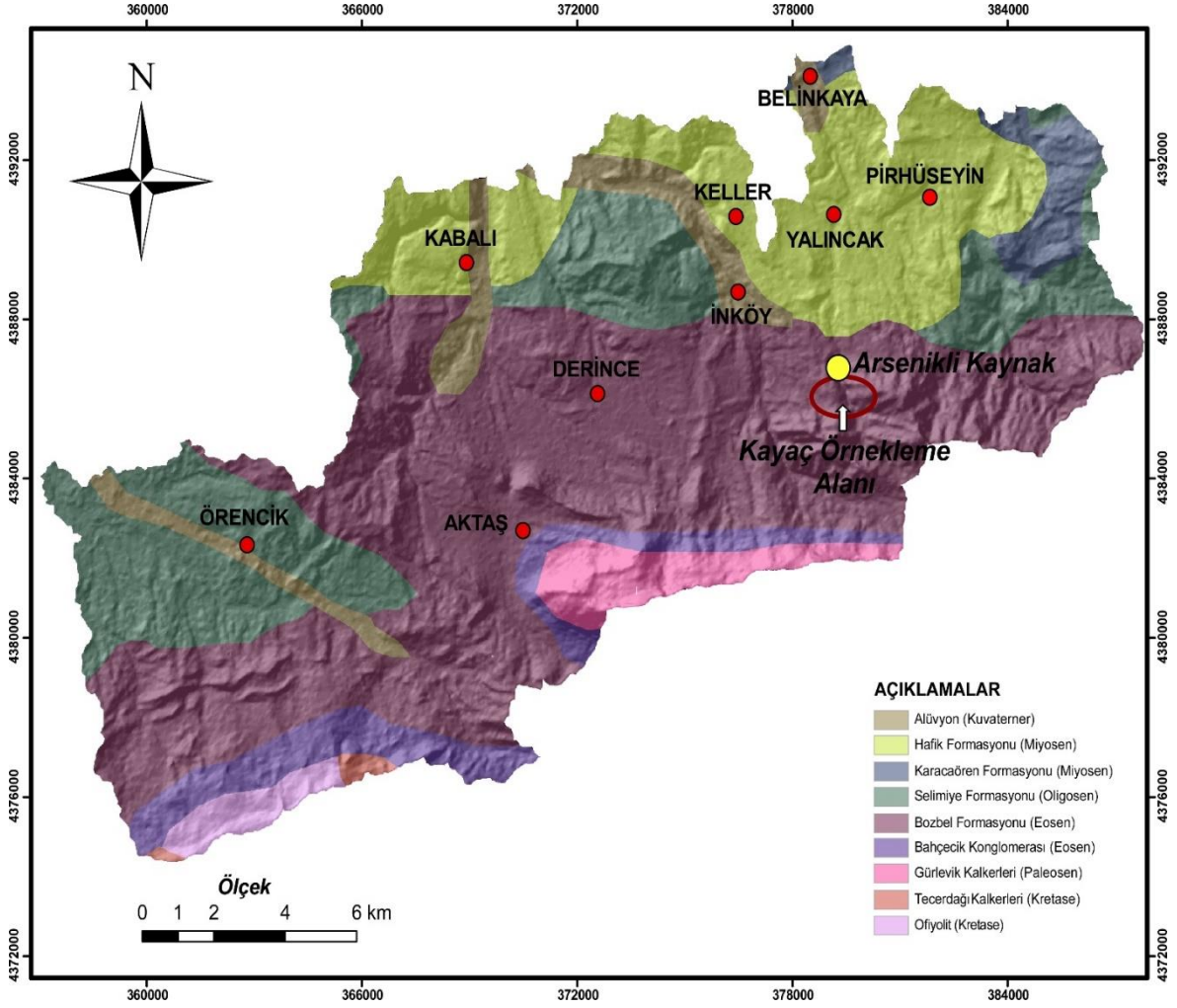
3.1 Çalışma alanının jeolojisi

Hafik ilçesi ve civarının temel kayaçlarını, Sivas Havzası'nın temelini oluşturan Paleozoyik yaşlı metamorfiklerle Üst Kretase yaşlı ofiyolitik kayaçlar oluşturmaktadır (Şekil 2). Bu temel üzerinde, kalınlığı yaklaşık 6 km'ye varan ve çoğunluğunu kırıntılı çökellerin oluşturduğu Üst Kretase-Tersiyer yaşlı istifler yer almaktadır [21]. Bu istifin en yaşlı birimi Üst Kretase-Paleosen yaşlı Gürlevik formasyonu olup bu formasyon marn ara katmanlı kireçtaşlarından oluşmaktadır [21]. Bu birimin üzerinde, Eosen yaşlı Kozluca ve Bozbel formasyonları yer almaktadır. Kozluca formasyonu, kumtaşı, kireçtaşı, marn ve şeylden oluşurken [21], Bozbel formasyonu, konglomera, tüfit ve volkanik breş, kumtaşı, kumlu kireçtaşı ve kıltaşı araldanmasından oluşmaktadır [22]. Bozbel formasyonu aynı yaşlı ve bu formasyonla yer yer ara katmanlı Karadağ bazaltı bölgenin bazı kesimlerinde görülmektedir. Bozbel formasyonu içerisindeki volkanik breş ve tüfit seviyeleri olası olarak Karadağ volkanizmasından kaynaklanmaktadır. Bölgedeki diğer yaygın kaya birimleri ise Oligosen yaşlı Selimiye formasyonu ve Miyosen yaşlı Hafik formasyonudur. Selimiye formasyonu, tabanda masif jipslerle başlar ve üst düzeylere doğru çakıltaşı, kumtaşı, silttaşı ve çamurtaşı ardışıklı, kalın-orta ve orta-ince katmanlıdır [22, 23]. Selimiye formasyonunu üzerleyen Hafik formasyonu ise bölgede oldukça geniş yayımlı olup formasyonun üst

seviyelerini oluşturan jips tabakaları, alt seviyelerde kumtaşı, silttaşı, konglomera seviyeleri ile hem araldanmalı, hem de yanal geçişli olarak yer almaktadır [24]. Havzadaki istife bakıldığında, bölgedeki kaynak ve içme sularındaki As artışına kaynaklık edebilecek birimlerin olduğu görülmektedir. Bunlar, bölgede yaygın olarak görülen evaporitik kayaçlar (jips) ve volkanik-volkanoklastik ürünler (bazalt, tüfit ve volkanik breş) veya yüzeyde görünmeyen arsenik içeren cevherleşmeler (sülfidler) olabilir. Yüksek As içeren Yalınca köyü eski içme suyu kaynağı, Bozbel formasyonu içerisinden boşalım yapmaktadır. Kurtman [22], Bozbel Dağı ile Karababa Dağı arasında Bozbel formasyonundan aldığı kesitte, alttan üste doğru sırasıyla; tüfit ve volkanik breş araldanması, marn-kumtaşı-şeyl-kireçtaşı araldanması, jips ve kireçtaşı mercekleri içeren marn seviyesi, tüfit ve volkanik breş araldanması ve ince tabakalı marn-kumtaşı-şeyl-kireçtaşı araldanması gibi birimleri belirlemiştir.

3.2 Kayaçların XRF oksit analizleri

Yalınca köyü eski içme suyu kaynağının beslenme alanında yer alan kayaçların iki farklı seviyesinden (1. istif ve 2. istif) örnekleme yapılmıştır. 1. ve 2. istiftteki kayaçların ana oksit derişimlerinin en düşük, en yüksek ve ortalama oksit değerleri Tablo 2'de sunulmuştur. Birinci istiftteki kayaçlarda, SiO₂ en yüksek derişimi sergilemekte olup en düşük, en yüksek ve ortalama derişimleri yüzde (%) olarak sırasıyla 40.41, 47.87 ve 44.20'dir (Tablo 2). Bunun yanı sıra, 1. istiftteki kayaçlarda Al₂O₃'ün en düşük, en yüksek ve ortalama değerleri (% cinsinden) sırasıyla 13.19, 16.33 ve 15.54'tür (Tablo 2). Fe₂O₃'ün en düşük, en yüksek ve ortalama değerleri (% cinsinden) ise 8.53, 13.04 ve 11.39 olarak belirlenmiştir (Tablo 2). Bu istifte, MgO'ya ait en düşük, en yüksek ve ortalama değerler (% cinsinden) ise sırasıyla 5.67, 7.97 ve 6.87'dir. Birinci istifte As₂O₃ ise, sekiz örnekte ölçüm limiti (%0.003) altında gözlenirken, sekiz örnekte ise %0.01 ile %0.14 aralığında derişimler sergilemiştir (Tablo 2).



Şekil 2. Çalışma alanı ve yakın çevresinin jeoloji haritası (Kurtman [22]'dan değiştirilerek)

2. istif olarak adlandırılan kayaların analiz sonuçlarına göre, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve MgO en yüksek derişime sahip oksitler olarak öne çıkmaktadır (Tablo 2). En düşük, en yüksek ve ortalama SiO_2 (% cinsinden) sırasıyla 39.21, 63.23 ve 44.32'dir. Al_2O_3 'ün en düşük, en yüksek ve ortalama değerleri (% cinsinden) sırasıyla 12.53, 16.82 ve 14.74'tür (Tablo 2). Fe_2O_3 'ün en düşük, en yüksek ve ortalama değerleri % olarak sırasıyla 5.11, 14.21 ve 11.74 olarak belirlenmiştir (Tablo 2). MgO 'ya ait en düşük, en yüksek ve ortalama değerler (% olarak) ise sırasıyla 4.32, 9.18 ve 6.94'tür. Bu istifte bulunan kayaların hiçbirinde ölçüm limiti olan %0.003'ten daha yüksek derişimde arsenik oksit (As_2O_3) tespit edilememiştir (Tablo 2).

3.3 Kayaç mineralojisi

Bu bölümde, alınan kayaç örneklerinin mineralojisini tanımlamaya yönelik olarak yapılan analizlere ait sonuçlar aktarılmıştır.

3.3.1 Petrografik analizler

Yalınca köyü eski içme suyu kaynağının beslenim alanında yer alan kayaların mineralojik bileşimleri

belirlemek ve kayaç adlandırmalarını yapmak amacıyla alınan örneklerden ince kesitler hazırlanmış ve polarizan mikroskopta petrografik incelemeye tabi tutulmuşlardır. Petrografik incelemeler sonucunda, kayaların plajiyoklaz ve piroksen kristal fazlarının yanı sıra, farklı köken ve boyutta kayaç parçaları ile volkanik cam içerdikleri belirlenmiştir (Şekil 3). Bu içeriklere göre; kayaç örnekleri tüfit olarak adlandırılmıştır. Kayaç örneklerinde alterasyon yaygın olarak görülmekte olup bunlar karbonatlaşma, kloritleşme ve serizitleşme türü alterasyonları işaret etmektedir (Şekil 3).

3.3.2 XRD analizleri

Yalınca köyü eski içme suyu kaynağının beslenim alanındaki kayaç örnekleri içerisinde en yüksek As_2O_3 derişimine (%0.14) sahip örneğin XRD analizi yapılmış olup XRD pikleri ve belirlenen mineral fazları Şekil 4'te görülmektedir. XRD analiz sonuçlarına göre; bu kayaç örneği, Ca-plajiyoklaz (anortit), Na-plajiyoklaz (albit), klorit, ortopiroksen, klinopiroksen, arsenopirit ve borarsenat mineral fazlarını içermektedir. Elde edilen bu sonuçlara göre, Yalınca köyü eski içme suyu kaynağındaki yüksek

arsenik derişimi, büyük olasılıkla 1. İstifte bulunan tüfitlerdeki arsenopirit (FeAsS) ve borarsenat (BaSO₄) minerallerinden kaynaklanmaktadır (Şekil 4).

Tablo 2. Kayaçların en düşük, en yüksek ve ortalama oksit içerikleri ve ateş kaybı değerleri

Oksit (%)	1. İstif (n = 16)			2. İstif (n = 16)		
	En düşük	En yüksek	Ort.	En düşük	En yüksek	Ort.
Na ₂ O	1.36	4.25	2.50	0.73	3.45	2.32
MgO	5.67	7.97	6.87	4.32	9.18	6.94
Al ₂ O ₃	13.19	16.33	15.54	12.53	16.82	14.74
SiO ₂	40.41	47.87	44.20	39.21	63.23	44.32
P ₂ O ₅	0.22	0.44	0.35	0.15	0.37	0.29
SO ₃	0.05	2.64	0.35	0.04	0.13	0.06
K ₂ O	0.47	3.59	2.40	0.31	3.65	1.68
CaO	6.40	14.92	10.11	3.74	22.93	11.61
TiO ₂	0.94	1.26	1.06	0.65	1.22	0.91
V ₂ O ₅	0.05	0.10	0.06	0.05	0.07	0.06
Cr ₂ O ₃	0.02	0.06	0.03	0.02	0.07	0.04
MnO	0.16	0.22	0.20	0.12	0.28	0.22
Fe ₂ O ₃	8.53	13.04	11.39	5.11	14.21	11.74
NiO	0.01	0.04	0.02	0.01	0.04	0.02
CuO	0.02	0.04	0.02	0.01	0.03	0.02
ZnO	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02
As ₂ O ₃	<0.003	0.14	0.04	<0.003	<0.003	<0.003
Rb ₂ O	0.01	0.10	0.02	0.01	0.01	0.01
SrO	0.03	0.10	0.06	0.02	0.59	0.06
Ateş kaybı	3.93	6.76	4.77	2.87	12.15	4.92



Şekil 3. Tüfitlerin polarizan mikroskop altında çekilen çift ve tek nikol görüntüleri

3.3.3 SEM analizleri

Yüksek miktarda arsenik oksit içeren tüfit örneklerindeki mineral fazlarının morfolojisini görüntülemek ve mineral içeriğinde bulunan elementel arseniğin miktarını saptamak amacıyla SEM analizleri yapılmıştır. Elde edilen SEM görüntüsünde (Şekil 5), arsenikli tüfit örneğinin mikro gözenekli bir yapıda olduğu görülmektedir. SEM görüntüsünün yanı sıra, EDS (enerji dağılımlı spektrometre) dedektörü kullanılarak minerallerin yarı kantitatif kimyasal analizi de yapılmış ve minerallerin kimyasal bileşimleri hakkında bilgi elde edinilmeye çalışılmıştır.

En yüksek arsenik oksit (As₂O₃) içeren örnekten (%0.14) elde edilen EDS spektrumu ve noktasal yarı kantitatif analiz sonuçları Şekil 6'da verilmiştir. Bu analize göre; en yüksek elementel arsenik (As) içeren noktada; %33.34 Fe, %14.02 As, %9.83 Si, %6.50 Ca, %1.63 B ve %1.46 S tespit edilmiştir. Elde edilen bu elementel derişim değerleri de tüfitlerdeki arsenopirit ve borarsenat mineralleri varlığını doğrulamaktadır

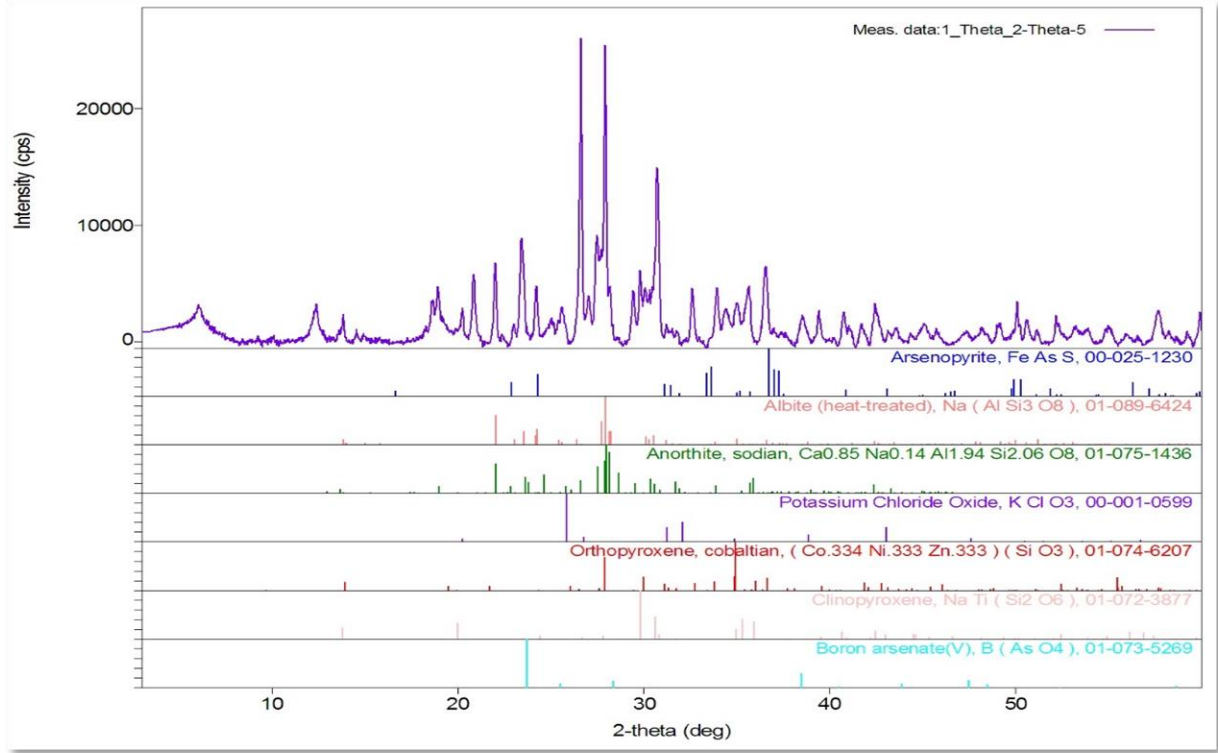
3.4 Yalıncağ köyü eski içme suyu kaynağının fiziksel ve kimyasal özellikleri

Bu çalışmada kapsamında, Yalıncağ köyü eski içme suyu kaynağından alınan su örneğinde, yerinde pH, Eh ve elektriksel iletkenlik gibi fiziksel parametreler ölçülmüş ve laboratuvarında majör katyon/anyon ve iz element analizleri gerçekleştirilmiştir. Oldukça düşük sayılabilecek elektriksel iletkenlik (224 µS/cm) ve Eh (-67.5 mV) değerlerine sahip olan bu kaynak suyu, alkali su (pH = 8.12) sınıfına girmektedir. Bu su kaynağında, sodyum (Na⁺), magnezyum (Mg²⁺), potasyum (K⁺), kalsiyum (Ca²⁺) ve silis (Si) katyonlarına ait değerler sırasıyla (mg/Lcinsinden) 20.45, 4.24, 0.94, 25.23 ve 8.75 olarak belirlenmiştir. Su örneğinde analiz edilen florür (F⁻), klorür (Cl⁻), nitrit (NO₂⁻), nitrat (NO₃⁻), fosfat (PO₄³⁻), sülfat (SO₄²⁻), karbonat (CO₃²⁻) ve bikarbonat (HCO₃⁻) anyonlarının derişimleri ise sırasıyla (mg/L cinsinden) 0.06, 2.96, <0.01, 0.32, <0.01, 29.72, 0.00 ve 94.5 olup sülfat ve bikarbonat en yüksek değerleri sergilemektedir. Arsenikli su örneğinin yapılan elektronötrallite hesabına göre iyon dengesinin %0,18 olduğu belirlenmiştir. Yalıncağ köyü eski içme suyu kaynağından alınan su örneğinin bazı iz element değerleri (µg/L cinsinden); bor (B = 2013), titanyum (Ti = 58.35), demir (Fe = 192.43), arsenik (As = 1512), stronsiyum (Sr = 169.8), brom (Br = 9.66)'dir. Bu kaynak suyunda, özellikle As ve B miktarları ulusal ve uluslararası içme suyu standartlarının oldukça üzerindedir. Bu suda, As ve B elementlerine ait derişimlerin yüksek olması, akiferdeki arsenopirit ve borarsenat minerallerinin varlığıyla yakından ilişkilidir. Oldukça düşük (µg/L cinsinden) baryum (Ba = 3.22), molibden (Mo = 2.08) ve nikel (Ni = 1.06) derişimlerine sahip olan kaynağta, alüminyum (Al), krom (Cr), bakır (Cu), çinko (Zn), kadmiyum (Cd) ve kurşun (Pb) derişimleri ise 1 µg/L'nin altındadır.

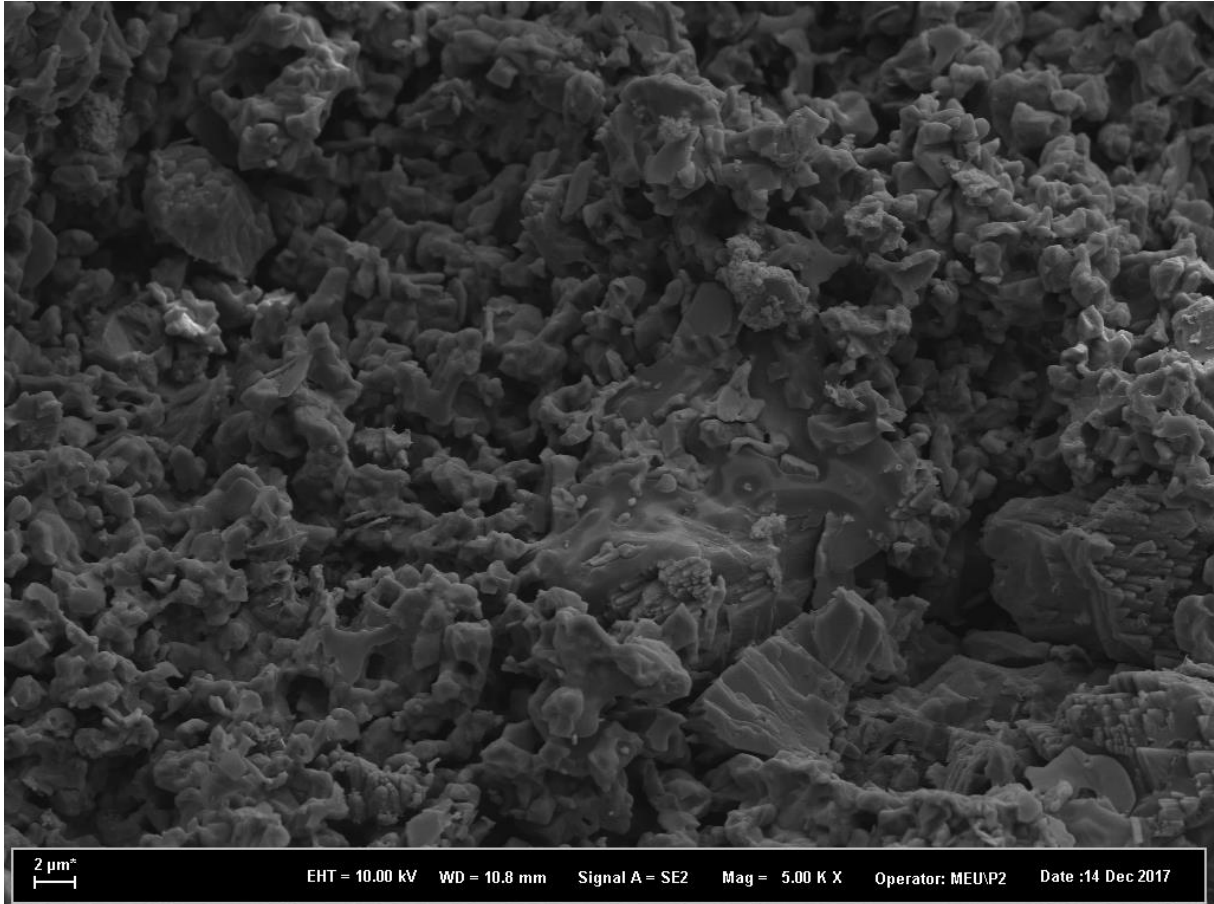
3.5 Tartışma

Kurt vd. [18]'in, Pirhüseyin ve Yalıncağ köyleri civarında yaptığı çalışmada, bölgedeki yüzey ve yeraltı sularında belirgin bir As kirliliğinin olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada [18], bu arsenik kirliliğinin bölgedeki arazi kullanımına dayanarak antropojenik olmadığı, litolojik olabileceği belirtilmiş, ancak kirliliğin kaynağı net olarak ortaya konulmamıştır.

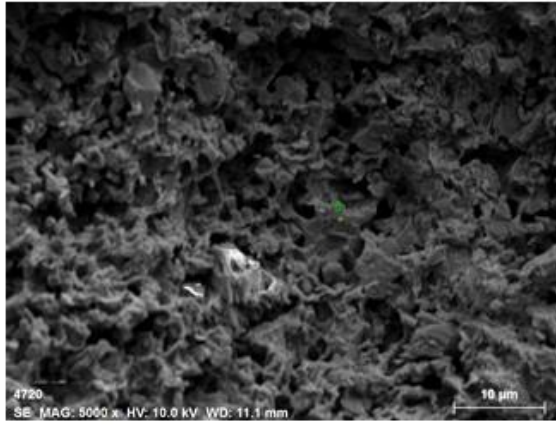
Yalıncağ Köyü arsenikli eski içme suyu kaynağının beslenme alanından iki farklı seviyede yapılan örnekleme ve bunların XRF analiz sonuçlarına göre, 1. istifte yer alan tüfitlerin bazı seviyelerinde yüksek arsenik oksit olmasına karşın, 2. istif içerisinde dedeksiyon limitinin üzerinde arsenik oksit bulunmamıştır. İki istifin analiz sonuçları karşılaştırıldığında, hemen hemen tüm sonuçların oldukça benzer oldukları görülmektedir.



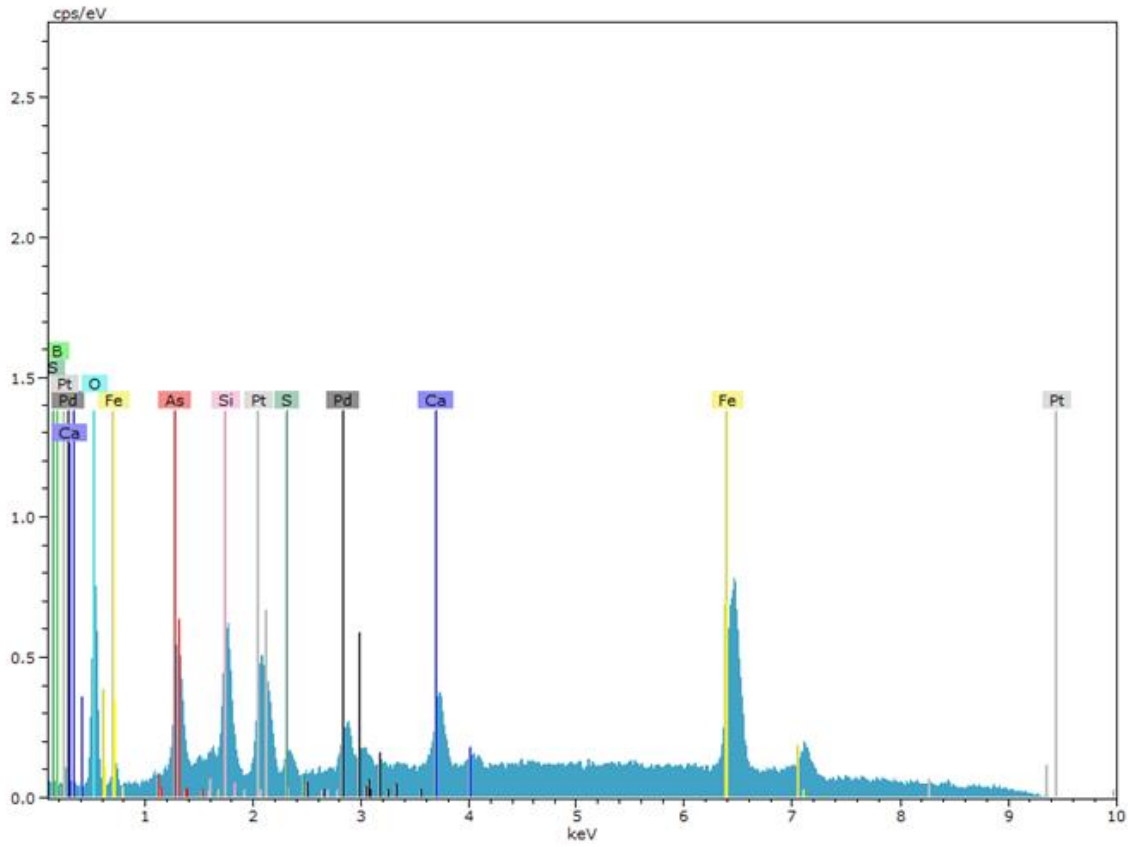
Şekil 4. Arsenikli tüfit örneğine ait XRD pikleri ve belirlenen mineral fazları



Şekil 5. Arsenikli tüfit örneğine ait SEM görüntüsü



El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. [at.%]
Fe	26	K-series	23.41	33.34	30.31
Pt	78	M-series	15.69	22.35	5.82
As	33	L-series	9.84	14.02	9.50
Si	14	K-series	6.90	9.83	17.77
Ca	20	K-series	4.56	6.50	8.23
Pd	46	L-series	4.19	5.96	2.84
O	8	K-series	3.45	4.91	15.58
B	5	K-series	1.14	1.63	7.65
S	16	K-series	1.03	1.46	2.31



Şekil 6. Arsenikli tüfit örneğine ait EDS spektrumu ve noktasal yarı kantitatif analiz sonuçları

Buna karşın 1. ve 2. istifin ortalama As_2O_3 değerleri (% olarak) sırasıyla 0.04 ve <0.003 ; SO_3 değerleri sırasıyla 0.35 ve 0.06 olup iki istif As_2O_3 ve SO_3 bakımından farklı derişimlere sahiptir.

Yalıncağ Köyü eski içme suyu kaynağı, Bozbel Formasyonu içerisindeki tüfit seviyesinden boşalmaktadır ve bu seviye arsenikli suyun akiferini oluşturmaktadır. Formasyon volkanik kökenli kırıntılardan oluşan iki tüfit seviyesi içermektedir. Birinci tüfit seviyesi, formasyonunun taban seviyelerinde bulunmakta ve kalınlığı 500 m'dir [22]. Formasyon tabanında yer alan bu tüfit seviyesi, bu çalışmadaki birinci istif örneklemesine karşılık gelmektedir. İkinci tüfit seviyesi ise, formasyonunun orta düzeylerindeki Karababa tüfitleri olarak adlandırılan [22] tüfitler olup bu

çalışmadaki ikinci istif örneklemeindeki tüfitlere karşılık gelmektedir. Bu tüfitlerin, özellikle Lütisiyen (Eosen) döneminde bölgenin yoğun volkanik faaliyetler sonucu ortaya çıkan malzemenin (volkanik kül, breş ve kayac parçaları) derin deniz ortamında çökmesiyle oluştuğı belirtilmektedir [22].

Sivas Havzası'nda yapılan diğec çalışmalar da Eosen döneminde havzanın farklı bölümlerinde bölgede yoğun bir volkanik aktivitenin olduğunu göstermektedir. Akçay ve Beyazpirinç [25], Sorgun ile Yıldızeli dolaylarında yitim veya çarpışmayla ilişkili volkanizmayla birlikte oluşan kırıntılı bir istif olduğunu belirtmektedir. Bu kırıntılı istif, bu çalışmadaki Bozbel formasyonu ile benzerlik sunmaktadır. Almus, Yıldızeli ve Yıldızdağ bölgesinde

yapılan çalışmada da özellikle Orta Eosen döneminde volkanik aktivitenin yaygınlaştığı ve bölgede dönemin volkano-sedimanter birimlerle temsil edildiği belirtilmektedirler [26]. Göçmengil vd. [26], Yıldızeli Havzası'ndaki Orta Eosen (Lütesiyen) volkanizmasının iki aşamada gerçekleştiği ve bunların yaklaşık 44 milyon yıl önce (birinci aşama) ve yaklaşık 40-41 milyon yıl öncesi (ikinci aşama) olduğunu belirtmektedir. Bu volkanizma yaşları, Bozbel formasyonu (Orta Eosen-Lütesiyen) içerisindeki tüfitlerin yaşları ile benzerlik göstermekte olup Yıldızeli Havzası'ndaki ilk aşama volkanizması, Hafik Havzası'ndaki Bozbel formasyonu'nun alt seviyesindeki tüfitlerle, ikinci aşama volkanizması ise Bozbel formasyonu'nun üst seviyesindeki tüfitlerle denetirilebilir. Sivas Havzası'nda yapılan önceki çalışmalar, Eosen volkanizmasından kaynaklanan volkanik ürünlerin bölgede geniş yayılımı sahip olduğunu göstermektedir ve bu birimlerle ilişkili su kaynaklarının arsenik bakımından kirletilmiş olabileceğini düşündürmektedir.

Arseniğin doğal kaynaklarının, sülfid mineralleri, volkanik kayalar, hidrotermal kaynaklar ve fosil yakıtlar olabileceği belirtilmektedir ([27-29]). Bu çalışmada bölgedeki yeraltı sularındaki arseniğe volkanik kökenli arsenopirit ve borarsenat minerallerinin kaynaklık ettiği belirlenmiştir. Kurt [19] tarafından yapılan çalışmada, bölgedeki sulara arsenik ve bor element derişimlerinin benzer davranış sergilediği belirtilmiştir. Bu çalışmada da As ve B element derişimlerinin yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu durum, bölge sularındaki arsenik kirliliğinin Orta Eosen (Lütesiyen) yaşlı tüfitlerin içerisindeki arsenopirit ve borarsenat minerallerinin yeraltı suları tarafından çözünmesinden kaynaklandığını göstermektedir. Türkiye'de özellikle Batı Anadolu'da yapılan bazı çalışmalarda ([12], [13], [30]) yeraltı sularında, bor cevherleşmesi ve volkanizma ürünleri ile ilişkili olduğu belirtilen arsenik kirliliğinden bahsedilmektedir. Bu çalışmalardan birinde [12], Balıkesir'in Bigadiç ilesi sınırları içerisinde yer alan bor yatağı civarındaki yeraltı sularında 900 µg/L'yi aşan As derişiminin olduğu vurgulanmaktadır. Kütahya'nın Emet ilçesi sınırları içerisinde bulunan bor yatağı ve civarında yapılan bir çalışmada [30] da, cevherin ara katmanlarındaki tüfit ve killerde 20000 mg/kg'lara kadar çıkabilen As derişimi olduğu ve bunun kökeninin volkanik küller, volkanik kayaların ayrışma ürünleri ve sıcak su kaynaklarının olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlarla, Batı Anadolu'da yapılan çalışmaların sonuçları tüfit gibi bazı volkanik ürünlerle, bu ürünlere bağlı gelişen cevherleşmelerin ara katmanlarında yüksek miktarlarda As elementinin varlığını göstermektedir.

4 Sonuçlar

Sivas ilinin, Hafik ilçesine bağlı Yalınca köyüne ait eski içme suyu kaynağındaki yüksek As derişiminin kökeninin aydınlatılmasına yönelik yapılan bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Çalışma kapsamında arsenikli su kaynağının beslenim alanındaki Eosen dönemine ait volkanik ürünlerin (tüfit) %0.14'e varan miktarlarda As₂O₃ içerdiği belirlenmiştir. Mineralojik analizlerden elde edilen sonuçlara göre; tüfitler

plajiyoklaz, klorit, klinopiroksen, ortopiroksen, arsenopirit ve borarsenat gibi mineraller içermekte ve tüfitlerde kloritleşme, serizitleşme ve karbonatlaşma türü alterasyonlar oldukça yaygın olarak görülmektedir. SEM-EDX analizlerine göre; bazı tüfit örneklerin noktasal olarak %14'e varan miktarlarda elementel arsenik (As) mevcut olduğu ve bu arseniğin arsenopirit (FeAsS) ve borarsenat (BaSO₄) mineral fazlarında bulunduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, Yalınca köyü eski içme suyu kaynağındaki arsenik kirliliğinin, Eosen yaşlı Bozbel Formasyonu'nun alt seviyelerinde bulunan tüfitlerdeki arsenopirit ve borarsenat minerallerinin akifer ortamında meydana gelen su-kayaç tepkimeleriyle çözünerek yeraltı sularına geçtiği düşünülmektedir. Bölgede görülen arsenik kirliliğinin Eosen volkanizması ürünlerinden (tüfit) kaynaklanan doğal (jeojenik) bir kirlenme olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, Sivas Havzası'nda Eosen volkanizmasının oldukça yaygın olması sebebiyle, bölgede henüz bilinmeyen ve yöre halkı tarafından kullanılan çok sayıda arsenikli su kaynağının olabileceği düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu makale, B. F. Biçgel'in 2018 yılında tamamladığı "Yalınca Köyü (Hafik-Sivas) Eski İçme Suyu Kaynağındaki Arseniğin Kökeni" başlık yüksek lisans tezinden elde edilen veriler kullanılarak hazırlanmıştır. Çalışma kapsamında yürütülen arazi çalışmaları sırasındaki yardım, destek ve misafirperverliklerinden dolayı başta Sn. Musa Aktaş olmak üzere, Pirhüseyin ve Yalınca mahalleleri halkına çok teşekkür ederiz. Bu çalışma, Mersin Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (MEÜ BAP 2017-2-TP2-2631 nolu proje) tarafından desteklenmiş olup yazarlar bu desteğinden dolayı teşekkürlerini sunar.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %5

Kaynaklar

- [1] F. Yağmur ve İ. H. Hancı, Arsenik. Sürekli Tıp Eğitimi Dergisi, 11 (7), 250-251, 2002.
- [2] P. L. Smedley and D. G. Kinniburgh, A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. Applied Geochemistry, 17 (5), 517-568, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00018-5).
- [3] J. C. Ng, J. Wang and A. Shraim, A global health problem caused by arsenic from natural sources. Chemosphere, 52 (9), 1353-1359, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00470-3](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00470-3).
- [4] P. Bhattacharya, G. Jaks, S. H. Frisbie, E. Smith, R. Naidu and B. Sarkar, Arsenic in the environment: a global perspective. in: B. Sarkar (Ed.), Heavy Metals in the Environment, Marcel Dekker, Inc., pp. 147-215, New York, 2002.
- [5] WHO, 1993. Guidelines for drinking-water Quality. World Health Organization. Genova.
- [6] M. V. Brömssen, M. Jakariya, P. Bhattacharya, K. M. Ahmed, M. A. Hasan, O. Sracek, L. Jonsson, L. Lundell

- and G. Jacks, Targeting low-arsenic aquifers in Matlab Upazila, Southeastern Bangladesh. *Science of The Total Environment*, 379 (2-3), 121-132, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.06.028>.
- [7] M. M. Rahman, R. Naidu and P. Bhattacharya, Arsenic contamination in groundwater in the Southeast Asia region. *Environmental Geochemistry and Health*, 31, 9-21, 2009. <https://doi.org/10.1007/s10653-008-9233-2>.
- [8] D. P. Shukla, C. S. Dubey, N. P. Singh, M. Tajbakhsh and M. Chaudhry, Sources and controls of Arsenic contamination in groundwater of Rajnandgaon and Kanker District, Chattisgarh Central India. *Journal of Hydrology*, 395 (1-2), 49-66, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.10.011>.
- [9] N. Oruç, Emet-Kütahya içme sularında arsenik düzeyi, önemi ve bor yatakları ile ilişkisi. II. Uluslararası Bor Sempozyumu, sayfa 469-476, Eskişehir, Türkiye, 23-25 Eylül 2004.
- [10] M. Çöl and C. Çöl, Arsenic concentrations in the surface, well, and drinking waters of the Hisarcik, Turkey, area. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 10 (2), 461-465, 2004. <https://doi.org/10.1080/10807030490438535>.
- [11] M. Çolak, Ü. Gemici and G. Tarcan, The effects of colemanite deposits on the arsenic concentrations of soil and ground water in Igdeköy-Emet, Kütahya, Turkey. *Water, Air, & Soil Pollution*, 149, 127-143, 2003. <https://doi.org/10.1023/A:1025642331692>.
- [12] Ü. Gemici, G. Tarcan, C. Helvacı and A. M. Somay, High arsenic and boron concentrations in groundwaters related to mining activity in the Bigadiç borate deposits (Western Turkey). *Applied Geochemistry*, 23 (8), 2462-2476, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2008.02.013>.
- [13] C. Helvacı, Stratigraphic and structural evolution of the Emet borate deposits, Western Anatolia. Dokuz Eylül University, Faculty of Engineering and Architecture, Research Paper MM/JEO-86 AR 008, 1986.
- [14] E. Atabey, Nevşehir İli Tıbbi Jeolojik Unsurları ve Halk Sağlığı. Nevşehir Belediyesi, Nevşehir, 2013.
- [15] M. Çeliker, S. Türkmen, C. Güler and M. A. Kurt, Factors controlling arsenic and selected potentially toxic elements in stream sediment-soil and groundwater-surface water systems of a hydrologically modified semi-closed basin (Uluova) in Elazığ Province, Eastern Turkey. *Journal of Hydrology*, 569, 167-187, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.067>.
- [16] M. A. Kurt, Ü. Yıldırım, C. Güler and O. Güven, Antimony and arsenic contamination in water from antimonite mineralization: a case study from Turhal (Tokat, Northern Turkey). *Environmental Forensics*, 2021. <https://doi.org/10.1080/15275922.2021.1907816>.
- [17] C. Simsek, Assessment of naturally occurring arsenic contamination in the groundwater of Sarkisla Plain (Sivas/Turkey). *Environmental Earth Sciences*, 68, 691-702, 2013. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1771-3>.
- [18] M. A. Kurt, Ü. Yıldırım, C. Güler ve E. Aktaş, Pirhüseyin ve Yalınca köyleri (Hafik-Sivas) civarındaki bölgede bulunan yüzey ve yeraltı sularında arsenik kirliliği. 68. Türkiye Jeoloji Kurultayı, sayfa 72-73, Ankara, Türkiye, 06-10 Nisan 2015.
- [19] M.A. Kurt, Pirhüseyin ve Yalınca köyleri (Hafik, Sivas) dolaylarındaki suların arsenik konsantrasyonlarının belirlenmesi. *Ömer Halis Demir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7 (2), 532-540, 2018. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.443184>.
- [20] B. F. Biçgel, Yalınca köyü (Hafik-Sivas) eski içme suyu kaynağındaki arseniğin kökeni. Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2018.
- [21] S. Korkmaz, Sivas havzasında ana kaya fasiyesi ve petrol oluşumunun organik jeokimyasal yöntemlerle araştırılması. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 37, 61-88, 1990.
- [22] F. Kurtman, Sivas-Hafik-Zara ve İmranlı bölgesinin jeolojik ve tektonik yapısı. *MTA Dergisi*, 80, 1-32, 1973.
- [23] F. Ay ve N. Yalçın-Erik, Ulaş (Sivas) kuzeyindeki Tersiyer yaşlı birimlerin petrol kaynak kaya ve organik fasiyes özellikleri. *Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 20 (1), 38-51, 2003.
- [24] K. M. Önal, Sivas havzası derin yapısının jeofizik yöntemlerle incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2007.
- [25] A.E. Akçay, M. Beyazpirinç, Sorgun (Yozgat)-Yıldızeli (Sivas) Önülke havzasının jeolojik evrimi, havzada etkin olan volkanizmanın petrografik, jeokimyasal özellikleri ve jeokronolojisi. *MTA Dergisi*, 155, 1-32, 2017.
- [26] G. Göçmengil, Z., Karacık, Ş.C., Genç, Billor, M.Z., ⁴⁰Ar-³⁹Ar geochronology and petrogenesis of postcollisional trachytic volcanism along the İzmir-Ankara-Erzincan suture zone (NE, Turkey). *TÜBİTAK Journal of Earth Sciences*, 27, 1-31, 2018. <https://doi.org/10.3906/yer-1708-4>
- [27] J. Matschullati, Arsenic in the geosphere-a review. *Science of the Total Environment*, 249, 297-312, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(99\)00524-0](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00524-0).
- [28] M. Bissel, F.H., Frimmel, Arsenic-a review. Part I: occurrence, toxicity, speciation mobility. *Acta Hydrochim Hydrobiol*, 31-1, 9-18, 2003. <https://doi.org/10.1002/ahch.200390025>.
- [29] S. Wang and C.N., Mulligan, Speciation and surface structure of inorganic arsenic in solid phases: a review. *Environment International*, 34, 867-879, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2007.11.005>.
- [30] C. Helvacı, Occurrence of rare borate minerals: Veatchite-A, tunellite, teruggite and cahnite in the Emet borate deposit, Turkey. *Mineraleum Deposita*, 19, 217-226, 1984.





Evsel elektrik ihtiyacının hibrit yenilenebilir enerji sistemleriyle karşılanması: Bursa örneği

Providing domestic electricity need with hybrid renewable energy systems: Bursa case study

Sümeyye Adalı¹ , Melike Yalılı Kılıç^{2,*} 

^{1,2} Bursa Uludağ Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 16059, Bursa Türkiye

Özet

Gündelik yaşamın vazgeçilmez bir ögesi olan enerjiye olan talep, teknolojik gelişmeler ve dünya nüfusuna paralel olarak artış göstermektedir. Ülkeler için önemli bir gelişmişlik göstergesi sayılan enerjinin kaliteli ve sürekli olarak temin edilmesi büyük önem taşımaktadır. Fosil tabanlı enerji kaynaklarının dünya üzerinde sınırlı olması ve çevre üzerinde oluşturduğu baskı, ülkeleri alternatif enerji kaynaklarından yararlanma konusunda teşvik etmektedir. Bu çalışmada, evsel elektrik ihtiyacının karşılanması amacıyla HOMER Pro programı kullanılarak müstakil bir konutun 2020 yılı elektrik tüketim verileri kullanılarak şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız hibrit yenilenebilir enerji sistemleri tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan enerji sistemlerinin kurulum ve işletim maliyeti hesaplanarak, sistemlerin karşılaştırılması yapılmıştır. Şebekeden bağımsız sistem için toplam net bugünkü maliyet 75749,99 TL (9159,6 \$) olarak hesaplanırken, şebekeye bağlı sistem için toplam net bugünkü maliyet 11304,57 TL (1366,9 \$) olarak hesaplanmıştır. Şebekeye bağlı sistemin konut için en uygun sistem olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Yenilenebilir enerji, Elektrik, HOMER Pro, Enerji sistemi tasarımı, Konut elektrigi

1 Giriş

Sanayi devriminden bu yana enerji elde etmek amacıyla yoğun olarak kullanılan fosil yakıtların tükenmeye başlaması ve çevre üzerinde oluşturduğu yüksek tahribat, günümüzde alternatif enerji kaynaklarının kullanımını gündeme getirmiştir [1]. Fosil yakıtlara göre çok düşük seviyede çevresel etkilere sahip olan yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanma, ülkelerin temiz ve tükenmez nitelikteki enerji temini hedeflerinde öne çıkmaktadır [2].

Dünyadaki fosil kaynak rezervleri incelendiğinde, petrolün 54 yıl, doğalgazın 64 yıl, kömürün ise 112 yıl yetecek düzeyde olduğu öngörülmektedir. Dünya genelinde elektrik üretiminin %41'i kömür, %21'i doğalgaz, %16'sı hidroelektrik, %14'ü nükleer, %6'sı petrol ve %2'si ise yenilenebilir enerji santrallerinden sağlanmaktadır [3-5]. Ülkemizde 2019 yılında toplam elektrik üretiminin %37.4'ü kömürden, %29.4'ü hidrolik kaynaklardan, %18.4'ü

Abstract

Demand for energy, which is an indispensable element of daily life, increases in parallel with technological developments and world population. Quality and continuous supply of energy, which is considered an important development indicator for countries, is of great importance. The limited fossil-based energy resources in the world and their pressure on the environment encourage countries to utilize alternative energy resources. In this study, grid-connected and off-grid hybrid renewable energy systems were designed using the HOMER Pro program to meet the domestic electricity need, using the electricity consumption data of 2020 for a detached house. The installation and operating costs of the designed energy systems were calculated and the systems were compared. The total net present cost for the system independent of the grid was calculated as 75749,99 TL (9159,6 \$), while the total net present cost for the system connected to the grid was calculated as 11304,57 TL (1366,9 \$). It has been determined that the system connected to the grid is the most suitable system for the house.

Keywords: Renewable energy, Electricity, HOMER Pro, Energy system design, Residential electricity

doğalgazdan, %7.2'si rüzgar enerjisinden, %3.1'i güneş enerjisinden, %3'ü jeotermal enerjiden, %1.14'ü biyoyakıtlardan sağlanmış olup, 2018 yılından farklı olarak doğalgaz dışındaki kaynaklardan yararlanma oranında artış gerçekleşmiştir [6].

Dünyadaki başlıca yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, biyokütle enerjisi, jeotermal enerji, hidrolik enerji, dalga enerjisi ve nükleer enerji yer almaktadır. Yıllık ortalama %9.8 gibi yüksek büyüme oranına sahip olan bu kaynakların, 2040 yılına gelindiğinde enerji üretimindeki payının %16.1 olacağı öngörülmektedir [7, 8]. Enerji projeksiyonlarına göre 2050 yılında rüzgâr ve güneş enerjisinin dünya genelinde elektrik enerjisi talebinin yaklaşık %50'sini karşılayacağı belirtilmektedir [9].

Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde en bol, temiz ve çevre dostu olan güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde yer

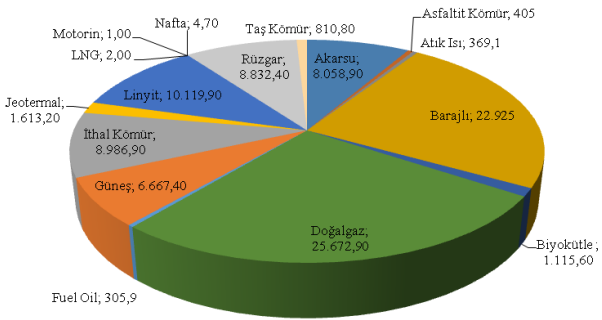
* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: myalili@uludag.edu.tr

Geliş / Received: 26.05.2021 Kabul / Accepted: 01.07.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.943002

alan füzyon süreci ile ortaya çıkmaktadır [10]. Güneş enerjisi şiddeti yaklaşık 1370 W/m^2 olup, bu değer $0-1100 \text{ W/m}^2$ 'si yeryüzüne ulaşmaktadır. Güneş enerjisinin dünyaya ulaşan küçük bir bölümü bile mevcut enerji tüketiminden kat kat fazladır [11]. Bu nedenle güneş enerjisi, alternatif enerji kaynağı olarak önemli bir yatırım ve gelişim alanı bulmaktadır.

Ülkemizin yer aldığı coğrafi konum, güneş enerjisinden faydalanma noktasında yüksek avantajlar barındırmaktadır [12]. Türkiye Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasında (GEPA) ülkemizin toplam güneşlenme süresi yıllık 2741.07 saat (günlük 7.50 saat), toplam ışınım şiddeti yıllık 1527.46 kWh/m^2 (günlük 4.18 kWh/m^2) olarak belirtilmektedir [11]. Güneş enerjisi kullanımında önde gelen Almanya'nın güneş ışınım değerinin yıllık 1200 kWh/m^2 olduğu düşünülürse, ülkemizin güneş enerjisi potansiyelinin birçok Avrupa ülkesinden yüksek değerde olduğu, fakat taşıdığı potansiyelden yeterli ölçüde yararlanılmadığı görülmektedir [13]. Ülkemizde 2020 yılında kaynakların elektrik üretimine katkısı incelendiğinde, doğalgazın 25672.9 MW 'la ilk sırada yer aldığı, doğalgazı sırasıyla 22925 MW 'la barajların, 10119.9 MW 'la linyitin izlediği görülmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Türkiye'de kaynaklara göre elektrik kurulu gücü (MW) [14]

Ülkemizde 2020 yılı toplam elektrik kurulu gücü 95890.6 MW değerine ulaşmış olup, bu gücün 6667.4 MW 'lık kısmı güneş enerjisinden sağlanmıştır. 2020 yılı sonunda ülkemizdeki güneş santrali sayısı (7481'i lisanssız olmak üzere) toplam 7518'e ulaşmıştır [14].

Bu çalışmada, Bursa ilinde yer alan müstakil bir konutun elektrik enerjisi ihtiyacının karşılanması amacıyla hibrit yenilenebilir enerji sistemi tasarlanmış ve sistemin maliyet ve uygulanabilirliği HOMER Pro programı kullanılarak belirlenmiştir.

2 Güneş enerji sistemlerinin Dünya'da ve Türkiye'de kullanım durumu

Güneşten elektrik eldesi amacıyla üretilen fotovoltaik sistemler dünya genelinde giderek yaygınlaşmakta ve farklı kullanım alanları bulmaktadır. Dünya yenilenebilir enerji istihdamında ilk sırada yer alan bu sistemler aracılığıyla güneş enerjisinin doğrudan elektrik enerjisine çevrimi gerçekleştirilmektedir [10, 15]. Uluslararası enerji ajansına göre, 2050 yılında dünya genelinde üretilen elektriğin

%11'inin fotovoltaik sistemlerle elde edileceği öngörülmektedir [2, 16].

Avrupa Birliği ülkeleri ve Türkiye'de üretilen enerjinin yaklaşık %40'ının binalarda tüketildiği belirtilmektedir [17, 18]. Özellikle güneş enerji sistemlerinin binalarda kurulum ve kullanımı diğer yenilenebilir sistemlere kıyasla daha kolay olduğu için, güneş pilleriyle donatılmış binaların sayısında artış yaşanmaktadır [19]. Her alanda ve her büyüklükteki altyapı projelerinde kullanılabilen fotovoltaik paneller, uzun ömürlü ve çevre dostu teknolojiler olması dolayısıyla yoğun olarak tercih edilmektedir [20]. Teknolojinin gelişimiyle birlikte yüksek katlı binalarda da önemli bir kullanım alanına sahip olan güneş panelleri bu yapılarda hem enerji eldesinde bir araç olmakta hem de yapılara güneş kırıcı olarak yerleştirilerek kullanıcılar için konfor unsuru oluşturmaktadır. Bununla birlikte cephelerde dış kaplama ürünü olarak tercih edilerek yapılarda inşa aşamasında tasarruf elde edilmesine ve yapıların estetik açıdan değer kazanmasına olanak sağlamaktadır [21]. Ülkemizde ise güneş panelleri çoğunlukla sera ve binaların ısıtılmasında, park, bahçe ve otopark aydınlatmalarında, zirai ürünlerin kurutulmasında ve elektrik enerjisi üretiminde kullanılmaktadır [22].

Yenilenebilir enerji sistemlerinde, çevre ve atmosfer koşullarına bağlı olarak zaman içerisinde dalgalanmalar olmaktadır. Elektrik kesintisi gibi olası nedenlerle veya gereğinden yüksek kapasitede güneş enerjisi kurulumunu önlemek amacıyla dizel jeneratör, kurulacak enerji sistemine dâhil edilerek kurulum maliyeti düşürülebilmektedir [23,24].

Literatür incelendiğinde yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik eldesi ile ilgili birçok çalışmanın yer aldığı görülmektedir. Adıyaman ili güneş enerjisi potansiyeli ve kullanım olanaklarının araştırıldığı çalışmada, güneş enerjisi yatırımlarının il için büyük avantajlar taşıdığı belirtilmektedir [25]. Balıkesir ilinde şebekeden bağımsız ticari bir tavuk çiftliğinin elektrik ihtiyacını karşılamak amacıyla HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewable) programı kullanılarak dizel, fotovoltaik-dizel-akü, rüzgâr-dizel-akü, fotovoltaik-rüzgâr-dizel akü sistem kombinasyonlarına sahip farklı hibrit sistemlerinin maliyet analizi ve çevresel performansları değerlendirilmiştir. Yapılan analizler sonucu fotovoltaik-rüzgâr-jeneratör-akü sisteminin $1088 \text{ \$}$ ile en avantajlı sistem olduğu belirlenmiştir [26]. Yalova'da yer alan bir çiftlik evinin elektrik ihtiyacının karşılanması amacıyla şebekeden bağımsız hibrit enerji sisteminin uygulanabilirliğinin incelendiği çalışmada, HOMER programıyla hibrit enerji sistemi için model oluşturulmuştur. Uygulanabilirlik açısından optimum şartları sağlayan 5 kW kapasiteye sahip PV, 4.5 kW kapasiteye sahip dizel jeneratör ve 18 adet 1 kWh kapasiteye sahip akü grubu ve 3 kWh değerine sahip konvertör ünitelerinden oluşan sistemin ilk yatırım maliyeti $30150 \text{ \$}$, işletme maliyeti $1309 \text{ \$}$, birim enerji maliyeti $0.446 \text{ \$}$ ve proje ömrü boyunca sistemin net bugünkü maliyeti $80953 \text{ \$}$ olarak belirlenmiştir [27]. Özbay ve Sarıışık [28] tarafından yatılarda güneş enerji sistemleri kullanımı, sistemlerin verimliliği, sağladığı ekonomik ve çevresel katkılar araştırılmıştır. Yazıcı vd. [29] tarafından HOMER Pro programı kullanılarak rüzgar, güneş ve kojenerasyon

santrallerinden oluşan örnek bir akıllı şebeke sistemi tasarlanmış, santrallerin şebekeye elektrik üretimi ve yük paylaşımı analiz edilerek, her bir santralin ve örnek sistemin amortisman süresi hesaplanmıştır. Rüzgâr, güneş ve kojenerasyon santrallerinde toplam 4232.2 MWh elektrik enerjisi üretilmiş; üretilen enerjinin 125.39 kWh enerjinin şebekeye satışı gerçekleşmiştir. Yatırım maliyeti 3.3 Milyon TL olan 500 kW'lık güneş santralının 4.48 yılda, 3.55 Milyon TL yatırım maliyetli 500 kW'lık rüzgâr santralının 4.38 yılda, 1.26 Milyon TL yatırım maliyeti olan 200kW gücündeki gaz motorlu kojenerasyon santralının 2.38 yılda kendisini amorti edebileceği belirlenmiş olup hibrit sistemin toplam amortisman süresi 3.91 yıl olarak hesaplanmıştır. Singh vd. [30] tarafından Kavaratti adası için en düşük enerji maliyetine sahip hibrit rüzgâr-fotovoltaik-akü enerji sistemi HOMER Pro programı yardımıyla tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemin 25 yıllık proje ömrü için enerji maliyeti 0.10995 \$/kWh, net bugünkü maliyeti 15039705 \$ olarak belirlenmiştir.

3 Materyal ve metot

Bu çalışmada, Bursa ili Yıldırım ilçesine bağlı Sinandede mahallesinde bulunan 137 m² arsa alanına ve 120 m²'lik kullanım alanına sahip iki katlı, iki kişinin yaşadığı müstakil bir konutun elektrik ihtiyacını karşılamak amacıyla 2020 yılı verileri baz alınarak hibrit yenilenebilir enerji sistemi tasarımı yapılmıştır. Az katlı konut varlığı nedeniyle seçilen bölgede, küçük ölçekli yenilenebilir enerji sistemlerinin konut elektrik ihtiyacının karşılanması noktasında barındırdığı avantaj ve dezavantajları belirlemek için kurulacak olan yenilenebilir enerji sistem tasarımı HOMER Pro programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Bursa ili 40° boylam ve 28 - 30° enlem daireleri arasında ülkemizin kuzeybatısında, Marmara Denizi'nin güneydoğusunda yer almaktadır. İlin nüfusu 2020 yılında 3101833'e ulaşmıştır [31]. Toplam 11 bin 027 km²'lik alana sahip olan Bursa, 17 ilçe, 230 belde ve 659 köy yerleşimine sahiptir. Toplam alanın %17'si ovalarla kaplıdır. Rakımı 155 m olan Bursa, genelde ılıman bir iklime sahiptir. Bununla birlikte, iklim bölgelere göre de değişiklik gösterebilmektedir. Kuzeyde Marmara Denizi'nin yumuşak ve ılık iklimine karşılık, güneyde Uludağ'ın sert iklimi yaşanmaktadır. Şehrin en sıcak ayları temmuz ve eylül iken, en soğuk ayları ise şubat ve marttır. İlin yaklaşık %35'i dağlarla kaplıdır [32].

Amerika'da Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı tarafından geliştirilen HOMER, dünyada yaygın olarak kullanılan enerji modelleme programıdır. HOMER programı fotovoltaik, rüzgâr türbinleri, akarsu hidro elektrik santrali, dizel, benzin, biyogaz, mikro türbinler, çift yakıtlı jeneratörler ve yakıt hücrelerini içeren farklı tür ve kombinasyonlardaki birçok enerji sistemi modellemesinde kolayca kullanılabilir [2]. Teknoloji maliyetleri, enerji kaynaklarına ulaşılabilirlik ve geniş teknoloji seçim imkanlarını içeren teknik ve ekonomik fizibilite değerlendirmelerini içeren optimizasyon ve duyarlılık analizi sonucunda sistemlerin ekonomik uygulanabilirliği, en verimli-en ekonomik konfigürasyonu ve iyileştirmeleri, değişkenlerin ve belirsizliklerin etkisi bu yazılım

kullanılarak belirlenebilmektedir [2, 33]. HOMER programındaki olası karar değişkenleri arasında fotovoltaik dizisinin boyutu, rüzgâr türbin sayısı, batarya sayısı, AC – DC dönüştürücünün boyutu, Sevk stratejisi (sistemin nasıl çalıştığını belirleyen kurallar dizisi) vb. yer almaktadır. Optimizasyon sürecinde modellerle ilgili karar değişkenlerinin optimal değeri belirlenmektedir. Model kısıtlamaları, maksimum yıllık kapasite açığı ve minimum yenilenebilir fraksiyon olarak belirtilmektedir [34]. Yapılan çalışmada model duyarlılığı minimum yenilenebilir fraksiyona göre test edilmiştir.

4 Bulgular ve tartışma

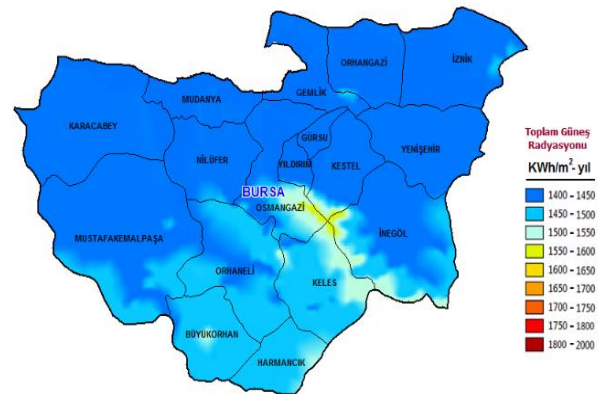
Çalışma kapsamında örnek olarak seçilen konutun 2020 yılına ait aylık elektrik tüketim değerleri incelenmiş ve Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1.İncelenen konuta ait 2020 yılı aylık elektrik tüketim değerleri

Aylar	Elektrik Tüketimi (kWh)	Ortalama Elektrik Tüketimi (kWh/gün)	Tutar (TL)
Ocak	103.571	3.237	73
Şubat	110.806	3.574	79
Mart	94.995	3.276	68
Nisan	93.849	3.352	66
Mayıs	104.245	3.475	74
Haziran	149.722	4.830	107
Temmuz	146.791	4.735	104
Ağustos	183.300	5.391	130
Eylül	153.243	5.284	109
Ekim	138.523	4.777	100
Kasım	128.796	4.025	97
Aralık	106.750	3.558	80
Toplam = 1514.591		Yaklaşık yıllık ortalama = 4.13	Toplam = 1087

Tablo 1 incelendiğinde elektrik tüketiminin 183.300 kWh ile ağustos ayında en yüksek değerde, 93.849 kWh ile nisan ayında en düşük değerde gerçekleştiği belirlenmiştir.

Şekil 2'de Bursa ili yıllık güneş radyasyon haritası yer almaktadır.



Şekil 2.Bursa İli yıllık güneş radyasyon haritası [35]

Çalışmanın yürütüldüğü bölgeye ait ortalama günlük radyasyon değerleri ve hava açıklık indeksleri (Tablo 2) HOMER programı kullanılarak NASA Yüzey meteorolojisi ve Güneş Enerjisi veri tabanından elde edilmiştir.

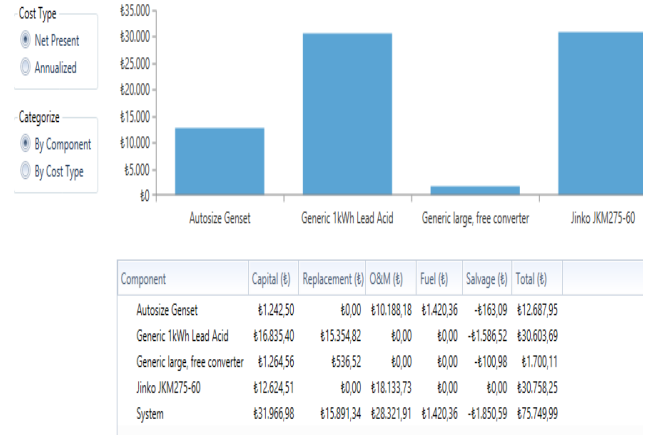
Tablo 2. Çalışmanın yürütüldüğü bölgeye ait açıklık indeksi ortalama günlük radyasyon ve rüzgâr hızı değerleri

Aylar	Açıklık indeksi	Günlük radyasyon (kWh/m ² /Gün)	Ortalama Rüzgâr Hızı (m/s)
Ocak	0.397	1.670	5.840
Şubat	0.412	2.310	6.270
Mart	0.459	3.490	5.420
Nisan	0.464	4.460	4.800
Mayıs	0.536	5.910	4.280
Haziran	0.579	6.710	4.270
Temmuz	0.602	6.790	5.070
Ağustos	0.587	5.930	5.200
Eylül	0.567	4.690	4.910
Ekim	0.484	2.990	5.560
Kasım	0.417	1.880	5.500
Aralık	0.367	1.390	5.740

Çalışma kapsamında incelenen konut için, hibrit enerji sistemleri şebekeden bağımsız ve şebekeye bağlı olarak iki ayrı şekilde incelenmiştir. Şebekeye bağlı sistemde yenilenebilir enerji eldesi için fotovoltaik panellerden yararlanılmış olup, şebekeden bağımsız sistemde fotovoltaik panellerin yanı sıra enerji depolama amacıyla batarya ve elektrik ihtiyacının karşılanamadığı durumlar için dizel jeneratör kurulumu gerçekleştirilmiştir. Şekil 3'te incelenen konut için oluşturulan sistem tasarımları yer almaktadır. Şebekeden bağımsız sistem için en uygun yenilenebilir fraksiyon oranı yapılan duyarlılık analizi neticesinde %40 olarak belirlenmiştir. Dizel yakıt fiyatı 6.47 TL/L olarak alınmıştır [36]. Şebekeden bağımsız sistemde en yüksek emisyon değeri, 44.5 kg CO₂/yıl olarak belirlenmiştir. Şebekeden bağımsız enerji sisteminin maliyeti 75749.99 TL (9159.6 \$) olarak hesaplanmıştır [37]. Şebekeden bağımsız sistem için yenilenebilir fraksiyon, jeneratör minimum yük

oranı için belirlenen değerlere göre en uygun sisteme ait analiz sonuçları Tablo 3-6'da yer almaktadır.

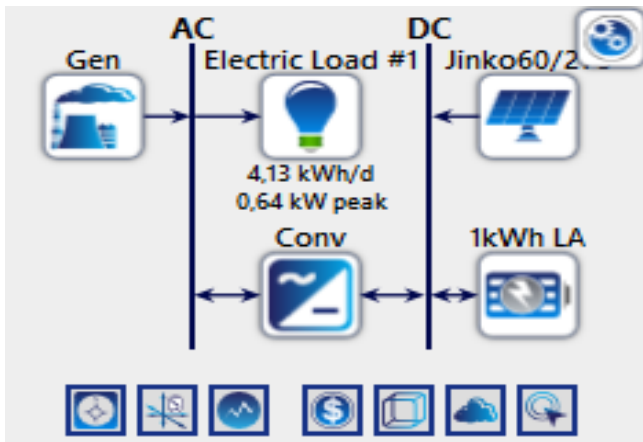
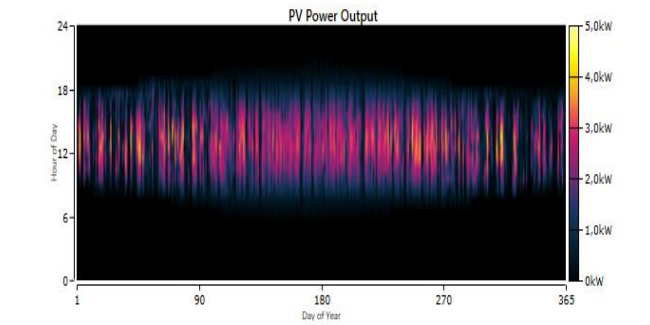
Tablo 3. Şebekeden bağımsız sisteme ait maliyet özeti



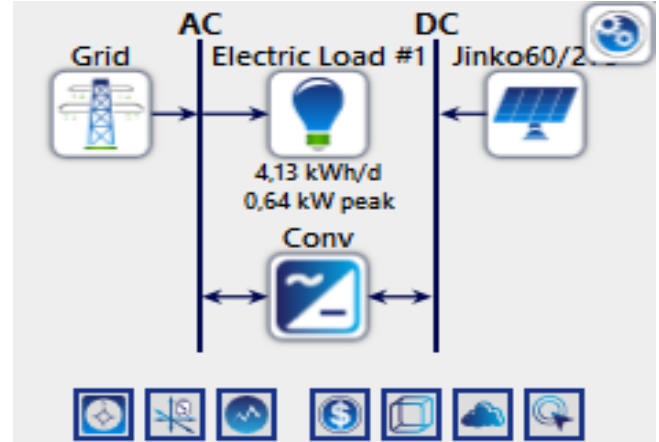
Tablo 4. Şebekeden bağımsız sistem PV güç çıkışı

Quantity	Value	Units
Rated Capacity	3,86	kW
Mean Output	0,612	kW
Mean Output	14,7	kWh/d
Capacity Factor	15,9	%
Total Production	5,358	kWh/yr

Quantity	Value	Units
Minimum Output	0	kW
Maximum Output	4,05	kW
PV Penetration	355	%
Hours of Operation	4,393	hrs/yr
Levelized Cost	0,444	\$/kW



(a)

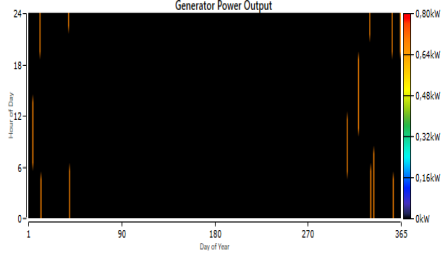


(b)

Şekil 3. İncelenen konut için oluşturulan sistem tasarımları (a) şebekeden bağımsız sistem ve (b) şebekeye bağlı sistem

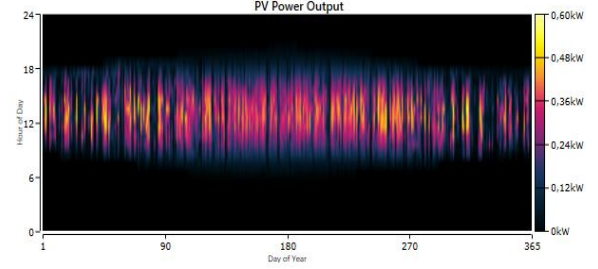
Tablo 5. Şebekeden bağımsız sistem jeneratör güç çıkışı

Quantity	Value	Units	Quantity	Value	Units	Quantity	Value	Units
Hours of Operation	74,0	hrs/yr	Electrical Production	52,5	kWh/yr	Fuel Consumption	17,0	L
Number of Starts	9,00	starts/yr	Mean Electrical Output	0,710	kW	Specific Fuel Consumption	0,323	L/kWh
Operational Life	203	yr	Minimum Electrical Output	0,710	kW	Fuel Energy Input	167	kWh/yr
Capacity Factor	0,845	%	Maximum Electrical Output	0,710	kW	Mean Electrical Efficiency	31,4	%
Fixed Generation Cost	11,0	\$/hr						
Marginal Generation Cost	1,63	\$/kWh						



Tablo 8. Şebekeye bağlı sistem PV güç çıkışı

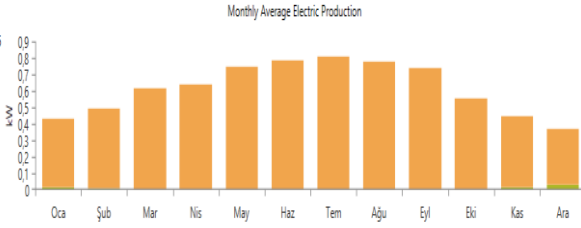
Quantity	Value	Units	Quantity	Value	Units
Rated Capacity	0,519	kW	Minimum Output	0	kW
Mean Output	0,0823	kW	Maximum Output	0,545	kW
Mean Output	1,97	kWh/d	PV Penetration	47,8	%
Capacity Factor	15,9	%	Hours of Operation	4,393	hrs/yr
Total Production	721	kWh/yr	Levelized Cost	0,444	\$/kWh



Tablo 6. Şebekeden bağımsız sistemde elektrik üretimi

Production	kWh/yr	%	Consumption	kWh/yr	%	Quantity	kWh/yr	%
Jinko JKM275-60	5.358	99,0	AC Primary Load	1.509	100	Excess Electricity	3.658	67,6
Autosize Genset	52,5	0,971	DC Primary Load	0	0	Unmet Electric Load	0	0
Total	5.411	100	Total	1.509	100	Capacity Shortage	0	0

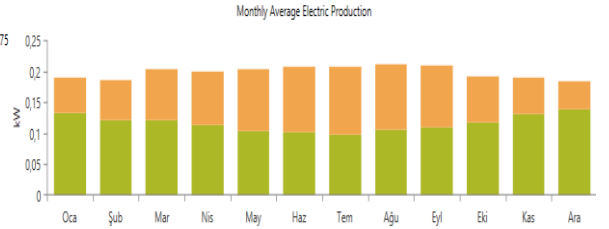
Quantity	Value
Renewable Fraction	96,5
Max. Renew. Penetration	5.494



Tablo 9. Şebekeye bağlı sistemde elektrik üretimi

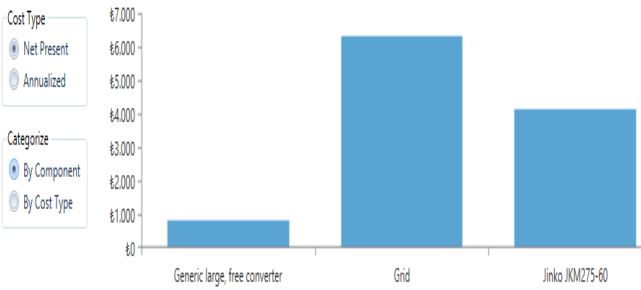
Production	kWh/yr	%	Consumption	kWh/yr	%	Quantity	kWh/yr	%
Jinko JKM275-60	721	41,5	AC Primary Load	1.509	88,7	Excess Electricity	0,317	0,0182
Grid Purchases	1.017	58,5	DC Primary Load	0	0	Unmet Electric Load	0	0
Total	1.738	100	Total	1.701	100	Capacity Shortage	0	0

Quantity	Value
Renewable Fraction	40,2
Max. Renew. Penetration	117



Şebekeye bağlı sisteme ait simülasyon sonuçları **Tablo 7-10'** da yer almaktadır.

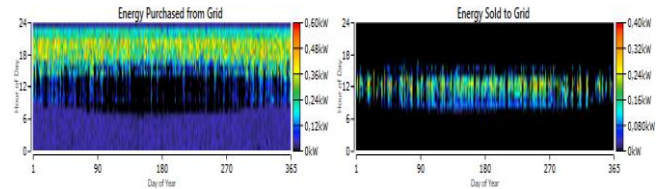
Tablo 7. Şebekeye bağlı sisteme ait maliyet özeti



Component	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$)	Fuel (\$)	Salvage (\$)	Total (\$)
Generic large, free converter	\$623,96	\$264,73	\$0,00	\$0,00	-\$49,83	\$838,87
Grid	\$0,00	\$0,00	\$6.329,18	\$0,00	\$0,00	\$6.329,18
Jinko JKM275-60	\$1.697,81	\$0,00	\$2.438,71	\$0,00	\$0,00	\$4.136,52
System	\$2.321,77	\$264,73	\$8.767,89	\$0,00	-\$49,83	\$11.304,57

Tablo 10. Şebekeden alınan ve üretilen enerji değerleri

Month	Energy Purchased (kWh)	Energy Sold (kWh)	Net Energy Purchased (kWh)	Peak Demand (kW)	Energy Charge (\$)	Demand Charge (\$)
May	76	21	55	1	\$34,65	\$0
June	73	21	53	1	\$32,22	\$0
July	73	23	50	1	\$32,16	\$0
August	79	21	58	0	\$36,26	\$0
September	79	22	58	1	\$36,07	\$0
October	87	14	73	1	\$42,79	\$0
November	95	11	84	1	\$47,67	\$0
December	103	7	96	1	\$53,23	\$0
Annual	1.017	193	825	1	\$489,59	\$0



Şebekeye bağlı sistem için şebekeden çekilen elektrik maliyeti 0.54 TL/ kW; şebekeye satılan elektrik maliyeti 0.31TL/kW olarak programa girilmiştir [38]. Şebekeye bağlı enerji sisteminin maliyeti 11304.57 TL (1366.9 \$) olarak hesaplanmıştır [37].

Tasarlanan sistemlerin kWh başına enerji tüketimleri şebeke bağlantısız sistem için 3.88 TL, şebekeye bağlı sistem için 0.514 TL olarak hesaplanmış olup, şebekeye bağlı sistemin incelenen konut için karlı bir enerji yatırımı olduğu görülmektedir. Şebekeden bağımsız enerji sisteminin maliyeti 75749.99 TL (9159.6 \$), şebekeye bağlı enerji sisteminin maliyeti 11304.57 TL (1366.9 \$) olarak hesaplanmış olup, şebeke bağlantısının bakım ve işletme maliyetinin şebekeden bağımsız sisteme kıyasla daha düşük olduğu gözlenmiştir.

Bu çalışmaya benzer olarak Alkan vd. [39] bir evin elektrik ihtiyacını karşılamak için fotovoltaik sistem tasarımı gerçekleştirmiştir. Şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız olmak üzere iki farklı şekilde oluşturulan sistem tasarımlarında şebekeden bağımsız sabit sistem maliyetinin yaklaşık 11000 \$ olarak gerçekleşeceği belirtilmiştir. Türkdoğan vd. [24] 40 hanelik bir topluluğun elektrik ve termal yük ihtiyaçlarının karşılanması amacıyla HOMER programıyla şebekeden bağımsız olarak tasarlanan hibrit sistemin kurulum maliyeti 215958 \$, operasyon maliyeti 18029 \$ ve tüm projenin net bugünkü maliyeti 598958 \$ olarak hesaplanmıştır. Hane başına 15000 \$ değerinde yapılacak enerji yatırımının 25 yıllık elektrik ve ısıtma ihtiyacını karşılayabileceği öngörülmektedir.

5 Sonuçlar

Yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanma çalışmaları tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de yaygınlaşmaktadır. Enerji üretiminde birçok alanda kullanım olanağı bulunan yenilenebilir enerji sistemleri, konutların enerji ihtiyacını karşılama açısından büyük avantajlar barındırmaktadır. Güneş enerjisine dayalı üretim sistemleri;

- Çevre dostu, yerli ve yenilenebilir kaynak niteliğinde olması
- İşletme masrafinin düşük olması
- Kullanıldığı bölgelerde istihdam olanaklarını artırması
- Enerjide dışa bağımlılığı azaltması
- -Enerji üretiminde iletim ve dağıtım kayıplarının önlenmesi gibi birçok önemli avantaj sağlamaktadır.

Bu çalışmada, çatı uygulamalarında yoğun olarak tercih edilen fotovoltaik güneş panellerinin esvel elektrik üretimi amacıyla Bursa'nın Yıldırım ilçesindeki müstakil bir konut için şebekeye bağlı ve şebekeden bağımsız hibrit enerji üretim sistemi tasarımı yapılmıştır. Sistemlerin kWh başına enerji tüketimleri şebekeden bağımsız sistem için 3.88 TL, şebekeye bağlı sistem için 0.514 TL olarak hesaplanmış; şebekeye bağlı şekilde işletilen sistemin maliyet açısından daha uygun olduğu belirlenmiştir. 2020 yılı elektrik tüketim verileri dikkate alındığında, 1087 TL olan yıllık enerji masrafinin şebekeye bağlı olarak işletilen yenilenebilir enerji sistemiyle 489.59 TL'ye düştüğü belirlenmiştir. Sağlanan bu tasarrufla enerji sisteminin fotovoltaik panel ve dönüştürücüden oluşan yenilenebilir kısmının kendini 8.4 yılda amorti edebileceği bulunmuştur. Elektrik üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanma oranının artırılmasının, fosil yakıtlara olan ihtiyacı düşürülmesi hususunda en etkili çözüm yolu olduğu ve bu yakıtların

oluşturduğu çevresel ve ekonomik baskının azaltılmasında önemli bir rol oynayacağı düşünülmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %10

Kaynaklar

- [1] S. Uçar ve N. Kokulu, Antalya bölgesinde yeni tasarlanacak binalarda güneş panellerinin kullanım potansiyelinin incelenmesi. 4. Ulusal Yapı Kongresi ve Sergisi, sayfa 377-386, Antalya, Türkiye, 6-8 Aralık 2018.
- [2] E. Keskin, Türkiye iklim koşullarında fotovoltaik güç sistemlerinin tasarımı ve maliyet analizi. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2012.
- [3] BP, Statistical review of world energy 2019. <https://www.bp.com/content/>, Accessed 10 March 2021.
- [4] IEA, Key world energy statistics 2019. <https://webstore.iea.org/key-world-energy-statistics-2019>, Accessed 10 April 2021.
- [5] A.N. Çelik ve F. Koç, Polikristal tür bir fotovoltaik panelin I-V karakteristiğinin analitik modellenmesi ve deneysel doğrulanması. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 8, 2491-2515, 2020. <https://doi.org/10.29130/dubited.789691>
- [6] EÜAŞ, 2019 Yılı Elektrik Üretimi ve Ticareti Sektör Raporu. Strateji Geliştirme Dairesi Başkanlığı.
- [7] T. C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Dünya ve Türkiye Enerji ve Tabii Kaynaklar Görünümü Raporu, 1-83, 2017.
- [8] R. Kayabaşı ve M. Kaya, Fotovoltaik modüllerin atık ısılarından termoelektrik jeneratör ile elektrik üretimi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 16, 310-324, 2019. <https://doi.org/10.31590/ejosat.562859>
- [9] M. Oral, Solar energy potential of Turkey and evaluation of PV applications in local scale: case of Karabük province. International Journal of Geography and Geography Education (IGGE), 42, 482-503, 2020. <https://doi.org/10.32003/igge.743513>
- [10] E. F. Akyürek, K. Geliş ve M. Yoladı, Farklı gölgeleme durumlarının fotovoltaik panel karakteristiği üzerine etkisi. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11 (1), 161-168, 2021. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.766232>
- [11] Anonim, Güneş. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes>, Accessed 4 April 2021.
- [12] M. Eremkere, Fotovoltaik tasarımların teknik, ekonomik ve çevresel açılardan analizi: Tekirdağ Bağcılık Araştırma Enstitüsü üzüm suyu işleme tesis çatısı örneği. Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2019.
- [13] E. Özgür, Türkiye'de güneş enerjisi. <https://www.mmo.org.tr/sites>, Accessed 5 April 2021.
- [14] TEİAŞ, Kurulu Güç Raporu- Aralık 2020. Yük Tevzi Dairesi Başkanlığı.

- [15] M. Güllü ve Z. Kartal, Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynaklarının istihdam etkisi. *Sakarya İktisat Dergisi*, 10 (1), 36-65, 2021.
- [16] G. Bayrak ve M. Cebeci, Balık çiftlikleri için tasarlanan, şebekeden bağımsız, 1.1 kW’lık kurulu güce sahip PV sistemin performans analizi. 6th International Advanced Technologies Symposium, pp. 167-171, Elazığ, Türkiye, 16-18 May 2011.
- [17] M. Anbarcı, Ö. Giran ve İ.H. Demir, Uluslararası yeşil bina sertifika sistemleri ile Türkiye’deki bina enerji verimliliği uygulaması. *e-Journal of New World Sciences Academy*, 7 (1), 368-383, 2012. <https://doi.org/10.12739/nwsaes.v7i1.5000066898>
- [18] M. E. Çamlıbel, G. Alhanlıoğlu ve D. Uğurlu, Türkiye’de yeni yapılacak konut projelerinin enerji verimliliği ile elde edilecek tasarruf ve bu tasarrufun ulusal enerji ihtiyacını ne seviyede azaltacağına analizi. *Journal of Istanbul Technical University Foundation*, 65, 62-68, 2014.
- [19] U. Yılmaz, Gökçeada’da yenilenebilir enerji kaynaklarıyla elektrik üretimi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2008.
- [20] A. Nayir ve R. Pecen, Yenilenebilir enerji sistemleri gözlemlene ve uygulama laboratuvarı. *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu (FEEB 2011)*, sayfa 279-283, Elazığ, 2011.
- [21] M. Altın, (Fotovoltaik malzeme ile) elektrik üreten cepheler ve çatılar. http://www.solar-academy.com/menuis/Elektrik-Ureten-Cepheler-ve-Catilar_020009.pdf, Accessed 28 June 2021.
- [22] E. A. Yılmaz ve H. C. Özic, Türkiye’nin yenilenebilir enerji potansiyeli ve gelecek hedefleri. *Ordu Üniversitesi Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi*, 8 (3), 525-535, 2018.
- [23] Z. Öztürk, S. Tosun ve A. Öztürk, Örnek bir hibrit yenilenebilir enerji sisteminin HOMER ile modellenmesi, ekonomik ve teknik yönden analizleri. *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2 (2), 286-299, 2019.
- [24] S. Türkdöğün, M.T. Mercan ve T. Çatal, Şebekeden bağımsız hibrit enerji sistemleri kullanılarak 40 hanelik bir topluluğun elektrik ve termal yük ihtiyacının karşılanması: teknik ve ekonomik analizleri. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (18), 476-485, 2020. <https://doi.org/10.31590/ejosat.688048>
- [25] R. Behçet, H. Oral ve H. Gül, Adıyaman ilinin güneş enerjisi potansiyeli ve kullanımı. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 3 (2), 52-67, 2013.
- [26] E. Akyüz, M. Bayraktar ve Z. Oktay, Hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin endüstriyel tavukçuluk sektörü için ekonomik açıdan değerlendirilmesi: Bir uygulama. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11 (2), 44-54, 2009.
- [27] S. Türkdöğün, S. Dilber ve B. Çam, Hibrit enerji sistemlerinin şebekeden bağımsız bir çiftlik evinde uygulanabilirliğinin ekonomik ve teknik açıdan incelenmesi. *Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3 (2), 52-65, 2018. <https://doi.org/10.33484/sinopfdb382391>
- [28] K. Özbay ve M. Sarıışık, Yatlarda kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarından güneş enerjisi üzerine bir değerlendirme. *Journal of Gastronomy Hospitality and Travel*, 3 (2), 234-243, 2020. <https://doi.org/10.33083/joghat.2020.46>
- [29] F. Yazıcı, M.E. Başoğlu ve B. Çakır, Akıllı şebeke bileşenleri ve yapısal analizi. *EMO Bilimsel Dergi*, 8(2), 121-126, 2018.
- [30] G. Singh, P. Baredar, A. Singh and D. Kurup, Optimal sizing and location of PV, wind and battery storage for electrification to an Island: A case study of Kavaratti, Lakshadweep. *Journal of Energy Storage*, 12, 78-86, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.est.2017.04.003>
- [31] Anonim, Bursa 2020 nüfusu. <https://www.nufusu.com/il/bursa-nufusu>, Accessed 11 March 2021.
- [32] T.C. Kültür ve Turizm Bakanlığı, Bursa ili genel bilgiler. Bursa İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü. <https://bursa.ktb.gov.tr/TR-70228/bursa-ili-genel-bilgiler.html>, Accessed 11 March 2021.
- [33] R. Erkoç, Güneş enerjisi santrallerinin modellenmesi, ekonomik analizi ve değerlendirme: Almanya ve Türkiye uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi, Ordu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2019.
- [34] H. Zahboune, S. Zouggar, G. Krajacic, P.S. Varbanov, M. Elhafyani and E. Ziani, Optimal hybrid renewable energy design in autonomous system using modified electric system cascade analysis and homer software. *Energy Conversion and Management*, 126, 909-922, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.061>
- [35] Anonim, Bursa güneş enerjisi potansiyel atlası. <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/pages/16.aspx>, Accessed 4 April 2021.
- [36] Anonim, Bursa akaryakıt fiyatları. <https://www.opet.com.tr/bursa-akaryakit-fiyatları> Accessed 22 April 2021.
- [37] Anonim, Dolar ne kadar? <https://www.trthaber.com/haber/ekonomi/>, Accessed 22 April 2021.
- [38] Anonim, Devlete elektrik satış fiyatı 2020. <https://www.powerenerji.com/devlete-elektrik-satis-fi-yati-2020.html>, Accessed 22 April 2021.
- [39] S. Alkan, A. Öztürk, S. Zavrak, S. Tosun ve E. Avcı, Bir evin elektrik enerjisi ihtiyacını karşılayacak fotovoltaik sistemin kurulumu. *Eleco 2014 Elektrik – Elektronik – Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu*, sayfa 78-82, Bursa, Türkiye, 27 – 29 Kasım 2014.





Indirect field oriented control and direct torque control comparison with/without artificial neural networks on asynchronous motors

Asenkron motorlarda yapay nöral ağlar ile/olmadan dolayı alan yönlendirmeli kontrol ve doğrudan tork kontrolünün karşılaştırması

Yavuz Üser^{1,*} , Haydar Can Acar² 

^{1,2} Akdeniz Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 07070, Antalya, Türkiye

Abstract

The flux, speed, and torque control performance of asynchronous motors are affected by parameter deviations and nonlinear variations of the asynchronous motor. In this study, Direct Torque Control (DTC) and Indirect Field Oriented Control (IFOC) structures are examined and asynchronous motor parameter deviations in both control structures are varied to desensitize with Artificial Neural Networks (ANN). In the literature, PI controllers are used in the IFOC structure. ANN is proposed for parameter desensitization, to the best of our knowledge no comparison and assessment has been made in the literature for these two methods. Comparisons are usually on the Direct Field Oriented Control (DFOC). This study proposes the parameter desensitization of IFOC and DTC with / without artificial neural networks and examines the effect on output performance. With the proposed control structure, it has been observed that the values of flux, torque and speed of asynchronous motor outputs capture the reference value at the desired performance and decrease the error values. With the proposed desensitization with ANN, IFOC performed over 50% better particularly in the time of overshoot and sitting than DTC. The proposed algorithms are implemented with Matlab / Simulink and the same reference values are used for each method.

Keywords: Asynchronous motor, Direct torque control, Indirect field oriented control, Speed control, Torque control, Matlab/Simulink

1 Introduction

Asynchronous motors are the electrical drive systems preferred by the industry due to their superior features such as simple structures, low maintenance, cheap prices, robust structures, high power/weight ratio and ability to operate in all kinds of environmental conditions. Nowadays, asynchronous motors are used in elevators, textile looms, eccentric presses, CNC looms, electric or hybrid cars. In addition, unlike DC motors, asynchronous motors can be used for many years as there is no brush structure [1] Asynchronous motors are the machines that convert electrical energy perfectly into mechanical energy besides the advantages mentioned above. However, mechanical energy is often required at different speeds and moments.

Özet

Asenkron motorların akı, hız ve tork kontrolü performansı, motorun parametre sapmalarından ve doğrusal olmayan varyasyonlarından etkilenmektedir. Bu çalışmada, Doğrudan Moment Kontrolü (DMK) ve Dolaylı Alan Yönlendirmeli Kontrol (DAYK) yapıları incelenmiş ve her iki kontrol yapısındaki motor parametre sapmalarını yapay nöral ağlar (YNA) ile duyarsızlaştırılmaya çalışılmıştır. Literatürde Dolaylı Alan Yönlendirmeli Kontrol yapısında PI denetleyiciler kullanılmaktadır. Parametre duyarsızlaştırması için ANN önerilmesi ve bu iki yöntem için literatürde karşılaştırma ve değerlendirme yapılmamıştır. Karşılaştırmalar genellikle Doğrudan Alan Yönlendirmeli Kontrol üzerinedir. Bu çalışma, yapay nöral ağları olan/olmayan DAYK ve DMK' nın parametre duyarsızlaştırması önererek ve çıkış performanslarına etkisini incelemektedir. Önerilen kontrol yapısı ile asenkron motor çıkışındaki akı, tork ve hızın istenen performansta verilen referans değeri yakaladığı ve hata değerlerinin azaldığı görülmektedir. YNA ile yapılan duyarsızlaştırma ile DAYK 'ın DMK' e göre, özellikle aşma ve oturma zamanında %50 'nin üzerinde daha iyi performans gösterdiği saptanmıştır. Önerilen algoritmalar Matlab/Simulink ile gerçekleştirilmiş ve her metot için aynı referans değerleri kullanılmıştır.

Anahtar kelimeler: Asenkron motor, Doğrudan moment kontrolü, Dolaylı alan yönlendirmeli kontrol, Hız kontrolü, Tork kontrolü, Matlab/Simulink

The way to do this in a three-phase motor is to apply variable frequency and voltage [2].

In the asynchronous motor, speed control is done by changing the stator voltage, stator winding pole pair, stator frequency and rotor resistance. Speed control can be done by changing the amplitude and frequency of the stator voltage. In order to change the motor speed, it is desired to keep the amplitude constant while decreasing the frequency of the voltage applied to the motor. This causes the motor to draw too much current from the source. In many applications, it is sufficient to keep the voltage frequency ratio constant. However, in the high performance applications where speed and torque change suddenly, it can be difficult to keep this ratio constant [3]. Vector control methods can be developed

*Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: yuser@akdeniz.edu.tr (Y. Üser)

Geliş / Recieved: 07.11.2019 Kabul / Accepted: 18.01.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021

doi:10.28948/ngumuh.643868

which can be adjusted flux and torque as desired. Thus, nonlinear values in the variables of the asynchronous motor can be better observed and controlled. In the vector control methods, the rotor flux spatial position is calculated and controlled by the driver by comparing the rotor angular velocity obtained by speed feedback and the stator current vector. The major disadvantage of vector control is the requirement to use a tachogenerator or encoder to achieve high accuracy. This makes it difficult to implement the driver system and increases its price. Vector control is divided into two categories which are known as direct vector control and indirect vector control. Linear controllers are used in the direct vector control. In the indirect vector control, calculations are performed with reactive energy equations [4].

The vector control method and the asynchronous motor's movement and moment are eliminated by the interlocking between each other. The moment correlation of the asynchronous motor with the lifting of the interlock between the flux and the moment becomes similar to the moment correlation of a DC motor. Thus, with the vector control of the asynchronous motor, the moment component of the stator current can be controlled linearly by keeping the flux component constant, as in the DC motors. Here, it is necessary to know the amplitude or position of one of the rotors, stator or air gap flux vectors in order to remove the interlock between the flux and the moment. Depending on the manner in which these vectors are obtained, the vector control is performed in two different ways, directly and indirectly. In the direct vector control method, the flux vector information generated in the motor is directly measured by the sensors. In the indirect vector control method, the position of the flux vector is found from the measured rotor speed/position and the calculated angular shift velocity. In the direct vector control method, flux information is obtained by measurement by the motor, therefore it requires special motors [5].

Consequently, direct vector applications are restricted and the indirect vector control is particularly preferred in practice. The major disadvantage of the indirect vector control is the need for a speed sensor with a high speed accuracy. The necessity of speed sensor sensitivity for detecting motor variables could create major disadvantages [6].

In the indirect vector control of asynchronous motors, the nonlinear structure of these motors and the time-varying parameters during the study are important problems encountered in the direct/indirect vector control method which is very sensitive to the parameter change. In these control methods, since the slip frequency depends on the rotor time constant, the change in the rotor time constant may result in incorrect calculation of the slip and as a result, the misalignment of the field. In addition, due to the non-linearity of the speed-moment characteristic of the asynchronous motors, sudden speed-moment changes can lead to instability of the motor. In order to overcome such drawbacks, the speed controller used in the control structure is required to be resistant to parameter changes and disturbing inputs [7, 8].

The research in recent years has shifted towards a more durable and non-linear controller design because it is quite difficult to address these problems with a conventional hysteresis and PI controller. For this purpose, due to non-linear structures of artificial neural networks (ANNs), fuzzy controllers (FC) and neural fuzzy controllers (NFC), adaptation and learning abilities, as well as the control of electric motors and the control of electric motors due to the lack of complex mathematical operations during the design phase, these methods have become widely studied and used [9]. NFC is mainly based on the realization of the functions of FC by ANN. Since it has a structure in which FC and ANN have superior characteristics, it has the capability of adaptation, learning and inference. The problems encountered in the vector control of asynchronous motors could be solved by these features and the non-linear structure of NFC. In the literature, NFC was used as the speed and speed monitor, parameter identifier and speed controller in the vector control of asynchronous motors. Although it is a controller which is resistant to parameter changes in its use as a speed controller, it cannot be able to resolve the steady state errors as it is still a problem to be solved for NFC similar to ANN and UN [10,11].

In this study, the speed control of an asynchronous motor was performed with both of these structures. Artificial neural networks were used because of the slowness of PI controllers and control structures' resistance to parameter changes. Thus, it is intended to obtain a non-linear controller that is resistant to load change, which does not require the mathematical equation of the motor for the controller design. In addition, an integral controller has been installed at the ANN output to eliminate any continuous faults. With the proposed audit structure, the training of the ANN was carried out in real time with the reference input signal using the feed forward propagation algorithm. By using the ANN parameters obtained as a result of the training, the simulation results were presented by evaluating the durability of this controller against constant and nonlinear loads were applied to the engine at different speed and torque values.

2 Materials and methods

2.1 Control structures

In this study, the block diagram of the asynchronous motor in the speed control is used. As a speed controller in the block diagram, PI controllers are preferred mostly because of their simple structure. However, PI parameters designed according to constant motor parameters can be insufficient under the motor dynamics and non-linear load conditions. This problem can be addressed by having the controller with adaptive parameters. For this purpose, NFC is used because of its non-linear structure, its ability to make learning, adaptation and inference, and its non-linear control system. As a controller, despite all these significant advantages, NFC as a supervisor is not sufficient to remedy the steady-state errors in the speed controls of drive systems, as in the ANN and the UN. This problem is solved by connecting the integral controller to the output of the NFC [12, 13]. Thus, a temporary and continuous state of changing the load and the parameters of the control structure is

$$G(s) = \frac{(K_p s + K_i) \frac{P}{J}}{s^2 + \frac{f_c + K_p}{L_r} s + \frac{K_i}{J}} \quad (10)$$

$$G(s) = \frac{(K_p s + K_i) \frac{P}{J}}{s^2 + \frac{f_c + K_p}{L_r} s + \frac{K_i}{J}} \quad (11)$$

The characteristic equivalence of the transfer function is as follows,

$$P(s) = s^2 + \frac{f_c + K_p P}{J} s + \frac{K_i P}{J} = 0 \quad (12)$$

By applying of the two-poles complex root $s_{1,2} = \rho(-1 \pm j)$, K_i and K_p coefficient expressions are obtained. P is a positive constant

$$K_p = \frac{2pJ - f_c}{P} \quad K_i = \frac{2j\rho^2}{P} \quad (13)$$

P is a positive constant, PI coefficients are given below in [Table 1](#).

Table 1. PI controller coefficients

Coefficients	K_p	K_i
In DTC	0.711	17.121
In ASR	0.210	20.010
In ATR	1.010	10.024

2.1.2 Neural Network Structure

There are many network structures in the use of neural networks in the audit area. However, due to the simplicity of its structure and its effectiveness in the control of non-linear systems, the so-called adaptive neural network system (ANNS) is preferred [22]. In this study, this network structure is used as a speed controller and its structure is presented in [Figure 3](#). This network structure, which is used as a speed controller, has been selected as one, two and three inputs and single outputs according to the control block shown in [Figure 5](#) and [7](#). ANN consists of a total of five layers and the functions performed in these layers are described below.

1-Layer: The first layer is the membership function layer and the membership function degree for each input variable is calculated in this layer. In this case, three functions for each input are selected, one for bell function and two for sigmoidal function.

The first layer output of the ANN is y_1 , and the membership function parameters are a , b and c . The membership function degrees that connect to the output are calculated as follows:

$$y_{ij}^1 = \frac{1}{1 + e^{-a_{ij}(x_i^1 - c_{ij})}}, i = 1,2 \text{ and } j = 1,3 \quad (14)$$

$$y_{i2}^1 = \frac{1}{1 + \left| \frac{x_i^1 - c_{i2}}{a_{i2}} \right|^{2b_{i2}}} \quad (15)$$

The parameters a , b and c are also referred to as input parameters of the ANN.

2-Layer: The second layer of the ANN constitutes the rule base and fuzzy rules are determined in this layer. The second layer output is y_2 , any k . The node is calculated as follows:

$$y_k^2 = \prod_i y_{ij}^1 \quad k = 1,2, \dots, 9 \quad (16)$$

3-Layer: This layer is called the normalization layer and it calculates the degree of accuracy of fuzzy rules. Any k . normalization process for the node, k . fuzzy rule is obtained by dividing the degree of precision by the sum of the rules of certainty.

$$y_k^3 = \frac{y_k^2}{\sum_k y_k^2} \quad (17)$$

4-Layer: The fourth layer of the NFC is called the size of the firing degree of a rule. The degree of firing of the normalized rules in this layer is multiplied by a linear function f and the fuzzy rules are cleared.

$$y_k^4 = y_k^3 f_k \quad (18)$$

$$f_k = p_k x_1 + q_k x_2 + r_k \quad (19)$$

Here, p , q and r are the parameters of the function f and are called the output parameters of the NFC.

5-Layer: This layer is the output node of the SB and it transfers its sum to its output.

$$y^5 = \sum_k y_k^4 \quad (20)$$

Artificial neural network block which is established in [Figure 5](#) is implemented to the control structures and simulated using Matlab/Simulink software. Differences from previously designed control structures were observed and advantages and disadvantages of artificial neural networks are studied.

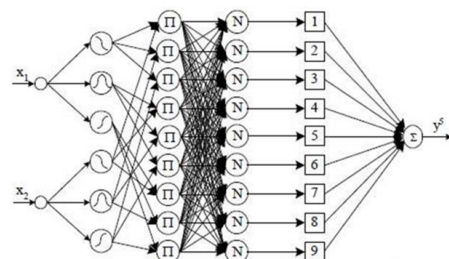


Figure 5. The structure of artificial neural networks and layers

3 Results and discussion

The ANN structure is added to the indirect field-oriented control system and simulated with the same reference speed and torque values. Figure 6 and 7 present the system with artificial neural network and without artificial neural network.

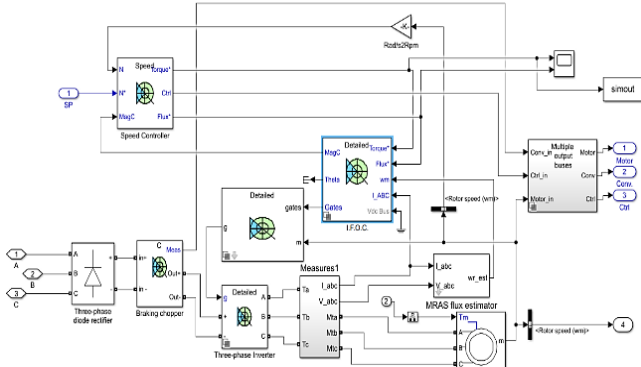


Figure 6. Indirect field oriented control without artificial neural network structure

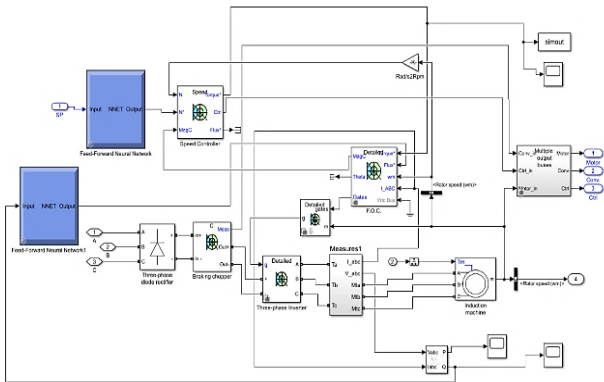


Figure 7. Indirect field oriented control with artificial neural network structure

Same additions also realized for the direct torque control structure. Artificial neural network is connected instead of PID and hysteresis controllers. To be able to observe the performance results, same reference speed and torque values are given to the system. Figures 8 and 9 show the direct torque control structures with and without artificial neural networks. The sampling period is $T_s = 2e-6$ in the methods.

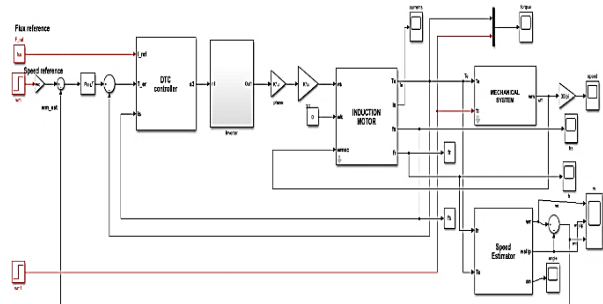


Figure 8. Direct torque control without artificial neural network structure

After the modelling of these structures, speed responses, torque responses and flux estimations of the systems were simulated. Figure 10 and 11 show the flux estimations of the systems, respectively. Estimation of rotor flux which is one of the important design parameters will reduce the negative effects of long control processes and costly drive operations on engineering applications. Flux estimation errors of the methods were calculated according to the actual flux and estimated flux.

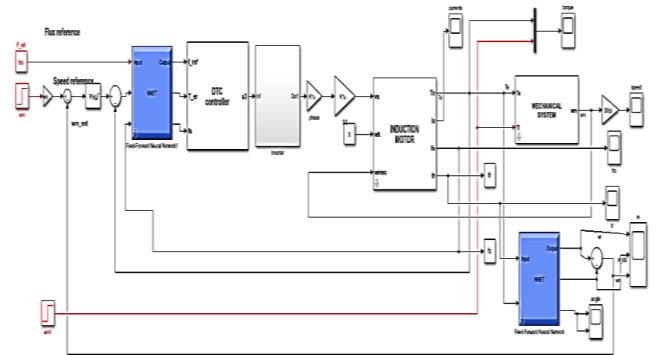


Figure 9. Direct torque control with artificial neural network structure

The flux estimation errors for ANN-IFOC, ANN-DTC, IFOC, DTC structures are calculated as 2%, 3%, 6% and 8%, respectively.

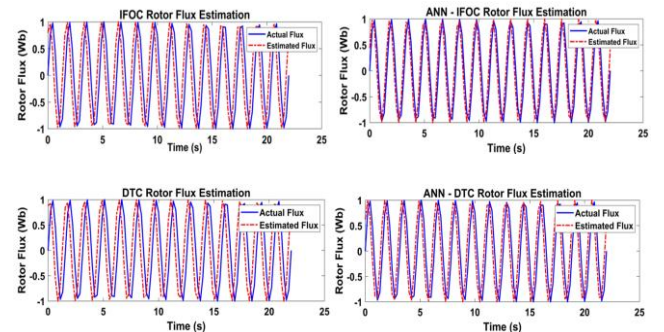


Figure 10. Flux estimations of the systems

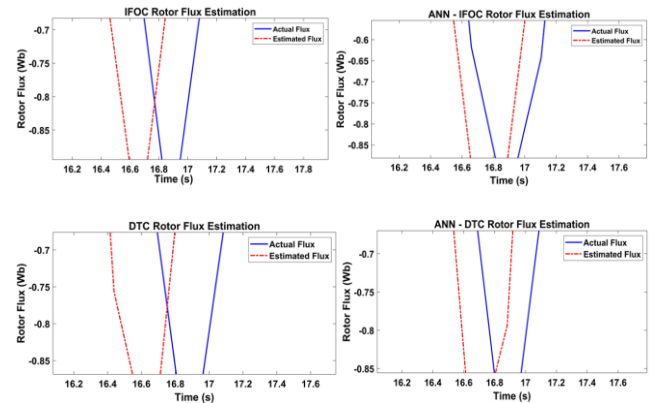


Figure 11. Flux estimations with estimation errors

As seen in Figure 10 and 11, flux estimations of the systems show very close results to each other. The main differences are control structures and the addition of artificial neural network algorithm. The second comparison parameter is speed responses of the systems. Figure 12 shows the speed response of four systems. The reference speed is set 500 rad/sec and systems are compared according to this value.

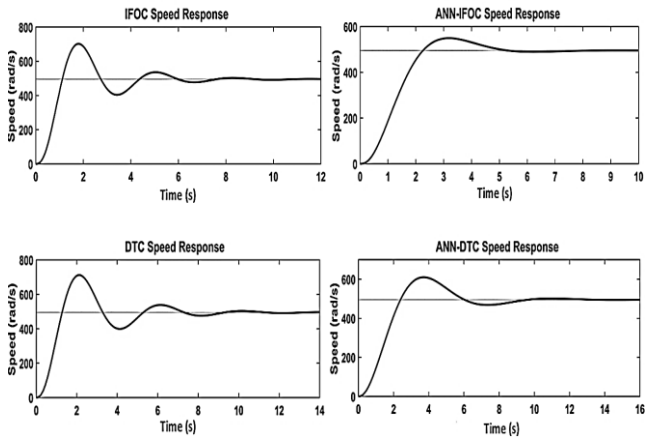


Figure 12. Speed responses of the systems

Table 2 expresses Figure 12 mathematically. Overshoot, rise time, settling time and final values of the systems are shown as a comparison parameter.

Table 2. Comparison of speed responses

Methods	Overshoot	Rise Time	Settling Time	Steady State Error
Indirect Field Oriented Control with ANN	10.9%	1.45 sec	4.81 sec	0.002% error
Direct Torque Control with ANN	23.2%	1.58 sec	8.88 sec	0.004% error
Indirect Field Oriented Control	41.7%	1.68 sec	9.71 sec	0.008% error
Direct Torque Control	43.6%	1.80 sec	12.85 sec	0.01% error

As presented in Table 2, IFOC shows slightly better results similar to studies previously mentioned in the literature (Bose et al., 1997). When artificial neural networks are added to the system, difference between these two systems was increased as observed. Artificial neural network structure gives better performance with both of these control methods. Overshoot values, rise time and settling time values are decreased and a better convergence is made thanks to artificial neural networks. With the addition of ANN to both methods, there is close to 100% improvement by decreasing the overshoot from 23.2% to 10.9% and settling time from 8.88 s to 4.81 s in the IFOC method speed graph. Same procedure is repeated for torque values. Figure 13 shows the torque responses of the systems. Initially the torque values were set 350 Nm and it instantly increased up to 1000 Nm in

the first second. Table 3 expresses the Figure 13 mathematically. Overshoot, rise time, settling time and final values of the systems are shown in Table 3 as a comparison parameter.

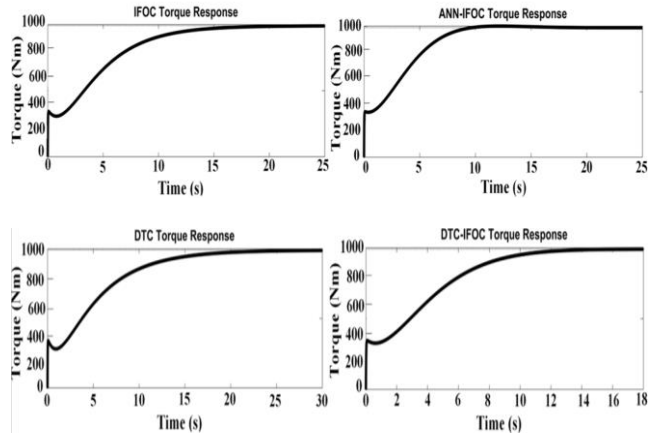


Figure 13. Torque responses of the systems

With the addition of ANN to both methods, the IFOC method decreased overshoot from 2.84% to 1.26% and the steady state error rate was the lowest with 0.001%.

Table 3. Comparison of torque responses

Methods	Overshoot	Rise Time	Settling Time	Steady State Error
Indirect Field Oriented Control with ANN	1.26%	6.5 sec	8.52 sec	0.001% error
Direct Torque Control with ANN	2.84%	7.85 sec	11.5 sec	0.003% error
Indirect Field Oriented Control	4.12%	9.38 sec	14.9 sec	0.006% error
Direct Torque Control	6.48%	11.4 sec	18.9 sec	0.008% error

Different torque and speed values are simulated in Figure 14 and 15, respectively. Black line which is given as a reference signal represents a real time signal. This signal provides more realistic information about changes and responses. It is seen that methods including ANN follow the reference torque -53N, 12N, 55N, 35N, 50N better and IFOC with ANN gives the closest output to the reference. Addition of the ANN structure has improved the speed. Reference speed -50 rad/s, 10 rad/s, 50 rad/s values were followed by IFOC with ANN and DTC with ANN. Unfortunately, DTC and IFOC couldn't follow the speed reference correctly. An undesired small shift in the motor parameters changes the output by changing the flux angle and switching states. The ANN structure eliminates these changes. The DTC method uses only stator resistance value as a motor parameter and possible changes in resistance due to the motor temperature will have a direct effect on the DTC performance.

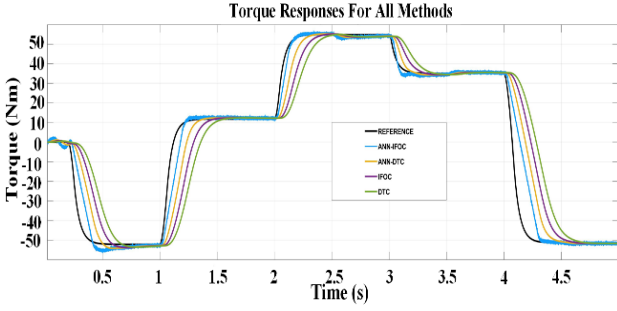


Figure 14. Torque settlings

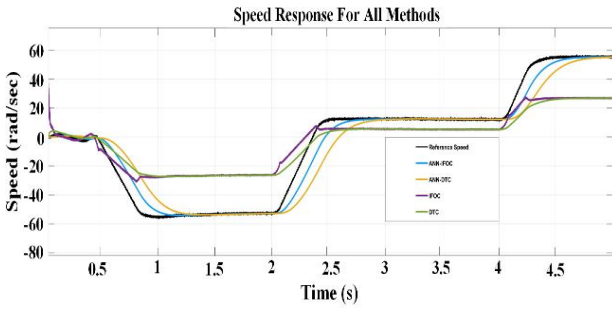


Figure 15. Speed settlings

ANN structure was added to minimize changes in the resistance for the DTC method and to keep rotor time constant in the IFOC method. In order to make a comparison of performances with DTC, IFOC and the proposed ANN-DTC, ANN-IFOC methods, different ranges of speed and load values were also applied to the IM. While DTC has a simple structure, the method is sensitive to the parameter changes. On the other hand, IFOC is robust to the varying parameters due to its structure. The dynamic performance of IFOC is preferred under this comparison. Both the overshoot and the settling time of IFOC are much smaller than DTC. ANN-IFOC and ANN-DTC structures show better results than IFOC and DTC structures. ANN-IFOC structure has the fastest response and it can catch the sharpest changes during the process.

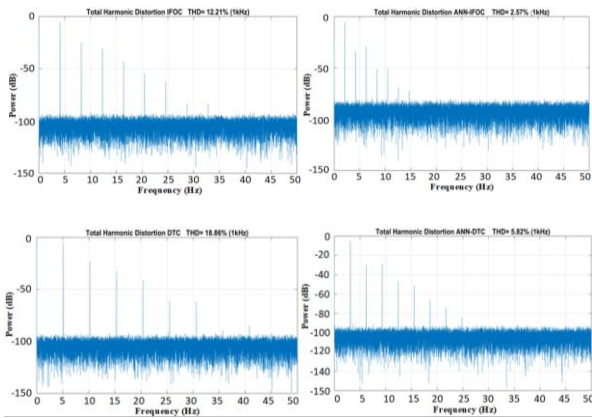


Figure 15. Total harmonic distortions of the methods

Figure 16 shows the total harmonic distortion values for each method. Since the drives are directly switched in the

DTC method, it generates more harmonics than the IFOC method. Total harmonic values were 18.86% for DTC, 12.21% for IFOC, 5.82% for ANN-DTC and 2.57% for ANN-IFOC. The fundamental frequency is 1Khz and the switching frequency is 5kHz. As shown in Figure 16, the ANN-IFOC structure has produced the least harmonic.

4 Conclusion

In this study, the control of an asynchronous motor drive in the direct torque control structure and indirect field oriented control structure is realized using with and without artificial neural network structures. Using the ANN controller, there is no need for intensive mathematical operations required for controller design. Thus, the effect of the time-varying parameters encountered in the control of the asynchronous motor has a positive effect on the performance of the asynchronous motor. The response of the IFOC and DTC structures to the parameter sensitization by using artificial neural networks can be seen from Figures. Majority of studies in the literature compared direct torque control structure and field orientated control structure. In our study, the performance of the indirect field orientated control structure compared to the direct torque control structure have been evaluated and have shown clearly. Due to the fact that the IFOC structure is particularly successful, the flux estimation has been performed on the reactive power. As shown in Table 2 and 3, speed and torque responses provided better results with ANN structure. Particularly for the speed outcomes, the IFOC structure with ANN has reached the settling time value 46% faster than DTC. In addition, it has responded 26% faster for the torque outcomes. THD levels with ANN have suppressed harmonics above 20Khz in both methods. In this study, outcomes of all structures have been explored and compared and according to our analysis, the ANN-IFOC structure gave the best performance result among all structures. Hence, the ANN-IFOC structure has the potential to provide better quality drive in industrial applications regardless of the parameters.

Appendix

The asynchronous motor has following parameters;

$P = 4$	Number of poles
$f_0 = 60$	Base frequency (Hz)
$V_s = 470/1.73$	Rated Voltage (V)
$T = 350-1000$	Rated Torque (Nm)
$R_s = 0.01485$	Stator Resistance (ohm)
$R_r = 0.009295$	Rotor resistance (ohm)
$R_c = 2000$	Core loss equivalent resistance (ohm)
$l_s = 0.0003027$	Stator Leakage Inductance (H)
$l_r = l_s$	Rotor Leakage (H)
$L_m = 0.01046$	Constant Mutual Inductance (H)
$P_{rot} = 40000$	Rotational Losses (W)

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 17

References

- [1] J. Barta, N. Uzhegov, P. Losak, C. Ondrusek, M. Mach, and J. Pyrhonen, Squirrel-Cage Rotor Design

- and Manufacturing for High-Speed Applications, IEEE Trans. Ind. Electron. 66 6768–6778. 2019. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2879285>.
- [2] J. M. Pena, and E. V. Diaz, Implementation of V/f scalar control for speed regulation of a three-phase induction motor, in: Proc. 2016 IEEE ANDESCON, ANDESCON 2016, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017. <https://doi.org/10.1109/ANDESCON.2016.7836196>.
- [3] A. Taheri, H. P. Ren, C. H. Song, Sensorless Direct Torque Control of the Six-Phase Induction Motor by Fast Reduced Order Extended Kalman Filter, Complexity. 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8985417>.
- [4] A. Pal, S. Das, and A. K. Chattopadhyay, An improved rotor flux space vector based mras for field-oriented control of induction motor drives, IEEE Trans. Power Electron. 33 5131–41.2018 <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2657648>.
- [5] S. Peresasa, A. Tilli and A. Tonielli, Theoretical and experimental Comparison of indirect Field oriented Controllers for induction motors, IEEE Trans. on Power Electron., vol. 18, 151 163, 2003.
- [6] Y. Liu, G. Tao, H. Wang, and F. Blaabjerg, Analysis of indirect rotor field oriented control-based induction machine performance under inaccurate field-oriented condition, in: Proc. IECON 2017 - 43rd Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc., Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 1810–15. 2017 <https://doi.org/10.1109/IECON.2017.8216306>.
- [7] L. Monjo, F. Córcoles, and J. Pedra, Parameter estimation of squirrel-cage motors with parasitic torques in the torque-slip curve, IET Electr. Power Appl. 9 377–87. 2015 <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2014.0208>.
- [8] Yang, D. Ding, X. Li, Z. Xie, X. Zhang, and L. Chang, A Novel Online Parameter Estimation Method for Indirect Field Oriented Induction Motor Drives, IEEE Trans. Energy Convers. 32 1562–73. 2017 <https://doi.org/10.1109/TEC.2017.2699681>.
- [9] A. Rubai, D. Ricketts, and D. Kanham, Development and implementation of an adaptive fuzzy-neural network controller for brushless drivers, IEEE Transaction on Industry Applications, 38, 441-447, 2002.
- [10] B. Lazerini, L. M. Reyneri, and M. A. Chiaberge, A neuro- fuzzy Approach to hybrid intelligent control, IEEE Transactions on Industry Applications, 35, 413-425,1999.
- [11] B. Kirankumar, Y. V. Siva Reddy, and M. Vijayakumar, Multilevel inverter with space vector modulation: Intelligence direct torque control of induction motor, IET Power Electron. 10 1129–37. 2017 <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2016.0287>.
- [12] K. H. Tan, Squirrel-Cage Induction Generator System Using Wavelet Petri Fuzzy Neural Network Control for Wind Power Applications, IEEE Trans. Power Electron. 31 5242–54. 2016 <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2480407>.
- [13] Y. Üser, K. Gülez, A new direct torque control algorithm for torque and flux ripple reduction, International Review of Electrical Engineering-IREE, 8, 644-653, 2013
- [14] R. İnan, Asenkron motorun alan zayıflama bölgesinde kayan kip denetçi tabanlı hız-algılayıcısız doğrudan vektör kontrolü, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg. 8 762–774. 2019 https://doi.org/10.28948/ngu_muh.515332.
- [15] R. İnan, R. Demir ve M. Barut, Asenkron motorun karma kestirici tabanlı hız-algılayıcı doğrudan vektör kontrolü, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg. 7 612–623. 2018 <https://doi.org/10.28948/ngumuh.443233>.
- [16] E. Zerdali, Modele uyarlamalı sistem temelli model öngörülü moment kontrollü sürücü sisteminin tasarımı, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg. 9 146–153.2020 <https://doi.org/10.28948/ngumuh.607378>.
- [17] Y. Üser, K. Gülez, and Ş. Özen, Sensorless flux region modification of Dtc controlled Im For torque ripple reduction, IU-JEEE, vol.14, pp.1753-60, 2014.
- [18] C. Fahassa, Y. Sayouti, and M. Akherraz, Improvement of the induction motor drive's indirect field oriented control performance by substituting its speed and current controllers with fuzzy logic components, in: Proc. 2015 IEEE Int. Renew. Sustain. Energy Conf. IRSEC 2015, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2016. <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2015.7454928>
- [19] L. Zhang, X. Zhu, Y. Fan, C. Li, Optimal flux-weakening control of a new five-phase FT-IPMmotor based on DTC and SVPWM for electric vehicle applications, IET Electr. Power Appl. 13 73–80. 2019 <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2018.5204>.
- [20] L. Saribulut, A. Teke, M. Tümay, Artificial neural network-based discrete-fuzzy logic controlled active power filter, IET Power Electron. 7 1536–46. 2014 <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2013.0522>.
- [21] M. Hamed Chebre, A. Meroufel, Y. Bendaha, Speed control of induction motor using genetic algorithm-based pi controller, Acta Polytechnica Hungarica, 2011, Vol. 8, No. 6, 141-153.
- [22] P. Cao, X. Zhang, and S. Yang, A unified-model-based analysis of mras for online rotor time constant estimation in an induction motor drive, IEE Trans. Ind. Electron. 64 4361–71. 2017 <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2668995>.





Hekzakopter insansız hava aracı için eşdeğer bozucu etki tahmini kullanılarak bozucu etki önleyici denetleyici tasarımı

Anti-disturbance controller design for a hexacopter unmanned aerial vehicle using equivalent disturbance estimation

Hasan Başak^{1,*} , Emre Kemer² 

¹ Artvin Çoruh Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Artvin, Türkiye

² Uşak Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Uşak, Türkiye

Özet

İnsansız Hava Araçları (İHA'lar) video kamera, fotoğraf makinesi, lazer tarama cihazı, vb. araçlar ile donatılmış ve görevlerini uzaktan kumandalı veya otonom olarak icra edebilmektedirler. Hızla gelişmekte olan bilgisayarın veri işleme kapasitesi, sensör ve yarı iletken teknolojileri küçük boyutlu döner kanatlı İHA'ların tasarlanmasına imkân sağlamaktadır. Küçük boyutlu döner kanatlı İHA sistemleri, mevcut otonom denetim yöntemlerinin henüz yeterli seviyeye gelememesinden dolayı, ani rüzgâr durumu gibi rastgele çevresel etkenler ve dışarıdan gelen değişik karakteristik özelliklere sahip bozucu etkilere karşı yeterli düzeyde dayanıklı değildirler. Bu çalışmada hekzakopter İHA sistemlerinin bozucu etkilere rağmen kararlılığını koruyup görevini etkin bir şekilde yerine getirmesi amacıyla bozucu etki önleyici denetleyici tasarlanmıştır. İHA sisteminin yönelim kararlılığı için lineer kuadratik regülatör yöntemi kullanılarak dayanıklı geri besleme kazancı hesaplanmıştır. Ayrıca gözlemci kazancı ve alçak geçiren filtreden oluşan bozucu etki eşdeğerini tahmin mekanizması da tasarlanmıştır. Bu yapı sistemdeki bilinmeyen bozucu etkilerin zamanında tahmin edilmesine olanak sağlamaktadır. Tasarlanan bozucu etki önleyici denetleyicisi kapalı çevrim İHA sisteminin gürbüz kararlılığını garanti eder. Benzetim sonuçları hekzakopter İHA için tasarlanan bozucu önleyici denetleyicinin etkinliğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Hekzakopter İHA, Bozucu etki önleyici denetleyici, Lineer kuadratik regülatör, Eşdeğer bozucu etki tahmini

1 Giriş

İnsansız hava aracı (İHA) sistemleri askeri uygulamaların yanı sıra son yıllarda bilgisayar ve sensör teknolojisindeki gelişmeler nedeniyle, popülerliği giderek artan sivil uygulama alanları da bulmaktadır. İHA, özellikle askeri uygulamalar başta olmak üzere doğal afetlerde yardım ve kurtarma, çeşitli spor faaliyetlerinin izlenmesi, hasar tespiti ve değerlendirilmesi, haritalama işlemleri, orman yangınlarının tespiti ve ilk müdahalesi, petrol ve doğal gaz boru hatlarının gözlenmesi ve güvenliği, trafik denetimi, kaçak yapılaşmanın kontrolü vb. uygulamaların hızlı ve

Abstract

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) equipped with video camera, camera, laser scanning device, etc. and perform their duties remotely or automatically. Recently, rapid progress in development of computers' data processing capacities, sensors, and semiconductor technologies have resulted in the emergence of small-sized rotary-wing UAVs. Small size rotary-wing UAV systems are more sensitive to environmental conditions such as gust and external disturbances because existing autonomous control systems are not sufficient to cope with these disturbances. In this study, an anti-disturbance controller has been designed for that a hexacopter UAV maintains its stability and are able to perform their duties in the despite of the external disturbances. Optimal gain has been calculated by linear quadratic regulator method for the attitude stability of the UAV system. In addition, a mechanism of equivalent disturbance estimation, which is consisting of an observer gain and a low pass filter, is designed. This structure estimated the unknown disturbing effects in the UAV system in time. The designed anti-disturbance controller guarantees the robust stability of the closed-loop UAV system. The simulation results demonstrated the effectiveness of the designed anti-disturbance controller for the hexacopter UAV.

Keywords: Hexacopter UAV, Anti-disturbance control, Linear quadratic regulator, Equivalent disturbance estimation

güvenli bir şekilde gerçekleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu kullanım avantajlarının yanında insansız hava araçlarının, insanlı olanlara nazaran teknik anlamdaki en önemli dezavantajı, mevcut otonom denetim sistemleri henüz yeterli seviyeye gelmediği için, ani rüzgâr durumu gibi meteorolojik şartlara karşı daha hassas olmaları ve taşıyabilecekleri faydalı yükteki belirsizliklerin daha sınırlı olmasıdır. Olası uygulama alanlarının genişlemesi sebebiyle zorlu çevresel şartlar ve karmaşık görevlerle başa çıkabilen insansız sistemleri tasarlamak için denetim ve navigasyon alanlarında yeni talepler meydana gelmiştir. Döner kanatlı

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: hasanbasak@artvin.edu.tr (H. Başak)

Geliş / Received: 04.10.2020 Kabul / Accepted: 05.03.2021 Yayımlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.804951

insansız hava araçları dikey kalkış-iniş, agresif hareket yapabilmeye özelliklerinden dolayı birçok uygulamanın en iyi çözümü olarak karşımıza çıkmaktadır. Fakat döner kanatlı insansız hava araçları otonom ve etkili uçuş yapabilmeleri için önemli mühendislik sorunlarını da içerisinde barındırmaktadırlar [1]. Düşük eylemsizlik momenti ve karışık aerodinamik etkilere maruz kalınması araçların uçuşunu etkilemesi sebebiyle bu tip insansız hava araçlarının agresif dinamikleri ile karakterize edilmesi gerekmektedir. Sonuç olarak, bu sistemlerin otonom denetimi zor bir konudur. Eğer atmosferik bozucu etkiler de dikkate alınırsa, bu sorun daha da zorlu hale gelir. Bu nedenle, yeni denetim sistemleri tasarlanırken sistemin maruz kalacağı bozucu etkiler göz önünde bulundurulmalı ve bu perspektifte etkili denetim yaklaşımları geliştirilmelidir.

Bozucu etkilerin azaltılması veya ortadan kaldırılması için klasik geri beslemeli denetleyici tasarımı önerilebilir. Ancak, klasik geri beslemeli denetleyici tasarımları birçok tasarım kısıtlamalarına sahiptir ve bu tek derece bağımsız denetleyici yapısı olarak bilinir. Gerçek şu ki ölçülemeyen bozucuların etkilerinin zayıflatılması için öncelikli olarak geri beslemeli denetleyici tasarlanması zorunludur. Fakat denetleyici tasarımında örneğin; kararlılık, performans, referans takip etme, düzenleme, bozucu etki reddi ve dayanıklılık gibi birçok tasarım gereksinimleri vardır. Diğerlerinin içinden en önemli olan gereksinimlerden; takip etme, bozucu etkinin reddi ve gürbüz performans gibi kısıtlamalardan herhangi birini sağlamak için diğerlerinden fedakârlık etmek gerekir. Burada bozucu etki önleyici yöntemler kısıtlamaları azaltmada etkin bir yöntem olacaktır [2].

Hekzakopter İHA'larının yönelim ve yörünge takibi üzerine farklı yöntemler literatürde sunulmuştur. Hekzakopter yörünge izleme problemini çözmek için, [3] çalışmasında doğrusal olmayan gürbüz ve adaptif geri adımlamalı denetim stratejisi hiyerarşik olarak önerilmektedir. Derawi ve diğerleri [4] çalışmasında gürültü ve belirsizliklerin yönelim üzerindeki etkisini azaltmak için gürbüz durum geri-beslemeli denetleyici geliştirmiştir. Oransal-İntegral-Türevsel (PID) denetleyicisi hekkzakopter yörünge takibi için [5] çalışmasında sunulmuştur. Ayrıca çalışma [6]'da PID denetleyicisi ile yuvarlanma, yunuslama, yönelme ve irtifanın dengelenmesi sağlanmış ve motorda oluşacak arızaların tespiti ve izolasyonu yapılmıştır. Yönelim takibi için, çalışma [7] adaptif yapay sinir ağları kullanılarak PID denetleyici tasarımını sunmuştur. Lighthart ve diğerleri [8] bir İHA sistemin kararlılığını ve güvenliğini sağlamak için model öngörülü denetleyici tasarımı sunmuştur. Hekzakopter İHA için, [9] çalışmasında hataya toleranslı denetleyici tasarımı verilmiştir ve burada dayanıklı denetleyicileri hata durumuna göre programlanmıştır. Son zamanlarda İHA'lar için bozucu etkileri dışlayıcı denetleyici tasarımı dikkat çeken bir çalışma konusudur. Örneğin, Guo ve diğerleri [10] bozucu etki ve genişletilmiş durum gözlemcileri kullanarak dört motorlu İHA'da yük ve rüzgârdan dolayı oluşacak bozucu etkileri elimine etmek için denetim geliştirmişlerdir. Benzer şekilde rüzgârın etkilerini tahmin etmek için genişletilmiş durum gözlemciler ve geri adımlama yöntemi kullanılarak çalışma [11]'de aktif denetleyici tasarlanmıştır. Yuan ve diğerleri [12]

çalışmasında doğrusal olmayan genişletilmiş durum gözlemci ve doğrusal olmayan kompozit denetleyici yöntemlerini İHA yönelim takibi için önermiştir. Sonuç olarak, farklı denetleyici tasarlama yöntemleri ile bozucu etki tahminleri birleştirilerek farklı performans ihtiyaçlarına cevap verilebilmektedir.

Bu çalışmada, lineer kuadratik regülatör yöntemi ve eşdeğer bozucu etki tahmini yöntemi [13] birleştirilerek, altı motorlu İHA sisteminin dışarıdan maruz kalabileceği bozucu etkileri elimine etmek amaçlanmıştır. Dışarıdan gelebilecek bozucular direk olarak ölçülememesi veya ölçmek için çok pahalı araçlar gerekli olması sebebiyle ölçülebilen değişkenler kullanılarak bozucu etkiler tahmin edilebilir. Bozucu etkiler eşdeğer bozucu etki tahmini yöntemi kullanılarak sistem girişindeki bozucu etkiler tahmin edilecektir. Böylece sistem girişindeki bozucu etkilerin dışlanması sağlanacaktır. Benzetim sonuçları önerilen denetim yapısının geçerliliğini göstermektedir.

2 Materyal ve metot

2.1 Hekzakopter insansız hava aracı matematiksel modeli

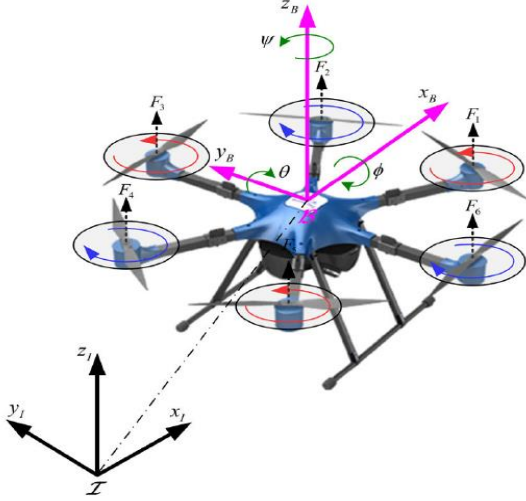
Altı rotordan oluşan döner kanatlı İHA esnemez bir gövdeye sahip olduğu varsayılır. Rotorlar Şekil 1'de gösterildiği gibi gerekli kuvvetleri ve torqları üretir. Tüm rotorlar 1 ile 6 arası etiketlenmiştir, burada tek numaralı (1, 3 ve 5) rotorlar saat yönünün tersine ve çift sayı (2, 4 ve 6) saat yönünde döner. Aracın yüksekliği, rotor hızlarını eşit miktarda artırıp-azaltarak değiştirilebilir. 4 ve 5 nolu rotorların hızının artırılması ve aynı zamanda 1 ve 2 nolu rotorların hızları azaltılması, ileri hareketin yapılmasını sağlar. Ayrıca (1, 5, 6) ve (2, 3, 4) nolu rotor gruplarının hızlarını artırıp-azaltarak yuvarlanma hareketi oluşur ve bu y-ekseni boyunca yanıl hareketinin de oluşmasını sağlar. Son olarak, rotorlar (1, 3, 5) saat yönünün tersine, rotorlar (2, 4, 6) ters yönde dönerek yönelme (sapma) hareketi ayarlanmasını sağlar. İHA'nın dinamiğini tanımlamak için $\{B\}$ gövde ve $\{I\}$ eylemsizlik çerçevelerini inceleyelim (bkz. Şekil 1). Gövde çerçevesi Şekil 1'de belirtilirken X_B - Y_B - Z_B düzlemi yüzeyine yerleştirilir ve hekkzakopter'in ağırlık merkezi gövdenin merkezine yerleştirilir. Yönelim vektörü $\eta = (\Phi \ \theta \ \psi)^T$ ile ifade edilir burada Φ , θ ve ψ sırasıyla yuvarlanma, yunuslama ve yönelme açılarını göstermektedir. Aracın, eylemsizlik çerçevesindeki konum vektörü $\xi = (x_I \ y_I \ z_I)^T$ ile ifade edilir.

Kuvvetlerin gövde çerçevesinden eylemsizlik çerçevesine dönüşümü, aşağıdaki R_f döndürme matrisi kullanılarak yapılır:

$$\begin{bmatrix} C\theta C\psi & S\theta S\theta C\psi - C\theta S\psi & C\theta S\theta C\psi + S\theta S\psi \\ C\theta S\psi & S\theta S\theta S\psi + C\theta C\psi & c\theta s\theta s\psi - S\theta C\psi \\ -S\theta & S\theta C\theta & C\theta C\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

Burada C(.) ve S(.) sırayla cos(.) ve sin(.) fonksiyonlarını ifade etmektedir. Açısal hızların gövde çerçevesinden eylemsizlik çerçevesine dönüşümü için aşağıdaki matris kullanılır:

$$W_{\eta}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & \sin\Phi \tan\theta & \cos\Phi \tan\theta \\ 0 & \cos\Phi & -\sin\Phi \\ 0 & \sec\theta \sin\Phi & \cos\Phi \sec\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$



Şekil 1. Hekzakopter insansız hava aracının şematik diyagramı [3].

Altı rotorlu İHA'nın dinamik modeli, Newton-Euler formülasyonu kullanılarak aşağıdaki şekilde verilir [3],[5]:

$$\dot{\xi} = v \quad (3)$$

$$m\dot{v} = -mge_z + R_f T_f \quad (4)$$

$$\dot{\eta} = W_{\eta}^{-1} \omega \quad (5)$$

$$J\dot{\omega} = -\omega \times J\omega + \tau_f \quad (6)$$

Burada v aracın eylemsizlik çerçevesindeki lineer hızıdır, $e_z = (0, 0, 1)^T$ z-ekseni boyunca bir vektörü temsil eder, ω açısal hızdır ve $J = \text{diag}(I_{xx}, I_{yy}, I_{zz})$ eylemsizlik matrisidir.

$T_f = (0 \ 0 \ u_1)^T$ ve $\tau_f = (u_2 \ u_3 \ u_4)^T$ $\{B\}$ - çerçevesindeki kuvvet ve momentlerdir ve buradaki u_{1-4} aşağıdaki gibi verilir:

$$u_1 = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6 \quad (7)$$

$$u_2 = -\frac{1}{2}F_1l + \frac{1}{2}F_2l + F_3l + \frac{1}{2}F_4l - \frac{1}{2}F_5l - F_6l \quad (8)$$

$$u_3 = -\frac{\sqrt{3}}{2}F_1l - \frac{\sqrt{3}}{2}F_2l + \frac{\sqrt{3}}{2}F_4l + \frac{\sqrt{3}}{2}F_5l \quad (9)$$

$$u_4 = \frac{d}{b}(-F_1 + F_2 - F_3 + F_4 - F_5 + F_6) \quad (10)$$

Burada i . rotor tarafından üretilen kuvvet $F_i = b\Omega_i^2$ olarak ifade edilir, b pervanelerin itime katsayısı, d sürüklenme katsayısı ve Ω_i , i . rotor dönme hızını temsil etmektedir.

Denklem (3)-(6)'da ifadeler yerlerine konulursa, hekzakopter İHA'nın yönü ve öteleme hareketi şu şekilde türetilir:

$$\dot{x}_I = (\cos\phi\sin\theta\cos\psi + \sin\phi\sin\psi) \frac{1}{m} u_1 \quad (11)$$

$$\dot{y}_I = (\cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\psi) \frac{1}{m} u_1 \quad (12)$$

$$\dot{z}_I = -g + \cos\phi\cos\theta \frac{1}{m} u_1 \quad (13)$$

$$\dot{\phi} = \dot{\theta}\dot{\psi} \left(\frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}} \right) + \frac{1}{I_{xx}} u_2 \quad (14)$$

$$\ddot{\theta} = \dot{\phi}\dot{\psi} \left(\frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}} \right) + \frac{1}{I_{yy}} u_3 \quad (15)$$

$$\ddot{\psi} = \dot{\theta}\dot{\phi} \left(\frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} \right) + \frac{1}{I_{zz}} u_4 \quad (16)$$

Denetim tasarımı kolaylaştırmak için Denklem (11)-(16) ile tanımlanan İHA modeli doğrusal olmayan durum-uzay gösterimi $\dot{x} = f(x(t), u(t))$ biçiminde ifade edilebilir ve buradaki x , durum-uzay ve u , kontrol giriş vektörleri aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_{12}]^T \quad (17)$$

$$= [x_I \ y_I \ z_I \ \phi \ \theta \ \psi \ \dot{x}_I \ \dot{y}_I \ \dot{z}_I \ \dot{\phi} \ \dot{\theta} \ \dot{\psi}]^T$$

$$u = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4]^T \quad (18)$$

Durum-uzay gösterimi Denklem (19)-(30), aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\dot{x}_1 = x_7 \quad (19)$$

$$\dot{x}_2 = x_8 \quad (20)$$

$$\dot{x}_3 = x_9 \quad (21)$$

$$\dot{x}_4 = x_{10} \quad (22)$$

$$\dot{x}_5 = x_{11} \quad (23)$$

$$\dot{x}_6 = x_{12} \quad (24)$$

$$\dot{x}_7 = (\cos x_4 \sin x_5 \cos x_6 + \sin x_4 \sin x_6) \frac{1}{m} u_1 \quad (25)$$

$$\dot{x}_8 = (\cos x_4 \sin x_5 \sin x_6 - \sin x_4 \cos x_6) \frac{1}{m} u_1 \quad (26)$$

$$\dot{x}_9 = -g + \cos x_4 \cos x_5 \frac{1}{m} u_1 \quad (27)$$

$$\dot{x}_{10} = x_{11} x_{12} \left(\frac{I_{yy} - I_{zz}}{I_{xx}} \right) + \frac{l}{I_{xx}} u_2 \quad (28)$$

$$\dot{x}_{11} = x_{10} x_{12} \left(\frac{I_{zz} - I_{xx}}{I_{yy}} \right) + \frac{l}{I_{yy}} u_3 \quad (29)$$

$$\dot{x}_{12} = x_{11} x_{10} \left(\frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} \right) + \frac{l}{I_{zz}} u_4 \quad (30)$$

Altı rotorlu İHA sisteminde bulunan tork ve kuvvet, sadece dört girişi (u_1, u_2, u_3, u_4) oluşturur bundan dolayı bu girişler ile altı adet çıkışı ($x_I, y_I, z_I, \phi, \theta, \psi$) kontrol etmek imkânsızdır. Pozisyon (Denklem (3)-(4)) ve yönelim (Denklem (5)-(6)) dinamikleri arasındaki etkileşim göz önüne alındığında, pozisyon hareketleri ($x_I - y_I$) dolaylı olarak yönelim hareketleri (ϕ, θ) ile kontrol edilebilir. Yani, toplam kaldırma kuvvetleri ile birlikte yönelimler, $\{x, y, z\}$ eksenlerinde bileşik kuvvetleri üretirler buda İHA'nın x-y-z kartezyen koordinatlarındaki hareketleri sağlanmasına katkıda bulunur. Bundan dolayı bu çalışmada, İHA'nın belirtilen yörüngeyi takip etmesi için, bu harekete karşılık gelen yönelim yuvarlanma ve yunuslama hareketinin öncelikli olarak İHA model tarafından yapılması sağlanacaktır.

Doğrusal model için, durum-uzay denklemi durum $x_{eq} = 0$ ve giriş $u_{eq} = [mg \ 0 \ 0 \ 0]$ denge noktasında Denklem (31)-(32) formunda verilir.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu & (31) \\ y &= Cx = [\phi \ \theta \ \psi \ z]^T & (32)\end{aligned}$$

Buradaki A ve B matrisler aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\begin{aligned}A &= \frac{\partial f}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} |_{x_e, u_e} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} |_{x_e, u_e} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} |_{x_e, u_e} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} |_{x_e, u_e} \end{bmatrix} \\ B &= \frac{\partial f}{\partial u} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} |_{x_e, u_e} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial u_m} |_{x_e, u_e} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} |_{x_e, u_e} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial u_m} |_{x_e, u_e} \end{bmatrix}\end{aligned} \quad (33)$$

2.2 Bozucu etki önleyici denetleyici tasarımı

2.2.1 Lineer kuadratik regülatör

Denklem (31)-(32)'de verilen İHA sistemi için geri-beslemeli denetleyici Lineer Kuadratik Regülatör (LQR) yöntemi ile tasarlanmıştır. Bu yöntem sistem dinamiklerinin kuadratik maliyet fonksiyonunu en aza indirmeye odaklanır. Kuadratik maliyet fonksiyonu:

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (34)$$

ile tanımlanır. Burada Q ve R durum ve giriş vektörleri için ağırlık matrisleridir. Q ve R matrisleri tasarımcı tarafından seçilir ve bu şekilde maliyet fonksiyonu J en aza indirmeye çalışır. J mümkün olduğu kadar azaltılırsa, $\lim_{t \rightarrow \infty} x = 0$ sağlanır. Bu kapalı-döngü sistemin kararlı olmasını garanti eder.

Optimal denetim kuralı Denklem (35)'de verilmiştir.

$$u = -Kx \quad (35)$$

ve

$$K = R^{-1} B^T P \quad (36)$$

burada P ise aşağıda verilen Riccati denklemi çözümünden elde edilir:

$$Q + PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P = 0 \quad (37)$$

Herhangi bir pozitif tanımlı Q matrisi için eğer pozitif tanımlı P matrisi var ve bu matris Lyapunov matris denklemini,

$$A^T P + PA + Q = 0 \text{ veya } A^T P + PA < 0,$$

sağlıyorsa kapalı döngü sistem $\dot{x} = Ax$ kuadratik kararlıdır. Ayrıca sistem için $V = x^T P x$ geçerli bir kuadratik Lyapunov fonksiyonudur çünkü $P > 0 \rightarrow V > 0$ ve $\dot{V} = x^T (A^T P + PA)x < 0$.

Lyapunov fonksiyonunun türevi,

$$\begin{aligned}\dot{V} &= x^T A^T P x + x^T P A x + u^T B^T P x + x^T P B u \\ &= x^T P (A - BR^{-1}B^T P)x + x^T (A - BR^{-1}B^T P)^T P x\end{aligned} \quad (38)$$

ve $u = -R^{-1}B^T P x$ olarak düşünülürse Riccati denklemi Denklem (39)'daki gibi yazılabilir:

$$\begin{aligned}P(A - BR^{-1}B^T P) + (A - BR^{-1}B^T P)^T P \\ = -Q - PBR^{-1}B^T P\end{aligned} \quad (39)$$

$$V < 0 \quad (40)$$

Denklem (40), sistemin Lyapunov kararlılığını garanti eder [14].

2.2.1.1 Q ve R ağırlık matrislerinin seçimi

Pozitif tanımlı Q ve R matrisleri, kapalı-döngü sisteminin kutuplarının s-düzlemindeki dağılımı incelenerek seçilir. Q matrisi durum değişkenlerinin üzerine kısıtlamaları belirler. Diğer taraftan R matrisi sistem girişlerini belirler. Örneğin büyük değerler Q matrisinde kapalı-döngü sisteminin kutuplarının daha sola yerleştirecek buda kapalı-döngü durumlarının daha hızlı cevap vermesini sağlayacaktır. Daha büyük R değeri kontrol girişin daha çok kısıtlanmasına ve kutupların sanal eksene yaklaşmasına neden olur. Bu matrisler köşegen seçilebilir fakat R matrisin her bir elementi pozitif ve Q matrisinin her bir elementi pozitif veya bazı elementleri sıfır seçilebilir [15].

2.2.2 Sistem girişindeki bozucu etkilerin eşdeğer yaklaşımı ile tahmini

Bu bölümde bozucu etkileri dışlamak için sistem girişindeki bozucu etkilerin eşdeğer yaklaşımı kullanılacaktır. Bu yöntemin bazı üstünlükleri şunlardır [13,16]: (a) bozucu etkileri önceden bilmek gerekmez, (b) ölçülen değişkenlerin türevi gerekmez, (c) sistem dinamiklerinin tersine gerek yoktur ve bundan dolayı kararlı olmayan kutuplar/ sıfırlar silinmesi önlenmiş olunur.

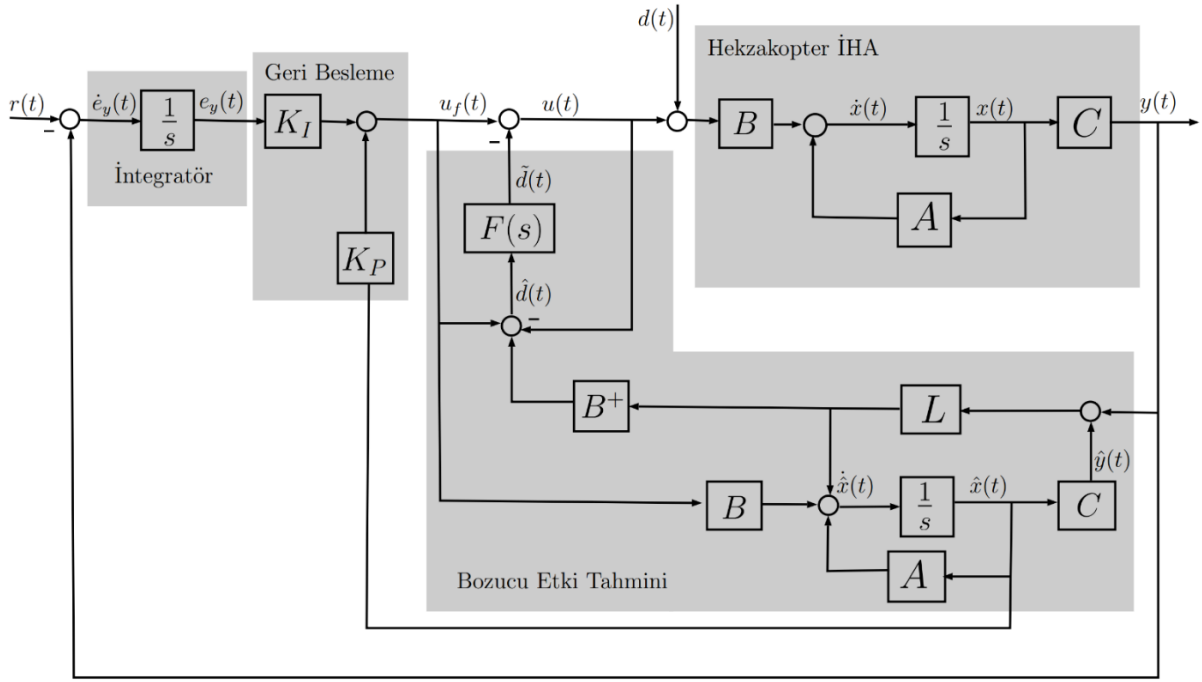
Aşağıdaki verilen lineer zamanla değişmeyen sistemi düşünelim:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + B(u(t) + d(t)) \\ y(t) &= Cx(t)\end{aligned} \quad (41)$$

burada $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times n_u}$ ve $C \in \mathbb{R}^{n_y \times n}$ sistem matrisleridir. Bozucu etkiler sadece kontrol girişinden uygulandığını farz edilmiştir. Durum gözlemci Denklem (42)'de verilmiştir.

$$\hat{\dot{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu_f(t) + L(y(t) - C\hat{x}(t)) \quad (42)$$

Burada $L \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ gözlemci kazancıdır. Giriş bozucu etki eşdeğer tahmini Denklem (43)'deki gibi verilir.



Şekil 2. Girişteki bozucu etkinin tahmini kullanılarak denetleyici tasarımı yapısı

$$\hat{d}(t) = u_f(t) - u(t) + B^+L(y(t) - C\hat{x}(t)) \quad (43)$$

Burada

$$B^+ = B^T(BB^T)^{-1} \quad (44)$$

ve filtrelenmiş bozucu etkinin tahmini:

$$\tilde{D}(s) = F(s)\hat{D}(s) \quad (45)$$

Burada $\tilde{D}(s)$ ve $\hat{D}(s)$ sembolleri $\tilde{d}(t)$ ve $\hat{d}(t)$ sırasıyla Laplace dönüşümlerini ifade eder. Buradaki $F(s)$ alçak geçiren filtre olup aşağıdaki formdadır:

$$F(s) = \frac{1}{t_F s + 1} I_n \quad (46)$$

Parametre t_F bozucu etkinin dışlanması için açılmal frekans bandına göre belirlenir ve

$$t_F \leq \frac{1}{5 \sim 10} \frac{1}{\omega_r}$$

Burada ω_r bozucu etkiyi dışlamak için en yüksek seçilmiş açılmal frekanstır. Denklem (45)'deki tahmin edilen bozucu etki ile denetim kuralı birleştirilirse, aşağıdaki denetim kuralı yazılabilir:

$$u(t) = u_f(t) - \tilde{d}(t) \quad (47)$$

Bu denetim kuralı bozucu etkilerin dışlanmasında performansı iyileştirir. Şekil 2'de eşdeğer bozucu etki tahmini kullanılarak bozucu etki önleyici denetleyici tasarımı yapılmıştır.

2.2.3 Kararlılık Analizi

Kararlılık analizi iki bölümden oluşur: geri-besleme kazancı $K = [K_I \ K_P]$, gözlemci kazancı L ve alçak geçiren filtre $F(s)$ (ayırma teorisi [17]). Elde edilmiş durum geri besleme kazancı K için, gözlemci kazancı L ve alçak geçiren filtre $F(s)$ kapalı-döngü sistem kararlılığını etkilememelidir. Bunu analiz için sistemde $r(t) = 0, d(t) = 0$ ve $\Delta x(t) = \hat{x}(t) - x(t)$ olursa doğrusal zamanla değişmez sistemi tekrar yazacak olursak;

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + B\tilde{d}(t) \quad (48)$$

Denklem (48), (42) ve (47) ile birleştirilirse, Denklem (49) elde edilir.

$$\Delta \dot{x}(t) = (A - LC)\Delta x(t) + B\tilde{d}(t) \quad (49)$$

Diğer taraftan Denklem (43)'ün eşdeğeri:

$$\hat{d}(t) = -B^+LC\Delta x(t) + \tilde{d}(t). \quad (50)$$

Sinyal $\tilde{d}(t)$ 'dan $\hat{d}(t)$ 'e transfer fonksiyonu Denklem (49)-(50) kullanılarak Denklem (51) elde edilir.

$$G(s) = 1 - B^+LC(sI - (A - LC))^{-1}B = B^+(sI - A)(sI - (A - LC))^{-1}B \quad (51)$$

Uygun durum geri-besleme kazancı $K = [K_I \ K_P]$ varsa ve eğer

- Sistem matrisleri (A, B, C) kontroledilebilir ve gözlemlenebilir ise,
- $\|G(j\omega)F(j\omega)\|_\infty < 1, \forall \omega \in [0, \infty)$ ise,
- $A - LC$ kararlı ise

küçük kazanç (small gain) teoremi [18]'den dolayı **Denklem (47)**'de verilen denetim kuralı sistemin kararlılığını garanti eder.

Önerilen bozucu etki önleyici denetleyicisi tasarımı, aşağıda verilen adımlar uygulanarak yapılır:

- $K = [K_I \ K_P]$ kazancı LQR yöntemi ile hesaplanır.
- Bozucu etkileri dışlamak için en yüksek açısız frekans ω_r ve buna karşılık gelen $F(s)$ seçilir.
- $A - LC$ kararlı yapmak için gözlemci kazancı L hesaplanır.
- Gözlemcinin kutupları ($A - LC$ 'nin kutupları) durum geri-besleme kazancı ile kapalı döngü sistemin kutuplarından daha solda olmalıdır.
- $1/G(j\omega)$ ve $F(j\omega)$ 'nin Bode diyagramı çizilir ve **Denklem (52)**'deki şartı sağlayıp sağlamadığı kontrol edilir eğer sağlamıyorsa gözlemci kazancı bu şartı sağlayana kadar tekrar hesaplanır.

$$\|G(j\omega)F(j\omega)\|_\infty < 1, \omega \in [0, \infty) \quad (52)$$

3 Denetim tasarımı ve benzetim sonuçları

Bu bölümde bozucu etki tahmini kullanılarak denetim kuralının insansız hava aracı modeli için etkinliği gösterilecektir. Benzetim çalışmaları Matlab2017b/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Önerilen bozucu etki önleyici denetim tasarımının yönelim takip performansı standart denetleyicinin performansı ile karşılaştırılmıştır.

Burada takip referans sinyalleri adım sinyallerin birleşiminden oluşmakta ve sinyal üretici tarafından elde edilmektedir. Bozucu etki sistemin yunuslama torkuna etki edecek şekilde sistemin girişine eklenmiştir ve **Denklem (53)**'deki formda verilmiştir:

$$d(t) = \begin{cases} 0, & t > 0 \\ d_1(t) + d_2(t), & t \geq 5 \end{cases} \quad (53)$$

Burada

$$d_1(t) = 9.6 \sin 0.2\pi(t - 5) + 4.2 \sin 0.4\pi(t - 5) \quad \text{ve} \\ d_2(t) = \sin 0.6\pi(t - 5).$$

İlk olarak, bozucu etki ihmal edilerek uygun denetim tasarımı yapılacaktır. İHA modelinin durumlarını ve takip hatalarının integrallerini içeren artırılmış durum modeli **Denklem (54)** gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{e}(t) \end{bmatrix}_y = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ e_{y(t)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u(t) \quad (54)$$

burada $x = [z_l \ \phi \ \theta \ \psi \ z_l \ \dot{\phi} \ \dot{\theta} \ \dot{\psi}]^T$ durum vektörü, $e_y = [e_{z_l} \ e_\phi \ e_\theta \ e_\psi]^T$ hata vektörü ve $u = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4]^T$ giriş vektördür. **Tablo 1**'de verilmiş olan İHA modelinin fiziksel parametreleri kullanılarak **Denklem (33)** ile A ve B matrislerinin sayısal değerleri,

$$A = \begin{bmatrix} 0_{4 \times 4} & 1_{4 \times 4} \\ 0_{4 \times 4} & 0_{4 \times 4} \end{bmatrix}$$

ve

$$B = \begin{bmatrix} 0_{4 \times 4} \\ \text{diag}(0.6515, 24.3309, 24.3309, 16.6945) \end{bmatrix}$$

şeklinde hesaplanır. Yuvarlanma-yunuslama-yönelme açıları ve aracın denge noktasından yüksekliği (ϕ, θ, ψ, z) sistemin çıkışı olduğu farz edilirse, çıkış matrisi $C = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 1} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ I & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} \end{bmatrix}$ şeklinde elde edilir.

LQR yöntemi ile geri beslemeli denetimin kazancı hesaplamak için öncelikle ağırlık matrisleri **Bölüm 2.2.1.1**'deki yöntem kullanılarak **Denklem (55)**'deki gibi seçilir:

$$Q = \text{diag}([200 \ 50 \ 50 \ 50 \ 50 \ 1 \ 1 \ 1 \ 10^4 \ 10^4 \ 10^4 \ 400]), \\ R = \text{diag}([0.1, 0.1, 0.1, 0.1]) \quad (55)$$

Performans indeksi, $J_K = \int_0^\infty (x_a^T Q x_a + u^T R u) dt$ burada $x_a = [x \ e_y]^T$ optimizasyon yapılarak K kazanç matrisi aşağıdaki gibi hesaplanır:

Sonra, bozucu etki sinyalinin en yüksek açısız frekans birleşeni $\omega_r = 6\pi$ rad/s ve $F(s)$ filtresinin zaman sabiti $t_F = 0.005 \cong 1/10\omega_r$ seçilir. Böylece alçak geçiren filtre **Denklem (57)** gibi elde edilir.

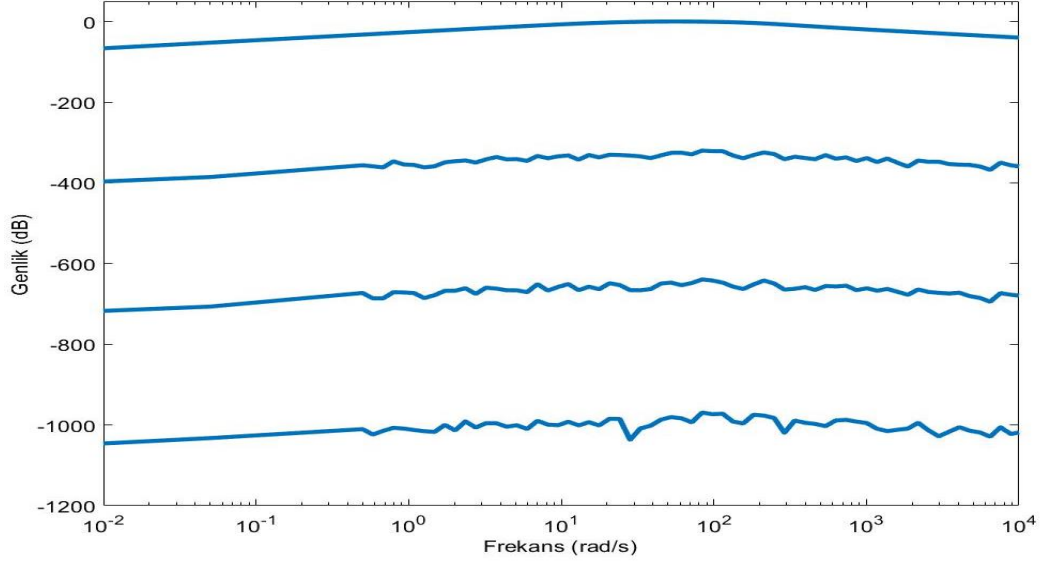
$$F(s) = \frac{1}{0.005s + 1} \quad (56)$$

Ardından performans indeksi $J_L = \int_0^\infty (x^T Q_L x + u^T R_L u) dt$ optimizasyon yapılarak gözlemci kazancı L hesaplanır. Bunun için ağırlık matrisleri $Q_L = B^T B$ şeklinde seçilerek başlanırsa ve **Bölüm 2.2.1.1**'deki yöntem kullanılırsa, ağırlıklar $Q_L = 10^6 \text{diag}(0.01, 0.01, 0.01, 0.80, 1200, 1200, 600)$ ve $R_L = \text{diag}(1, 1, 1, 1)$ şeklinde seçilir. Sonraki adımda ise $G(j\omega)F(j\omega)$ transfer fonksiyonunun Bode diyagramı **Şekil 3**'de elde edilir. Bu grafik incelendiğinde **Denklem (52)**'nin sağladığı açıkça görülmektedir ve bundan dolayı kapalı çevrim sisteminin kararlı olduğu sonucuna varılır.

Tablo 1. Hekzakoiter modelinin parametreleri [3]

Parametre	Tanım	Değer	Birim
m	Kütle	1.535	kg
g	Yerçekimi kuvveti	9.8	m/s ²
l	Kol uzunluğu	0.275	m
I_{xx}	x-eksen atalet momenti	0.0411	kg.m ²
I_{yy}	y-eksen atalet momenti	0,04178	kg.m ²
I_{zz}	z-eksen atalet momenti	0.0599	kg.m ²
d/b	İtme ve sürüklenme oranı	0.1	-

$$K = \begin{bmatrix} 73.5 & 0 & 0 & 27 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -63.2 \\ 0 & 53.8 & 0 & 0 & 0 & 3.8 & 0 & 0 & -316.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 53.8 & 0 & 0 & 0 & 3.8 & 0 & 0 & -316.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 55.5 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & -316.2 & 0 \end{bmatrix} \quad (57)$$

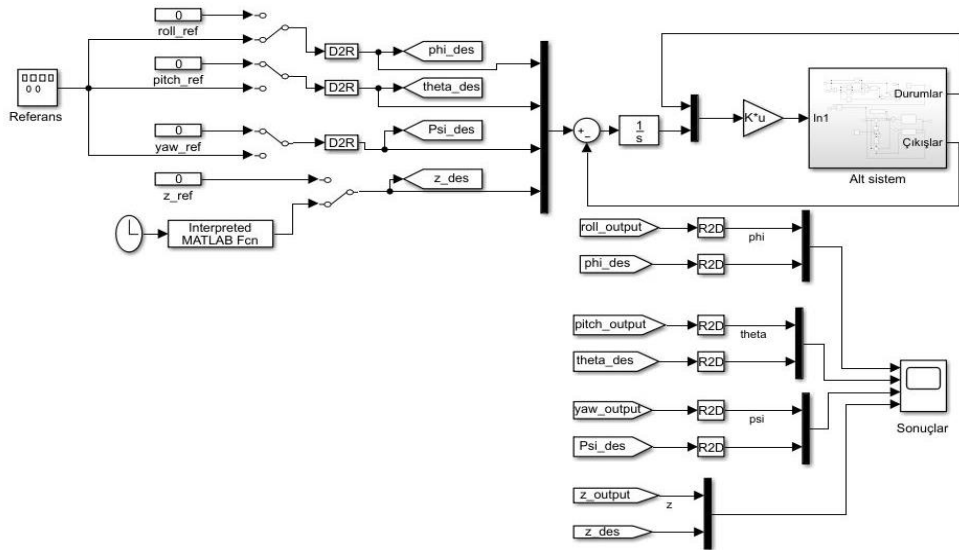


Şekil 3. $G(j\omega)F(j\omega)$ fonksiyonunun Bode grafiği.

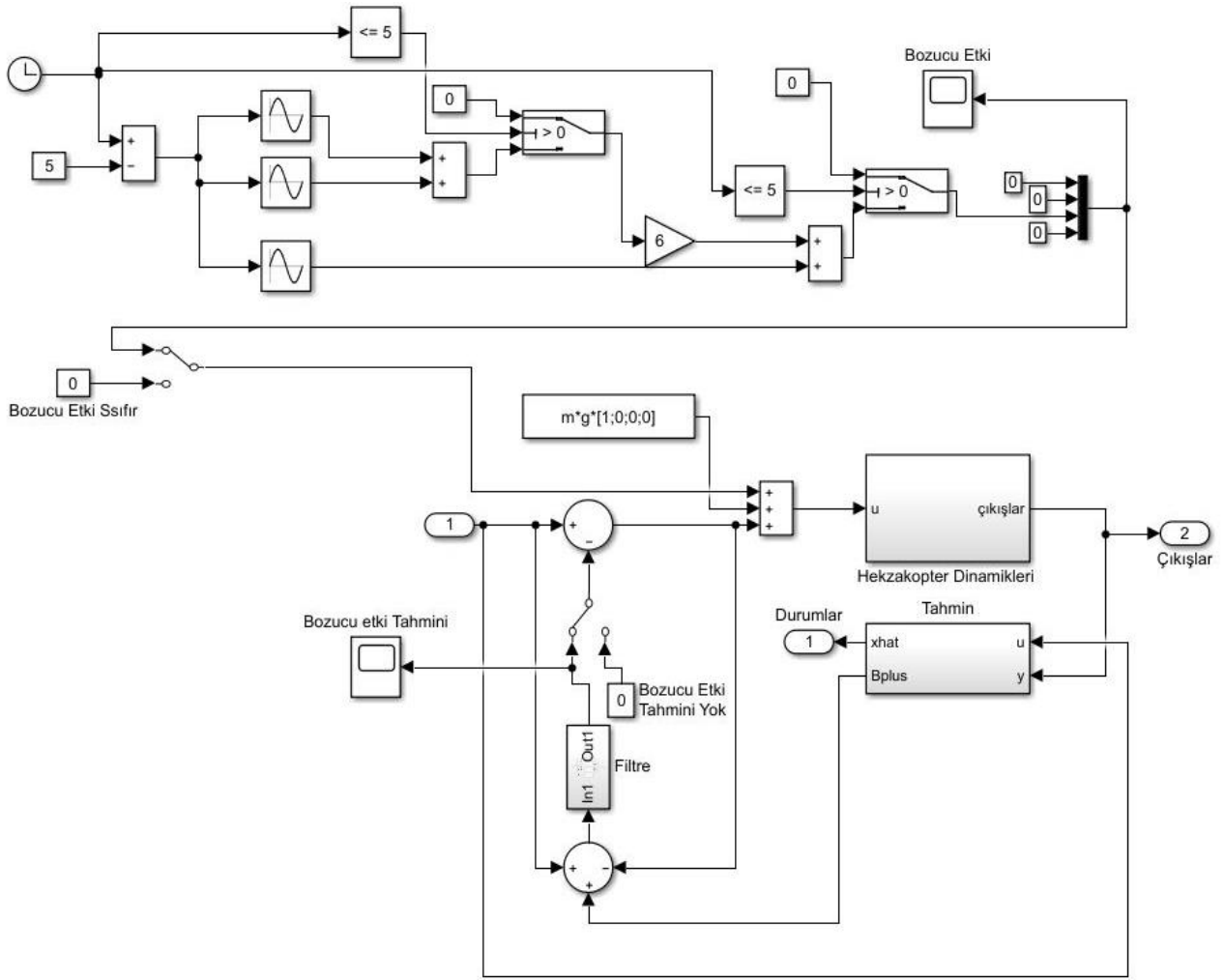
Matlab2017b/Simulink ortamında geliştirilen önerilen denetim yapısı ve İHA modeli Şekil 4’de gösterilmiştir. Şekil 5’de ise alt sistem bloğunun iç yapısı sunulmaktadır. Zaman $t = 5$ saniye olduğunda İHA modeli sinüzoidal bozucu etkiye maruz kalmaktadır. Şekil 6’da bozucu etki ve onun tahmini karşılaştırılması verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi önceden bilinmeyen bozucu etkilerin tahmini oldukça iyi yapılmaktadır.

Standart denetleyicinin yönelim performansı Şekil 7’de gösterilmektedir. Standart denetleyici bozucu etkileri tahmin edecek bir gözlemciye sahip değildir. Bu şekil

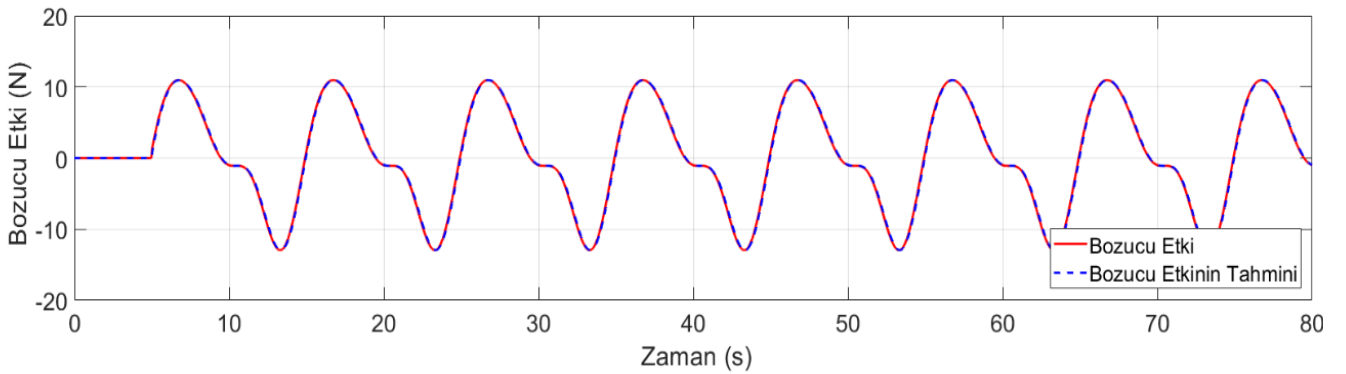
incelendiğinde, bozucu etkinin yunuslama torkunu etkilemesinden dolayı özellikle yunuslama açısında salınımlar gözlenmektedir. Yunuslama açısındaki sapma $\theta = 4^\circ$ olarak ölçülmüştür. Daha yüksek bozucu etkiler, örneğin güçlü rüzgâr İHA’nın kararlılığını kayıp etmesine sebep olabilir. Şekil 8’de önerilen bozucu etki önleyici denetleyicinin benzetim sonuçlarını göstermektedir. Burada ise yunuslama açısındaki salınım $\theta = 0.2^\circ$ olarak ölçülmüştür. Bu şekilden bozucu etkinin tahmin edilmesi sistem performansını geliştirdiği açıkça görülmektedir.



Şekil 4. Matlab2017b/Simulink ortamında geliştirilmiş İHA modeli ve önerilen denetleyici blok diyagramı



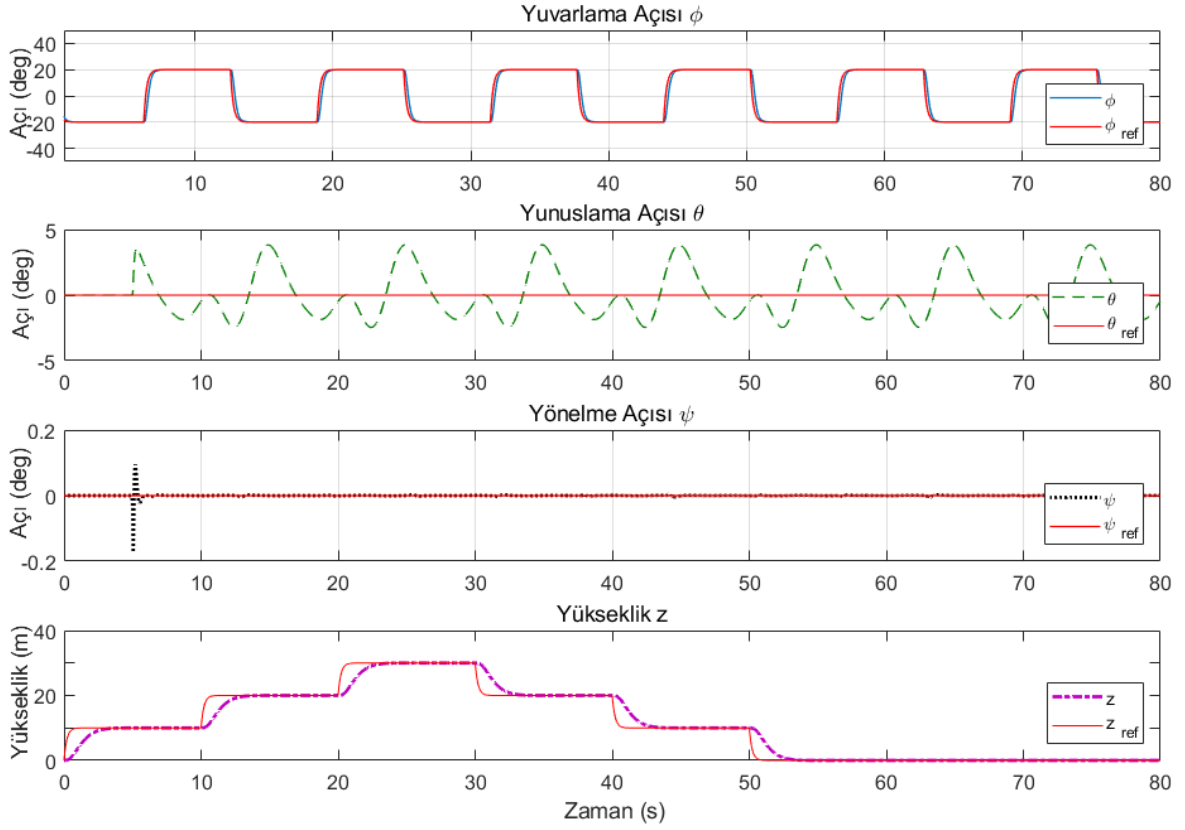
Şekil 5. Alt sistemin içyapı diyagramı



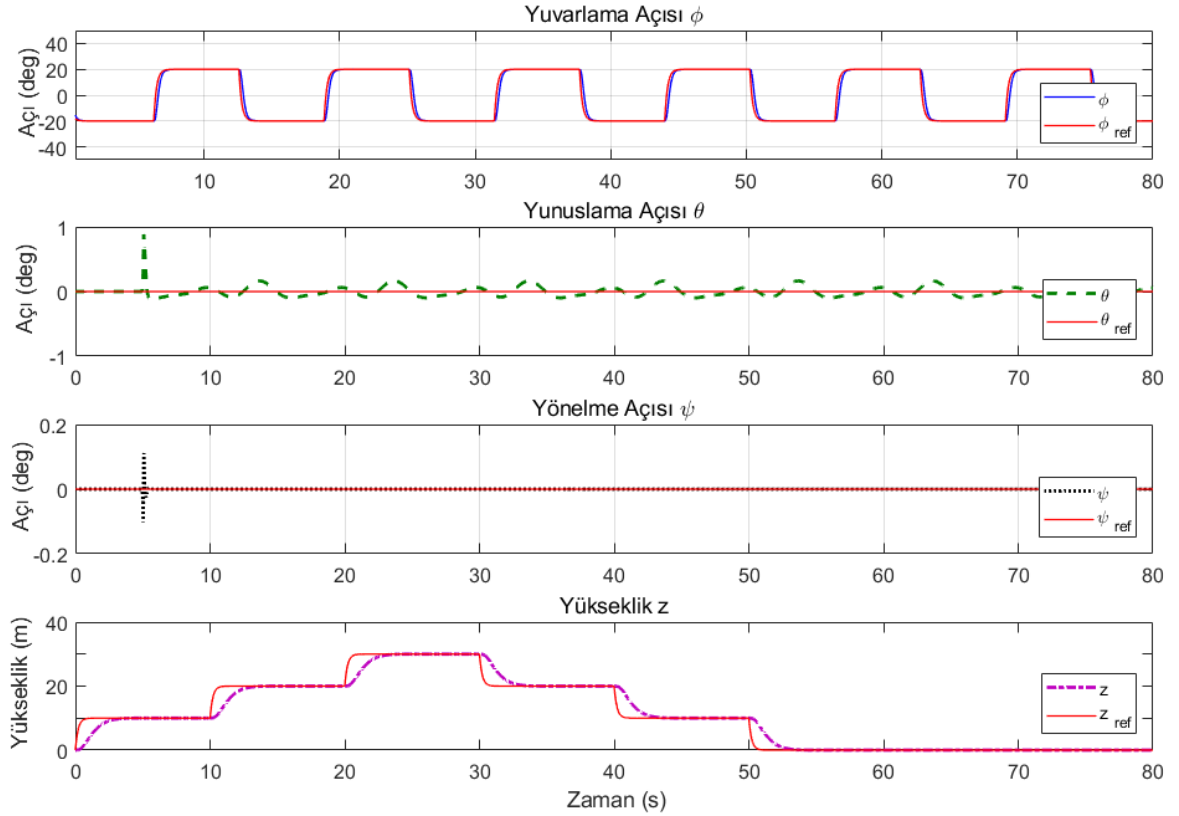
Şekil 6. Bozucu etki $d(t)$ ve bozucu etki tahmininin $\tilde{d}(t)$ karşılaştırması.

Şekil 7 ve 8 karşılaştırıldığında, geliştirilmiş denetleyici tasarımına sahip İHA sisteminin bozucu etkilere maruz kaldığında sistem kararlılığını koruduğu ve referans sinyalini takip performansını iyileştirdiği görülmektedir. Geliştirilmiş denetim kuralı ile yunuslama yönünde yapılan bozucu etkiler elimine edilmiştir. İHA modeli istenilen yüksekliğe çıkmasında her iki denetim yöntemi başarımlı sağlamıştır. Gözlemci ve alçak geçiren filtreden oluşan mekanizmanın

bozucu etkinin tahmin etmesinde gayet başarılı olduğu gözlenmektedir. Sistemdeki belirsizlikler ya da modellenmeyen dinamikler bir bozucu etki olarak düşünülürse aynı yöntem sistemdeki belirsizliğinde üstesinden gelmede de kullanılabilir. Böylece sistemdeki belirsizliklerin etkisi de elimine edilebilir ve sistemin dayanıklılığı geliştirilebilir.



Şekil 7. Bozucu etki tahmini sistemde mevcut değil ve yalnız LQR denetleyici ile benzetim sonuçları.



Şekil 8. Bozucu etkilerin tahmini ve LQR denetleyici ile benzetim sonuçları.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada durum geri beslemeli bozucu etki önleyici denetleyicinin heksakopter İHA modeli için benzetim sonuçları verilmiştir. Önerilen denetim tasarımı, standart geri beslemeli denetleyici ile karşılaştırması yapılmıştır. Bozucu etkilerin eşdeğer yaklaşımı kullanılarak İHA modelinin maruz kaldığı bozucu etkiler tahmin edilmiştir. Önerilen bozucu etki önleyici denetim tasarımı standart denetleyiciye göre yunuslama açısında oldukça az salınım elde edilerek sistemin gürbüz kararlılığını korumasını sağlamıştır. Sistemdeki belirsizlikler ya da modellenmeyen dinamikler bir bozucu etki olarak düşünülürse aynı yöntem sistemdeki belirsizliğinde üstesinden gelmede de kullanılabilir. Gelecek çalışma ise farklı bozucu etki önleyici denetleyici tasarlanarak gerçekleştirilen tasarımı ile karşılaştırma ve ayrıca bu geliştirilen denetleyicinin gerçek sistem üzerinde uygulanmasına yönelik olacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma, “2019.F13.02.01” nolu proje kapsamında Artvin Çoruh Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında desteklenmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] A. Kostas, G. Nikolakopoulos, and A. Tzes, Model predictive quadrotor control: attitude, altitude and position experimental studies. *IET Control Theory & Applications*, 6.12, 1812-1827, 2012. <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2011.0348>
- [2] W.H. Chen, J. Yang, L. Guo and S. Li, Disturbance-observer-based control and related methods—An overview. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63.2, 1083-1095 2016. <https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2478397>
- [3] J. Zhang, D. Gu, C. Deng, and B. Wen, Robust and Adaptive Backstepping Control for Hexacopter UAVs. *IEEE Access*, 7, 163502-163514, 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2951282>
- [4] D. Derawi, N. D. Salim, H. Zamzuri, M. A. Abdul Rahman and Nonami, K. Robust attitude control design for a low-cost hexarotor micro aerial vehicle. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 38(6), 701-721, 2016. <https://doi.org/10.1177/0142331215625768>
- [5] A. Alaimo, V. Artale, C. L. R. Milazzo and A. Ricciardello, PID controller applied to hexacopter flight. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 73(1-4), 261-270, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10846-013-9947-y>
- [6] A. Freddi, S. Longhi, A. Monteriù and M. Prist, Actuator fault detection and isolation system for an hexacopter. *IEEE/ASME 10th International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA)* (pp. 1-6), Senigallia, Italy, 2014.
- [7] C. Rosales, C. M. Soria and F. G. Rossomando, Identification and adaptive PID Control of a hexacopter UAV based on neural networks. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 33(1), 74-9, 2019. <https://doi.org/10.1002/acs.2955>
- [8] J. A. Ligthart, P. Poksawat, L. Wang and H. Nijmeijer, Experimentally validated model predictive controller for a hexacopter. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), pp. 4076–4081, Toulouse, France, 2017.
- [9] N. Tien, D. Saussie, and L. Saydy, Design and Experimental Validation of Robust Self-Scheduled Fault-Tolerant Control Laws for a Multicopter UAV. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, early access, 2020. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2020.3042333>
- [10] K. Guo, J. Jia, X. Yu, L. Guo and L. Xie, Multiple observers based anti-disturbance control for a quadrotor UAV against payload and wind disturbances. *Control Engineering Practice*, 102, 104560, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2020.104560>
- [11] D. Shi, Z. Wu, and W. Chou, Anti-disturbance trajectory tracking of quadrotor vehicles via generalized extended state observer. *Journal of Vibration and Control*, 26.13-14, 1173-1186, 2020. <https://doi.org/10.1177/1077546319892752>
- [12] Y. Yuan, L. Cheng, Z. Wang and C. Sun, Position tracking and attitude control for quadrotors via active disturbance rejection control method. *Science China Information Sciences*, 62(1), 1-10, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11432-018-9548-5>
- [13] J. H. She, H. Kobayashi, Y. Ohyama and X. Xin, Disturbance estimation and rejection-An equivalent input disturbance estimator approach. In *43rd IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, Vol. 2, pp. 1736-1741, Nassau, Bahamas, 2004.
- [14] H. Wei, *Optimal Robust Control Systems Design and Analysis by State Space Approaches*, Ph.D. Thesis, Massey University, Palmerston North, New Zealand, 1995
- [15] B. L. Stevens and F. L. Lewis. *Aircraft Control and Simulation*. John Wiley & Sons, 1992
- [16] X. Chen, W. Cai, M. Wu, and W. Cao, A new approach for periodic disturbance rejection in input-time-delay systems. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 40(8), 2589-2598, 2018. <https://doi.org/10.1177/0142331217707571>
- [17] B. D. O. Anderson and J. B. Moore, *Optimal Control: Linear Quadratic Methods*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 2007.
- [18] K. Zhou, J. C. Doyle, and K. Glover, *Robust and Optimal Control*. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1996.





Asenkron motorların iyileştirilmiş anahtarlamalı-GKF tabanlı alan yönlendirmeli kontrolü

Improved switching-EKF based field oriented control of induction motors

Yunus Emre Altınışık¹, Rıdvan Demir^{2,*}, Murat Barut³

^{1,3} Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye
² Kayseri Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 38280, Kayseri Türkiye

Özet

Bu çalışmada hız-algılayıcısız iyileştirilmiş alan yönlendirmeli kontrol (AYK) tabanlı asenkron motor (ASM) sürücüsü sunulmuştur. Hız-algılayıcısız AYK için gerekli olan rotor akıları ve rotor mekanik hızına ek olarak yük momenti, stator direnci ve rotor direnci giriş olarak ölçülen stator akım ve gerilimlerini kullanarak hafıza gereksinimi ve tasarım aşaması iyileştirilmiş anahtarlamalı genişletilmiş Kalman filtresi (A-GKF) kullanılarak kestirilmiştir. Kestirilen yük momentinin ileri beslemeli kontrolü ile AYK'nın başarımı iyileştirilmiştir. Buna ek olarak parametre değişimlerinden kaynaklanan kestirim hataları stator ve rotor dirençlerinin kestirimi ile azaltılmıştır. Önerilen hız-algılayıcısız ASM sürücü zorlayıcı senaryolar ile benzetim ortamında test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, iyileştirilmiş AYK tabanlı ASM sürücüsünün yüksek başarıma sahip olduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Asenkron motor, Genişletilmiş Kalman filtresi, Alan yönlendirmeli kontrol, İleri beslemeli kontrol, Durum/parametre kestirimi

1 Giriş

Asenkron motorlar (ASM'ler), sağlam yapıları, düşük maliyetleri, düşük bakım gereksinimleri, güvenilirlik ve zorlu ortamlarda çalışabilme özelliklerinden dolayı değişken hız ve/veya moment kontrolüne ihtiyaç duyan endüstriyel uygulamalarda ve elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılmakta olup; bu motorların yüksek başarımlı kontrolü için alan yönlendirmeli kontrol (AYK) ve doğrudan moment kontrol gibi yüksek başarımlı kontrol yöntemleri literatüre tanıtılmıştır. Bununla birlikte, doğrusal olmayan modeli, çalışma koşullarıyla değişen parametreleri ve bilinmeyen yük girişleri hız-algılayıcısız ASM'lerin kontrolünü karmaşık hale getirmektedir. Hız-algılayıcısız kontrolde rotor mekanik hızı ve stator/rotor akılarının kestirilmesi gerekmektedir. Ancak, yük momentindeki değişimler sıcaklık ve frekans gibi ASM'nin çalışma koşullarına bağlı olarak stator ve rotor direncinde meydana gelen değişimler ile birlikte bu kestirimlerde bozulmalara yol açmaktadır.

ASM'lerin hız-algılayıcısız kontrolü için tam dereceli gözlemleyiciler [1], sezgisel algoritmalar [2], modele uyarlamalı sistemler (MUS) [3, 4], genişletilmiş Luenberger [5] ve kayma kipli (sliding mode) [6] gözlemleyiciler ve

Abstract

In this study, the speed-sensorless improved field oriented control (FOC)-based induction motor (IM) drive has been presented. In addition to the rotor fluxes and rotor mechanical speed required for speed-sensorless FOC, the load torque, the stator resistance, and the rotor resistance are estimated by the switching extended Kalman filter (S-EKF) with improved memory requirement and design stage which use the measured stator currents and voltages as inputs. The performance of FOC is improved by the feed-forward control of the estimated load torque. In addition, the estimation errors caused by the parameter variations are reduced with the estimations of the stator and rotor resistances. The proposed speed-sensorless IM drive is tested by challenging scenarios in simulations. The results obtained demonstrate that the improved FOC-based IM drive has a high performance.

Keywords: Induction motor, Extended Kalman filter, Field-oriented control, Feed-forward control, State/parameter estimation

genişletilmiş Kalman filtresi (GKF) [7-9] gibi farklı model tabanlı kestiriciler/gözlemleyiciler literatüre önerilmiştir. Önerilen kestirim yöntemleri arasında GKF'ler ölçme gürültülerini dikkate alarak durum ve parametre kestirim problemlerine olası bir yaklaşım sunmaktadır.

Hız-algılayıcısız ASM sürücüleri için durum ve parametre kestirimini gerçekleştiren GKF tabanlı gözlemleyiciler incelendiğinde; AYK için gerekli olan durumlara ek olarak stator ve rotor direnci kestirimi, Barut vd. (2007)'de [10] iki farklı GKF algoritmasının "anahtarlamalı" olarak çalıştırılmasıyla, Barut vd., (2008)'de [11] iki farklı GKF algoritmasının "örgülü" şekilde çalıştırılmasıyla, Barut vd. (2012)'de [8] iki farklı ASM modelinin tek GKF algoritmasına ait girişlere ardışık anahtarlanarak gerçekleştirilmesiyle ve son olarak, Demir ve Barut (2018)'de [7] ise GKF ve MUS'un paralel çalıştırılmasıyla kestirilmiştir.

Bilinmeyen yük momenti girişlerinin, ASM'lerin hız-algılayıcısız kontrolünde hız kontrol çevrimi üzerinde bozucu bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Bu bozucu etkiyi gidermek için yük momentindeki değişimler kestirilerek hız kontrol döngüsüne ileri beslenerek AYK'nın

başarımının iyileştirilebilir olduğu bilinmektedir. Yük momentinin kestirimi için literatürde iki farklı yaklaşım bulunmaktadır. İlk yaklaşımda, yük momentinin kestirimi kontrol sistemi için gerekli olan durumları kestiren gözlemleyiciye ek olarak harici bir kestirici/gözlemleyici tarafından gerçekleştirilmektedir [12, 13]. İkinci yaklaşımda ise yük momentinin kestirimi tek bir gözlemleyici kullanılarak kontrol sistemi için gerekli olan durumlar ile birlikte gerçekleştirilmektedir [14–16].

Bu çalışmanın temel katkısı stator ve rotor dirençlerinde meydana gelen değişimler ile bilinmeyen yük girişlerinin sebep olduğu bozulmayı önleyebilen yüksek kontrol başarımına sahip hız-algılayıcısız hafıza gereksinimi ve tasarım aşaması iyileştirilmiş AYK tabanlı ASM sürücüsünü literatüre tanıtmaktır. Bu amaç doğrultusunda ilk olarak hız-algılayıcısız AYK için gerekli olan rotor akısı, rotor mekanik hızı ile birlikte stator direnci, rotor direnci ve yük momentinin eş-zamanlı kestirimleri için A-GKF gözlemleyicisi önerilmiştir. Daha sonra, kestirilen yük momentinin ileri beslemeli kontrolü ile AYK'nın başarımı iyileştirilmiştir. Buna ek olarak parametre değişimlerinden kaynaklanan kestirim hataları stator ve rotor dirençlerinin kestirimi ile azaltılmıştır. Böylece tek bir gözlemleyici kullanarak AYK tabanlı ASM sürücüsünün başarımı önemli ölçüde artırılmıştır. Önerilen hız-algılayıcısız ASM sürücüsü zorlayıcı senaryolar ile benzetim ortamında test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, iyileştirilmiş AYK tabanlı ASM sürücüsünün ve A-GKF gözlemleyicisinin yüksek başarıma sahip olduğunu göstermektedir.

2 ASM'nin matematiksel modeli

ASM'lerin matematiksel modeli aşağıdaki verilen genel formda ifade edilebilir.

$$\dot{\mathbf{x}}_k = \mathbf{f}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) + \mathbf{w}_k \quad (1a)$$

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{h}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k \quad (1b)$$

Burada, \mathbf{f} , durum ve girişlerin doğrusal olmayan fonksiyonu; \mathbf{x}_k durum vektörü; \mathbf{u}_k kontrol giriş vektörü; \mathbf{h} çıkışların fonksiyonu; \mathbf{w}_k ve \mathbf{v}_k ise sırası ile süreç ve ölçüm gürültüleri olarak tanımlanabilir.

Genel formu Denklem (1)'de verilen ASM modelindeki vektörler aşağıda verilmiştir.

$$\mathbf{x}_k = [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta} \quad \psi_{r\alpha} \quad \psi_{r\beta} \quad \omega_m]^T$$

$$\mathbf{u}_t = [v_{s\alpha} \quad v_{s\beta}]^T, \quad \mathbf{h} = [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta}]^T$$

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{R_s}{L_\sigma} - \frac{R_r L_m^2}{L_\sigma L_r^2}\right) i_{s\alpha} + \frac{R_r L_m}{L_\sigma L_r^2} \psi_{r\alpha} + \frac{L_m p_p}{L_\sigma L_r} \omega_m \psi_{r\beta} + \frac{v_{s\alpha}}{L_\sigma} \\ -\left(\frac{R_s}{L_\sigma} - \frac{R_r L_m^2}{L_\sigma L_r^2}\right) i_{s\beta} + \frac{R_r L_m}{L_\sigma L_r^2} \psi_{r\beta} - \frac{L_m p_p}{L_\sigma L_r} \omega_m \psi_{r\alpha} + \frac{v_{s\beta}}{L_\sigma} \\ \frac{R_r L_m}{L_r} i_{s\alpha} - \frac{R_r}{L_r} \psi_{r\alpha} - p_p \omega_m \psi_{r\beta} \\ \frac{R_r L_m}{L_r} i_{s\beta} - \frac{R_r}{L_r} \psi_{r\beta} + p_p \omega_m \psi_{r\alpha} \\ \frac{3p_p L_m}{2J_t L_r} (\psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \psi_{r\beta} i_{s\alpha}) - \frac{B_t}{J_t} \omega_m - \frac{\tau_l}{J_t} \end{bmatrix}$$

Burada $v_{s\alpha}$, $v_{s\beta}$, $i_{s\alpha}$ ve $i_{s\beta}$ stator duran eksen takımındaki stator gerilim ve akımlarının bileşenlerini; $\psi_{r\alpha}$ ve $\psi_{r\beta}$ stator duran eksen takımındaki rotor akılarının bileşenlerini; R_r ve R_s rotor ve stator dirençlerini; L_r , L_s ve L_m rotor, stator ve mıknatıslama endüktanslarını; $L_\sigma = \sigma L_s = L_s - L_m^2/L_r$, stator geçici endüktansını; σ kaçak faktörünü; ω_m rotor mekanik açısal hızını; τ_l yük momentini; p_p kutup çifti sayısını; J_t ve B_t sırasıyla ASM ve yükün toplam eylemsizliği ile toplam viskoz sürtünme terimini; p_p ise kutup çifti sayısını ifade etmektedir.

3 Anahtarlamalı GKF'nin tasarımı

GKF ile $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$, $\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$, ω_m , τ_l , R_r ve R_s 'nin eş-zamanlı kestirimini gerçekleştirmek için gözlemleyicide kullanılan ASM modeli; genel formu (1)'de verilen ASM modelinin τ_l ve R_r/R_s ile genişletilmesi ile oluşturulmuştur. Genişletilmiş modelde τ_l ve R_r/R_s kestirilecek olan parametre olarak göz önünde bulundurulmaktadır. Gözlemleyicide kullanılan genişletilmiş ASM modeline ait vektörler aşağıda verilmiştir.

$$\mathbf{x}_{o,k} = [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta} \quad \psi_{r\alpha} \quad \psi_{r\beta} \quad \omega_m \quad \tau_l \quad R_r/R_s]^T,$$

$$\mathbf{u}_{o,k} = [v_{s\alpha} \quad v_{s\beta}]^T, \quad \mathbf{h}_o = [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta}]^T,$$

$$\mathbf{f}_o = \begin{bmatrix} -\left(\frac{R_s}{L_\sigma} - \frac{R_r L_m^2}{L_\sigma L_r^2}\right) i_{s\alpha} + \frac{R_r L_m}{L_\sigma L_r^2} \psi_{r\alpha} + \frac{L_m p_p}{L_\sigma L_r} \omega_m \psi_{r\beta} + \frac{v_{s\alpha}}{L_\sigma} \\ -\left(\frac{R_s}{L_\sigma} - \frac{R_r L_m^2}{L_\sigma L_r^2}\right) i_{s\beta} + \frac{R_r L_m}{L_\sigma L_r^2} \psi_{r\beta} - \frac{L_m p_p}{L_\sigma L_r} \omega_m \psi_{r\alpha} + \frac{v_{s\beta}}{L_\sigma} \\ \frac{R_r L_m}{L_r} i_{s\alpha} - \frac{R_r}{L_r} \psi_{r\alpha} - p_p \omega_m \psi_{r\beta} \\ \frac{R_r L_m}{L_r} i_{s\beta} - \frac{R_r}{L_r} \psi_{r\beta} + p_p \omega_m \psi_{r\alpha} \\ \frac{3p_p L_m}{2J_t L_r} (\psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \psi_{r\beta} i_{s\alpha}) - \frac{\tau_l}{J_t} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Denklem (2)'de verilen ileri Euler yaklaşımının kullanılması ile gözlemleyicide kullanılan ayrık zamanlı ASM modeli Denklem (3)'teki gibi verilir.

$$\hat{\mathbf{x}}_k \approx \frac{\mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k}{T} \quad (2)$$

$$\mathbf{x}_{o,k+1} = \mathbf{I}_{7 \times 7} \times \mathbf{x}_{o,k} + T \times \mathbf{f}_o \quad (3)$$

Burada \mathbf{I} birim matris ve T örnekleme zamanıdır.

$i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$, $\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$, ω_m , τ_l , R_r ve R_s 'nin eş-zamanlı kestirimini gerçekleştiren GKF algoritmasına ilişkin geleneksel denklemler aşağıda verilmiştir.

- Doğrusallaştırma

$$\mathbf{F}_{k+1|k} = \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u})}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}_{k+1}} \quad (4)$$

- Kestirim veya zaman güncellemesi

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1} = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}_k, \mathbf{u}_{k+1}) \quad (5)$$

$$\mathbf{P}_{k+1}^- = \mathbf{F}_{k+1} \mathbf{P}_k \mathbf{F}_{k+1}^T + \mathbf{Q} \quad (6)$$

- Ölçüm veya düzeltme güncellemesi

$$\mathbf{K}_{k+1} = \mathbf{P}_{k+1}^- \mathbf{H}_{k+1}^T [\mathbf{H}_{k+1} \mathbf{P}_{k+1}^- \mathbf{H}_{k+1}^T + \mathbf{R}]^{-1} \quad (7)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1} = \hat{\mathbf{x}}_{k+1}^- + \mathbf{K}_{k+1} (\mathbf{z}_{k+1} - \mathbf{H}_{k+1} \hat{\mathbf{x}}_{k+1}^-) \quad (8)$$

$$\mathbf{P}_{k+1} = \mathbf{P}_{k+1}^- - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{P}_{k+1}^- \quad (9)$$

Burada $\mathbf{F}_{k+1|k}$ doğrusal olmayan modeli doğrusallaştırmada kullanılan fonksiyonu; \mathbf{P}_{k+1}^- ve \mathbf{P}_{k+1} sırasıyla hata kovaryans matrisinin önceki ve sonraki değerlerini; \mathbf{K}_{k+1} Kalman kazancını; \mathbf{Q} sistem gürültüsünün kovaryans matrisini; \mathbf{R} ise çıkış gürültüsünün kovaryans matrisini ifade etmektedir. Bu çalışmada durum ve parametre kestiriminde kullanılan genel şeması Şekil 1'de verilen hafıza gereksinimi ve tasarım aşaması iyileştirilmiş A-GKF algoritması Denklem (4)-(9) incelenerek aşağıdaki yorumlar altında oluşturulmuştur.

Yorum 1: Denklem (5)-(9) GKF'nin kestirim ve düzeltme adımlarını oluşturur.

Yorum 2: Denklem (5)-(9)'da \mathbf{f} , \mathbf{F} ve \mathbf{Q} matrislerinde sadece R_r ve R_s 'ye bağlı olarak üretilen girişler anahtarlanmaktadır.

Önerilen A-GKF algoritması, $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$, $\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$, ω_m , τ_l , R_r ve R_s 'nin eş-zamanlı kestirimini; iki GKF algoritmasının anahtarlamalı çalıştırılması ile gerçekleştiren Barut vd. (2007) [10] ve Barut vd. (2008) [11] ve iki ASM modelinin tek bir GKF gövdesinin girişinde anahtarlanması ile gerçekleştiren Barut vd. (2012) [8]'den farklı olarak tek bir ASM modelinin içerisinde sadece R_r ve R_s 'ye bağlı olarak üretilen girişlerin anahtarlanması ile gerçekleştirmektedir. Her bir anahtarlama periyodunda kestirilen $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$, $\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$, ω_m , ve τ_l 'ye ilave olarak R_r ve R_s 'den yalnız bir tanesi kestirilir. R_r ya da R_s 'nin kestirilmiş değeri diğer direnç kestiriminin gerçekleştirildiği periyotta GKF algoritmasının girişinde sabit parametre olarak kullanılır. Böylece önerilen A-GKF algoritması, $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$, $\psi_{r\alpha}$, $\psi_{r\beta}$, ω_m , τ_l , R_r ve R_s 'nin eş-zamanlı kestirimini;

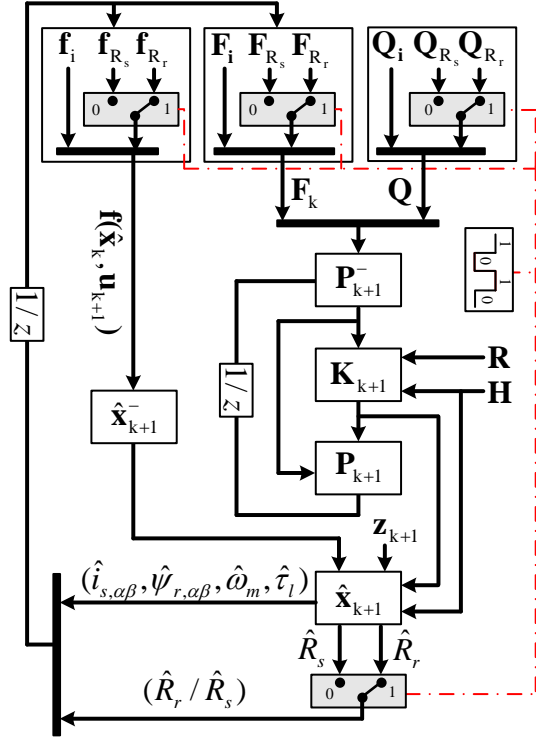
- iki GKF algoritmasının anahtarlamalı çalıştırılması ile gerçekleştiren Barut vd. (2007) [10] ve Barut vd. (2008) [11] ile,
- iki ASM modelinin tek bir GKF gövdesinin girişinde anahtarlandığı Barut vd. (2012) [8] ile

kıyaslandığında hafıza gereksinimi ve zaman alıcı tasarım aşamaları iyileştirilmiş olmaktadır.

4 İyileştirilmiş hız-algılayıcısız AYK'lı ASM sürücüsü

Geleneksel AYK'dan farklı olarak hız kontrolünü iyileştirmek için kestirilen yük momenti hız kontrol çevrimine dahil edildiği iyileştirilmiş AYK blok şeması Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekil 2'de verilen bütün kontrolörler PI tipi kontrolördür ve $\hat{\theta}_{r,f}$ stator duran eksenine göre rotor akısının açısıl konumudur. Hız-algılayıcısız AYK için gerekli olan rotor hızı ve rotor akısı ile birlikte yük momenti, rotor direnci ve stator direncinin kestirimi bu

çalışmada önerilen A-GKF gözlemleyicisi tarafından gerçekleştirilmektedir.



Şekil 1. İyileştirilmiş A-GKF algoritmasının blok şeması

5 Benzetim çalışmaları

Önerilen AYK tabanlı ASM sürücüsü MATLAB/Simulink ortamında tasarlanmıştır. Benzetim çalışmalarında kullanılan ASM'nin anma değerleri ve parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. Benzetim çalışmalarında örnekleme zamanı (T) $100 \mu s$ olarak seçilmiştir. ASM'lerde rotor direncinin değeri stator direncine göre daha doğru belirlenemediği için GKF gözlemleyici ilk olarak stator direncinin anma değeri ile başlatılıp R_r kestirimi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, $t = 0.2s$ 'de R_r ve R_s 'ye bağlı olarak üretilen girişler her $1 \times T$ 'de bir anahtarlanarak kestirimler eş-zamanlı olarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. ASM'nin anma değerleri ve parametreleri [17]

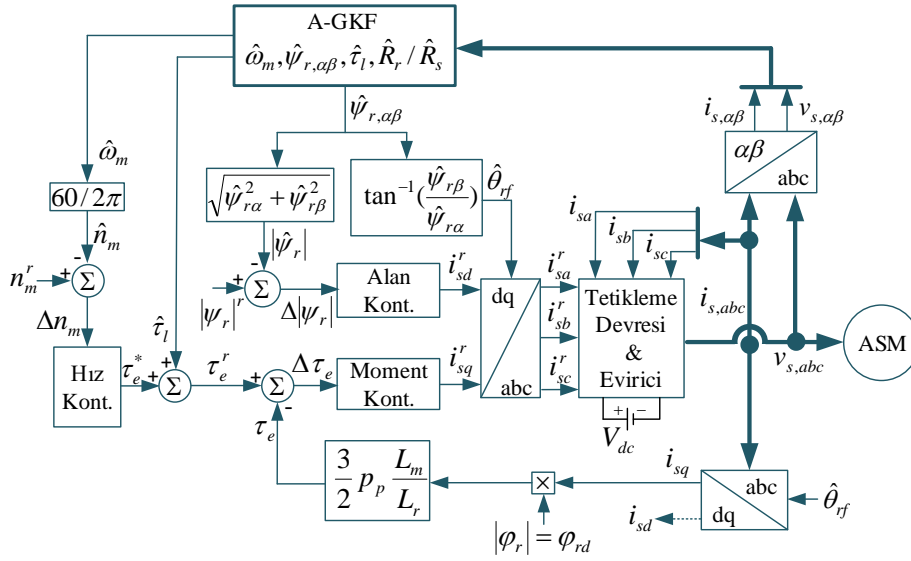
P [kW]	3	p_p	2
f [Hz]	50	R_s [Ω]	2.283
V [V]	380	R_r [Ω]	2.133
I [A]	6.9	L_s [H]	0.2311
n_m [dev/dk]	1430	L_r [H]	0.2311
τ_l [N.m]	20	L_m [H]	0.22

A-GKF algoritmasının başarımını etkileyen ve deneme yanılma yöntemi ile belirlenen gürültü kovaryans matrisleri (\mathbf{Q} ve \mathbf{R}) ile hata kovaryans matrisinin (\mathbf{P}_0 'ın) başlangıç değerleri aşağıdaki gibidir:

$$\mathbf{Q} = \text{diag}\{10^{-5} \ 10^{-5} \ 10^{-9} \ 10^{-9} \ 10^{-5} \ 10^{-2} \ 10^{-3}/10^{-3}\}$$

$$\mathbf{R} = \text{diag}\{10^{-6} \ 10^{-6}\}$$

$$\mathbf{P}_0 = \text{diag}\{10 \ 10 \ 10 \ 10 \ 10 \ 10 \ 10/10\}$$



Şekil 2. Önerilen hız-algılayıcısız AYK tabanlı ASM sürücüsünün blok şeması

Önerilen AYK tabanlı ASM sürücüsünün başarımını göstermek için, yük momentini değişimleri altında yük momentinin ileri beslemeli kontrolünün (IBK'nın) dahil edildiği önerilen AYK tabanlı sürücü sistemi ve dahil edilmediği geleneksel AYK tabanlı sürücü sistemi için karşılaştırmalı sonuçlar verilmiştir. Her iki sürücü sisteminin başarımını test etmek için üretilen senaryolar aşağıda verilmiştir:

- İlk senaryoda sıfır hız bölgesinde yük momentini, rotor direnci ve stator direnci değişimleri altında ASM sürücülerinin kontrol başarımları ve A-GKF gözlemleyicisinin kestirim başarımını test edilmiştir.
- İkinci senaryoda anma hız bölgesinde yük momentini, rotor direnci ve stator direnci değişimleri altında ASM sürücülerinin kontrol başarımları ve A-GKF gözlemleyicisinin kestirim başarımını test edilmiştir.
- Son olarak IBK'lı AYK tabanlı ASM sürücüsünün başarımını geniş bir hız aralığında test edilmiştir.

AYK tabanlı ASM sürücülerinden elde edilen karşılaştırmalı benzetim sonuçları Şekil 3-6'da, geniş bir hız aralığında test edilen IBK'lı AYK tabanlı ASM sürücüsünden elde edilen sonuçlar ise Şekil 7'de verilmiştir.

Şekil 3, 5 ve 7'de kullanılan "m" ve "ref" üst indisleri sırasıyla ölçülen büyüklük ve referans değişimleri, "∗" A-GKF gözlemleyici tarafından kestirilen durum ve parametreleri, Şekil 4, 6 ve 7'de ise "e_(∗)" kestirilen durum ve parametreler ile referans değişimler arasındaki hatayı ifade etmektedir.

5.1 Senaryo I

Bu senaryoda önerilen hız-algılayıcısız AYK tabanlı ASM sürücüsünün başarımı, sıfır hız bölgesinde yük momentini, rotor direnci ve stator direnci değişimleri altında test edilmiştir. Önerilen sürücü sisteminin başarımını kestirilen yük momentinin kontrol sisteminde hız çevrimine dahil edilmediği sürücü sistemi ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Bu amaç için, ASM sıfır ile yüksüz olarak

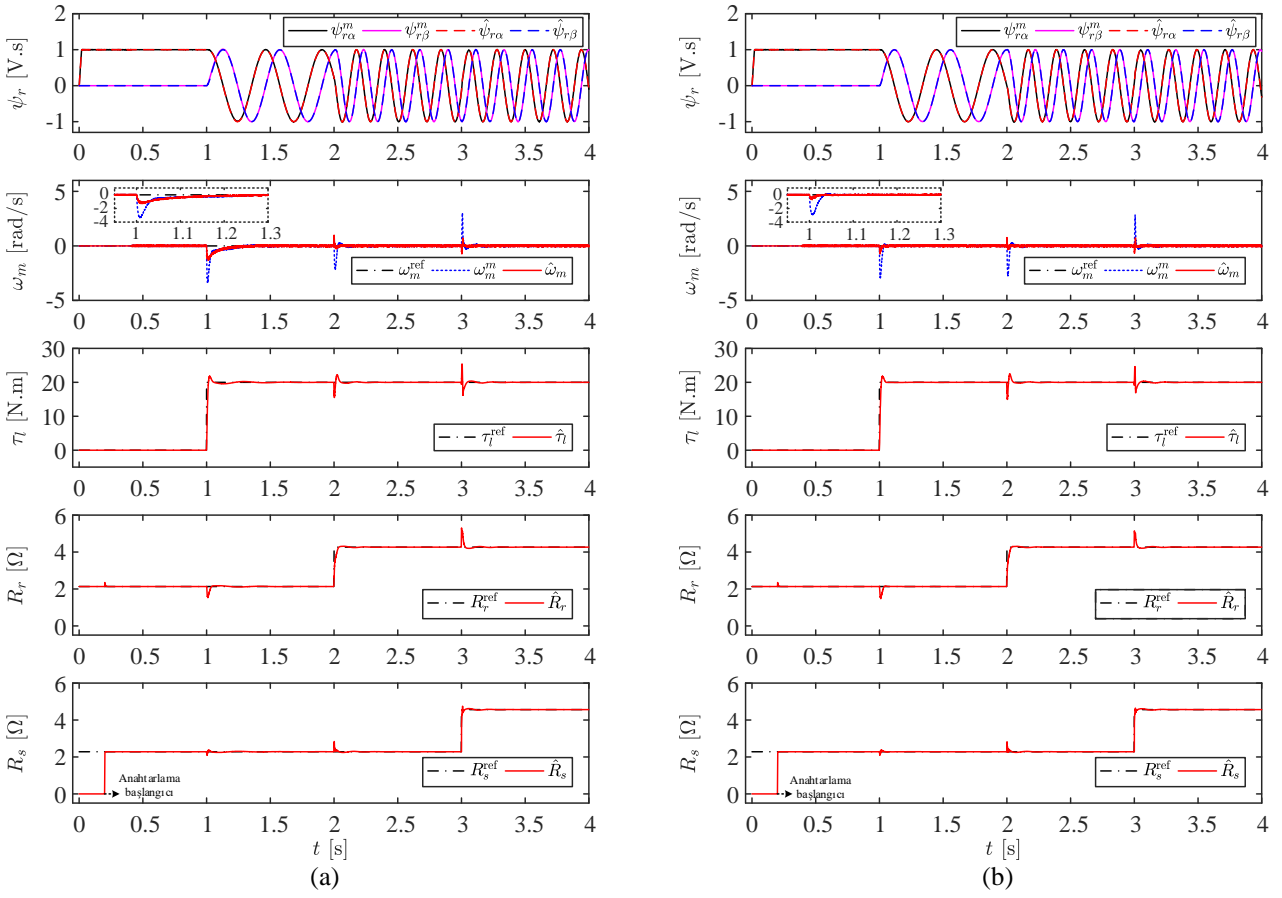
sürülürken sırasıyla ve basamak biçiminde t=1s'de yük momentini anma değerine, t=2s'de rotor direnci anma değerinin iki katına son olarak t=3s'de stator direnci anma değerinin iki katına çıkarılmıştır. Her iki sürücü sistemine ait sonuçlar Şekil 3 ve 4'te verilmiştir. Her iki sürücü sistemi de yük momentini, rotor ve stator direncinde meydana getirilen değişimlerin üstesinden gelse de, yük momentinin hız çevrimine ileri beslendiği sürücü sisteminde yük momentinin basamak değişimi ile meydana gelen geçici durum, geleneksel AYK tabanlı ASM sürücüsüne göre % 90 daha kısadır.

5.2 Senaryo II

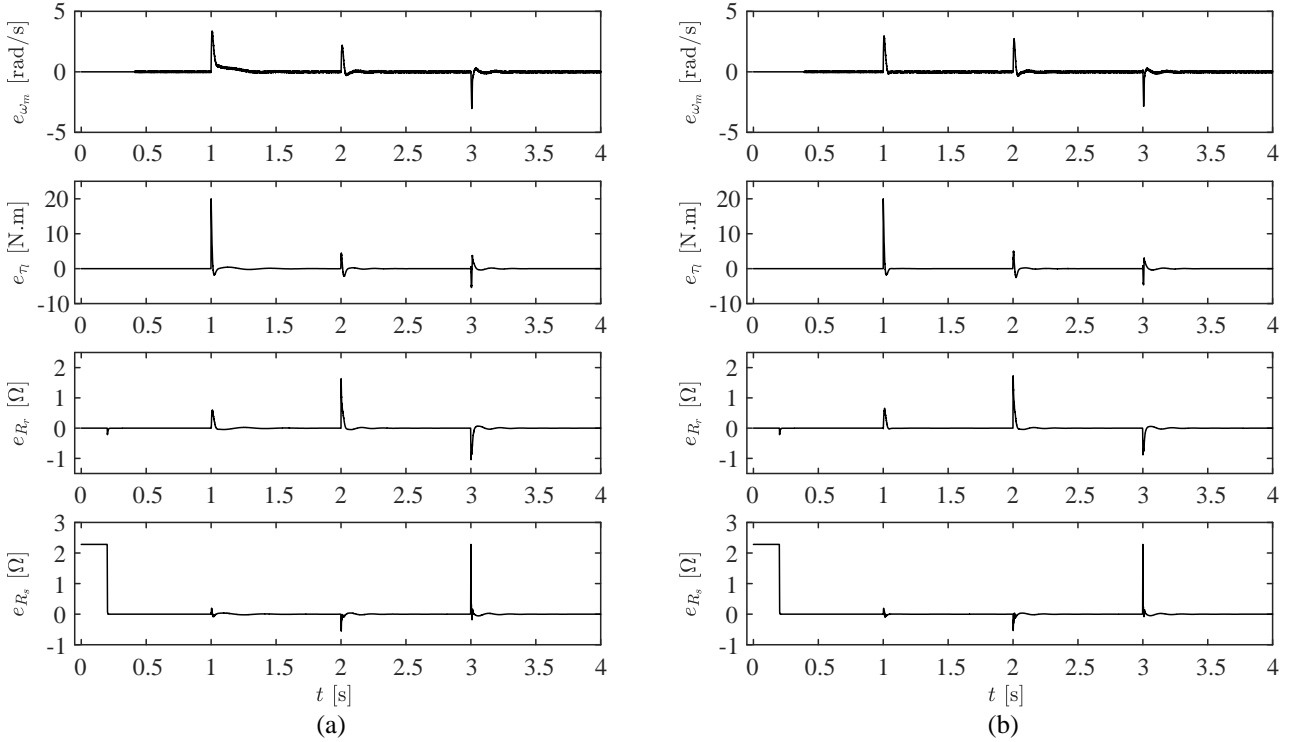
Bu senaryoda önerilen hız-algılayıcısız AYK tabanlı ASM sürücüsünün başarımı, anma hız bölgesinde basamak şeklinde meydana getirilen yük momentini, rotor direnci ve stator direnci değişimleri altında test edilmiştir. Her iki sürücü sisteminin kontrol başarımları Şekil 5 ve 6'da verilmiştir. İlk senaryoya benzer şekilde yük momentinin hız çevrimine ileri beslendiği hız-algılayıcısız AYK tabanlı ASM sürücüsünde yük momentinin değişimi ile meydana gelen ω_m'deki geçici durum geleneksel AYK tabanlı ASM sürücüsüne göre daha kısadır. Ayrıca, anma hızında rotor ve stator direnci değişimlerine karşı her iki sürücü de yüksek başarıma sahiptir.

5.3 Senaryo III

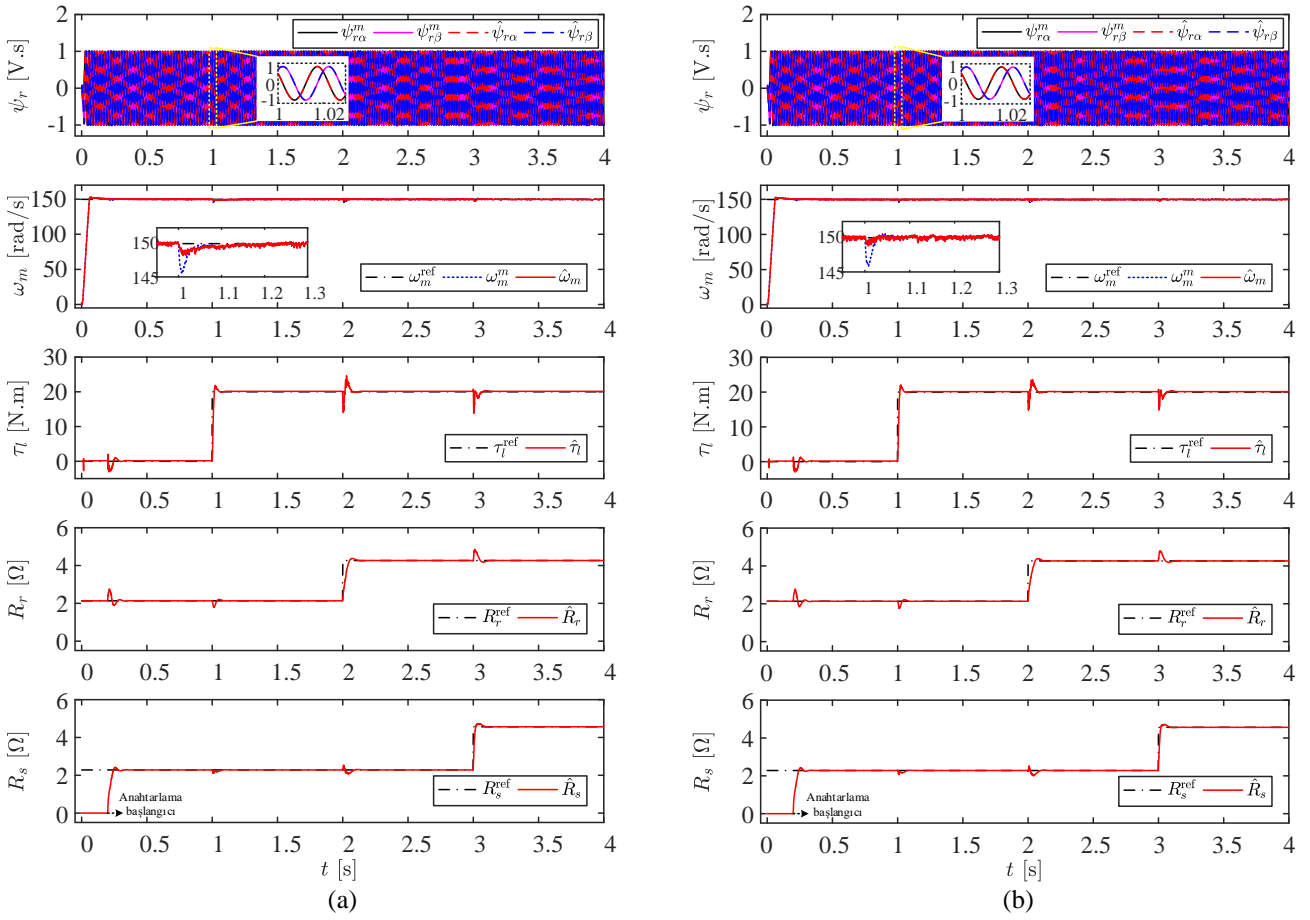
Bu senaryoda önerilen iyileştirilmiş hız-algılayıcısız IBK'lı AYK tabanlı ASM sürücüsünün başarımı, sıfır hız, anma hızı ve hız terslendirmesini içeren geniş bir hız bölgesinde basamak ve/veya doğrusal şekilde üretilen yük momentini, rotor direnci ve stator direnci değişimleri altında test edilmiştir. A-GKF ile iyileştirilmiş hız-algılayıcısız AYK tabanlı ASM sürücü sisteminin kontrol başarımı Şekil 7'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar önerilen AYK tabanlı sürücü sisteminin yük ve direnç değişimleri altında her iki yönde de yüksek bir başarıma sahip olduğunu onaylamaktadır.



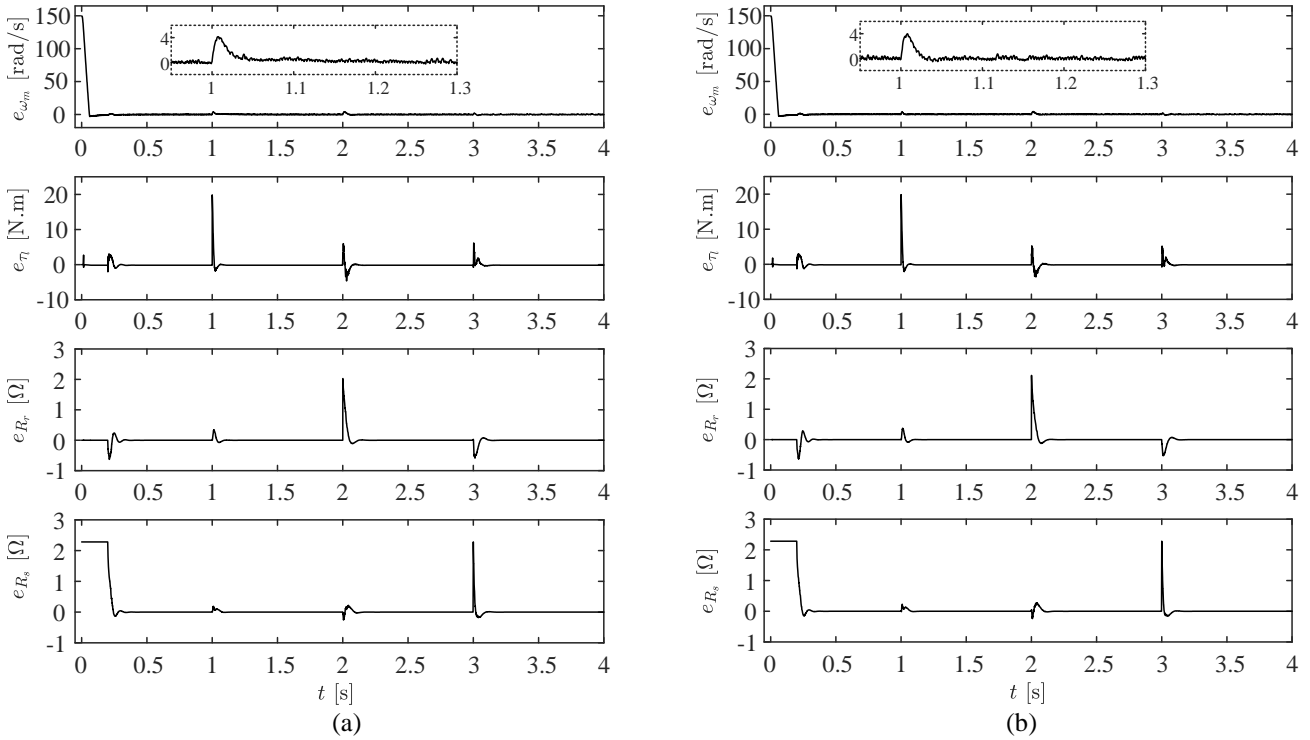
Şekil 3. Sıfır hızda ASM sürücüsünün kontrol ve A-GKF'nin kestirim başarımları (a) IBK'sız AYK ve (b) IBK'lı AYK



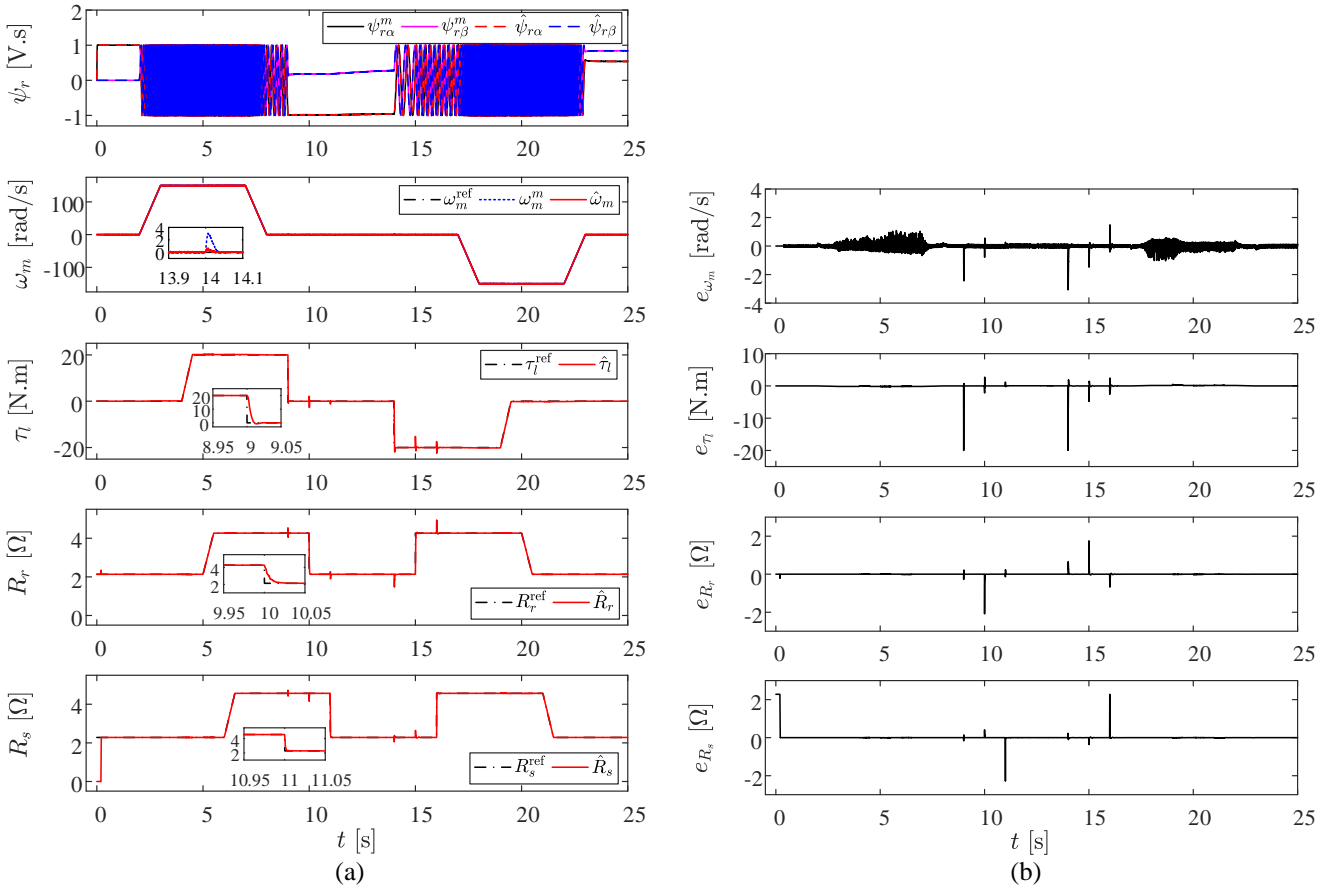
Şekil 4. Sıfır hızda ASM sürücüsünün ve A-GKF'nin izleme ve kestirim hataları (a) IBK'sız AYK ve (b) IBK'lı AYK



Şekil 5. Anma hızda ASM sürücüsünün kontrol ve A-GKF'nin kestirim başarımları (a) IBK'sız AYK ve (b) IBK'lı AYK



Şekil 6. Anma hızda ASM sürücüsünün ve A-GKF'nin izleme ve kestirim hataları (a) IBK'sız AYK ve (b) IBK'lı AYK



Şekil 7. IBK'lı AYK tabanlı ASM sürücüsünün kontrol başarımı (a) Kestirim ve kontrol başarımı (b) Kestirim ve izleme hataları

Benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar (Şekil 3-7) hem sıfır hız hem de anma hızı bölgelerinde, bu çalışmada önerilen A-GKF kestirim algoritmasının ve yük momentinin hız çevrimine İBK'sı ile iyileştirilen AYK sisteminin yüksek başarıma sahip olduğu onaylanmaktadır. Ayrıca, Şekil 3 ASM'lerin durum ve parametre kestirimi için doğru akım (DA) koşulu [18] ($0s \leq t \leq 1s$) olarak bilinen en kötü senaryoyu içermektedir. Bu zorlayıcı DA koşuluna rağmen önerilen A-GKF algoritmasının kestirim ve AYK tabanlı ASM sürücüsünün kontrol başarımları oldukça iyidir.

Özetle yalnızca ölçülen stator akım ve gerilimlerini kullanan ve bu çalışmada önerilen A-GKF ile, AYK için gerekli olan ψ_{ra} , $\psi_{r\beta}$, ω_m durumları ile birlikte τ_l , R_r ve R_s parametreleri eş-zamanlı olarak yüksek bir doğrulukla sıfır hız, anma hızı ve hız terslendirmelerini içeren geniş bir hız aralığında benzetim temelli olarak kestirilebilmektedir.

6 Sonuçlar

Bu çalışmada hız-algılayıcısız hafıza gereksinimi ve tasarımı iyileştirilmiş A-GKF'yi kullanan AYK tabanlı bir ASM sürücüsü önerilmiştir. Ölçülen stator akım ve gerilimlerini kullanarak hız-algılayıcısız AYK için gerekli olan rotor akıları ve rotor mekanik hızına ek olarak yük momenti, stator direnci ve rotor direnci önerilen A-GKF ile kestirilmiştir. Böylece bilinmeyen yük momenti, stator ve rotor dirençlerinin değişimlerinin kestirim ve kontrol

sisteminde meydana getirdiği bozulmalar giderilmiştir. Önerilen hız-algılayıcısız ASM sürücüsü zorlayıcı senaryolar ile benzetim ortamında test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, iyileştirilmiş AYK tabanlı ASM sürücüsünün yüksek başarıma sahip olduğunu göstermektedir.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %8

Kaynaklar

- [1] S. Yin, Y. Huang, Y. Xue, D. Meng, C. Wang, Y. Lv, L. Diao and J. Jatskevich, Improved full-order adaptive observer for sensorless induction motor control in railway traction systems under low-switching frequency. IEEE Journal of Emerging and Selected in Topic Power Electronics, 7(4), 2333–2345, 2019. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2019.2898875>
- [2] M. Celebi and M. Toren, Heuristic algorithm-based estimation of rotor resistance of an induction machine by slot parameters with experimental verification. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 25, 3553-3568 2017. <https://doi.org/10.3906/elk-1511-232>
- [3] A. Pal, S. Das, and A. K. Chattopadhyay, An improved rotor flux space vector based MRAS for field-oriented

- control of induction motor drives. IEEE Transaction on Power Electronics, 33(6), 5131–5141, 2018. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2657648>.
- [4] E. Zerdali and E. C. Mengüç, Novel complex-valued stator current-based MRAS estimators with different adaptation mechanisms. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 68(10), 3793–3795, 2019. <https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2932161>.
- [5] J. You, W. Wu, and Y. Wang, An Adaptive Luenberger Observer for Speed-Sensorless Estimation of Induction Machines. 2018 Annual American Control Conference (ACC), pp. 307–312, Milwaukee, WI, USA, 27-29 June 2018. <https://doi.org/10.23919/ACC.2018.8431006>.
- [6] Y. Zhang, Z. Yin, J. Liu, and X. Tong, Design and implementation of an adaptive sliding-mode observer for sensorless vector controlled induction machine drives. Journal of Electrical Engineering and Technology, 13(3), 1304–1316, 2018. <https://doi.org/10.5370/JEET.2018.13.3.1304>.
- [7] R. Demir and M. Barut, Novel hybrid estimator based on model reference adaptive system and extended Kalman filter for speed-sensorless induction motor control. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 40(13), 3884–3898, 2018. <https://doi.org/10.1177/0142331217734631>.
- [8] M. Barut, R. Demir, E. Zerdali, and R. Inan, Real-Time implementation of bi input-extended Kalman Filter-based estimator for speed-sensorless control of induction motors. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 59(11), 4197–4206, 2012. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2178209>.
- [9] R. Yildiz, M. Barut, and R. Demir, Extended Kalman filter based estimations for improving speed-sensored control performance of induction motors. IET Electric Power Applications, 14(12), 2471–2479 2020. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2020.0319>.
- [10] M. Barut, S. Bogosyan, and M. Gokasan, Switching EKF technique for rotor and stator resistance estimation in speed sensorless control of IMs. Energy Conversion and Management, 48(12), 3120–3134, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.04.026>
- [11] M. Barut, S. Bogosyan, and M. Gokasan, Experimental evaluation of braided EKF for sensorless control of induction motors, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 55(2), 620–632, 2008. <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.911956>.
- [12] X. Zhang, Sensorless induction motor drive using indirect vector controller and sliding-mode observer for electric vehicles. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 62(7), 3010–3018, 2013. <https://doi.org/10.1109/TVT.2013.2251921>.
- [13] B. Wang, C. Luo, Y. Yu, G. Wang, and D. Xu, Antidisturbance speed control for induction machine drives using high-order fast terminal sliding-mode load torque observer. IEEE Transaction on Power Electronics, 33(9), 7927–7937, 2018. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2765522>.
- [14] E. Zerdali, R. Demir, and M. Barut, Speed-Sensorless FCS-PTC Based Induction Motor Drive Capable of Disturbance Rejection. 2020 2nd Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM), pp. 170–175, Izmir, Turkey, 20-23 October 2020 <https://doi.org/10.1109/GPECOM49333.2020.9247917>
- [15] E. Zerdali and R. Demir, Speed-sensorless predictive torque controlled induction motor drive with feed-forward control of load torque for electric vehicle applications. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 29, 223-240 2021, <https://doi.org/10.3906/elk-2005-75>.
- [16] R. Demir and E. Zerdali, Improved Speed-Sensorless Field-Oriented Controlled Induction Motor Drive With Feed-Forward Control of Load Torque. 2. International Turkic World Congress on Science and Engineering, (TURK-COSE 2020) pp. 525–532 Nur-Sultan, Kazakhstan, 14-15 November 2020.
- [17] R. Inan, R. Demir ve M. Barut, Asenkron motorun karma kestirici tabanlı hız-algılayıcı doğrudan vektör kontrolü. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7(2), 612-623 2018. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.443233>.
- [18] J. Holtz, Sensorless control of induction motors-performance and limitations. Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. (ISIE 2000), pp. PL12-PL20, Cholula, Puebla, Mexico, 4-8 December 2000. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2000.930474>.





0-500 μ A sürekli DC kontrollü dental iyontoforez sistemi tasarımı ve performans incelemesi

Design and performance review of 0-500 μ A continuous DC controlled dental iontophoresis system

Serkan Dişlitaş^{1,*} 

¹ Hitit Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 19030, Çorum, Türkiye

Özet

Dentin hassasiyeti (DH) tedavisinde invaziv olmayan en etkili yöntemlerden biri dental iyontoforezdir. Dental iyontoforez, insan sağlığına zararsız mikroamper seviyesinde doğru akımın (DC), özel solüsyon ile birlikte DH olan bölgeye uygulanarak tübüllerin tıkanması prensibine dayalı bir tedavi yöntemidir. Bu çalışmada, DH'nin dişe zarar vermeden uzun süre etkili tedavi edilmesi amacıyla, vücut elektriksel direnci ve polarizasyona bağlı olarak sürekli DC kontrolünün yapıldığı mikrodenetleyici tabanlı dental iyontoforez sistemi (mikroDİS) tasarlanmış ve bir prototip geliştirilmiştir. mikroDİS'te iyontoforez akımı hastanın ağrı eşiğine bağlı olarak 0-500 μ A aralığında ve 10 μ A hassasiyetle, tedavi süresi ise 0-600 s arasında ayarlanabilmektedir. Deneysel çalışmalara göre; mikroDİS vücut direnç değişimine bağlı olarak gerilimi 0-35 V DC arasında ayarlayarak, 0-70 K Ω aralığında 500 μ A, 71-140 K Ω aralığında 250 μ A ve 141-280 K Ω aralığında 125 μ A sürekli sabit akımı ± 1 μ A doğrulukta verebilmektedir. Sonuç olarak; vücut direnci ve polarizasyon etkisine karşı duyarlı mikroDİS'in, DH'nin tedavi edilmesine yönelik tıbbi uygulamalar ile bilimsel araştırmaların yapılmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: Dentin hassasiyeti, tedavi, dental iyontoforez sistemi, mikrodenetleyici.

1 Giriş

Özellikle soğuk, sıcak ve asidik olmak üzere çeşitli uyarıcılara bağlı olarak dişlerde kısa süreli keskin ağrı şeklinde ortaya çıkan dentin hassasiyeti (DH), önemli bir ağız sağlığı problemi oluşturmaktadır. DH'nin insan sağlığına herhangi bir risk oluşturmadan, hızlı ve güvenilir bir şekilde tedavi edilmesine yönelik dünyada geniş çaplı araştırmalar yapılmaktadır. Zaman içerisinde topikal florid, dental iyontoforez, lazer gibi çeşitli yöntem ve sistemler geliştirilmesine rağmen, literatürde DH'nin tedavisine yönelik tam olarak etkili, ideal bir yöntem olmadığı ifade edilmektedir [1, 2].

DH tedavisinin temelinde ağızdaki dentin tübüllerinin sayısının azaltılması, ağızlarının kapatılması ve çaplarının daraltılması ile tübüllerdeki sıvı hareketinin azaltılması ve

Abstract

One of the most effective non-invasive methods in the treatment of dentin hypersensitivity (DH) is dental iontophoresis. Dental iontophoresis is a treatment method based on the principle of occlusion of tubules by applying direct current (DC) with a special solution to DH area at the level of microamper harmless to human health. In this study, for the long-term effective treatment of DH without damaging the tooth, a microcontroller-based dental iontophoresis system (microDIS) is designed, which controls continuous DC depending on body resistance and polarization, and a prototype is also developed. Iontophoresis current in microDIS can be adjusted between 0-500 μ A and 10 μ A resolution, depending on the pain threshold of the patient, and the duration of treatment between 0-600 s. According to experimental studies, depending on the body resistance change, the voltage is adjusted automatically between 0-35 V DC, and thus continuous constant current of 500 μ A in the 0-70 K Ω range, 250 μ A in the 71-140 K Ω range, and 125 μ A in the 141-280 K Ω range can be given with ± 1 μ A accuracy. As a result, microDIS, which is sensitive to body electrical resistance and polarization effect, is thought to contribute to scientific researches and medical applications for the treatment of DH.

Keywords: Dentin hypersensitivity, treatment, dental iontophoresis system, microcontroller.

sinir iletiminin bloke edilmesine yönelik ajanların kullanımı yer almaktadır [3]. Klinik olarak DH tedavisinin tahriş ve renklenme yapmayan, ağrısız, uygulaması kolay, hızlı sonuç veren ve uzun süre etkili olması istenir [4]. Bu nedenlerle DH tedavisinde ilk seçenek tübüllerin tıkanması yöntemidir [5, 6]. Tübüllerin tıkanmasında ise genellikle topikal florid, reçine, lazer, iyontoforez gibi uygulamalar kullanılmaktadır [7].

Literatürde DH'nin tedavi edilmesi amacıyla kullanılan topikal florid uygulamalarının temel prensibi, mine yüzeyinde kalsiyum florid (CaF₂) çökeltmesi oluşturarak açık olan tübüllerin tıkanmasıdır [8]. Ancak mine üzerindeki CaF₂ çökelteleri çok kısa sürede yüzeyden çözülebildiğinden, etkisi de çok kısa sürmektedir. Bu nedenle çeşitli yöntemler kullanılarak florür iyonlarının dentinde daha derin dokulara

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: serkandislitas@hitit.edu.tr (S. Dişlitaş)

Geliş / Received: 20.02.2021 Kabul / Accepted: 12.05.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.883349

geçişinin sağlanarak tübüller içerisinde CaF_2 çökmesi oluşturulması gerekmektedir [9].

Lazer uygulamalarına yönelik yapılan çalışmalarda, DH'nin azaltıldığı ancak uzun süreli bir rahatlama sağlamadığı, lazerlerin dişin yapısal özelliğinde tahribat yaptığı ve tamamıyla güvenilir bir tedavi olarak kabul edilebilmesi için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulduğu ifade edilmektedir [2, 7, 10]. Dental iyontoforez uygulamalarına yönelik yapılan çalışmalarda ise DH'de hızlı bir azalmanın olduğu saptanmış ancak tedavi etkisinin 6 ay sonra azaldığı ifade edilmiştir [11]. Mevcut yöntemler içerisinde, DH'nin tedavi edilmesi amacıyla tübüllerin tıkanmasını sağlayan iyon solüsyonlarının derin dokulara ulaştırılmasında elektrik akımının kullanıldığı dental iyontoforez yöntemi; ağrısız olması, hasar oluşturmaması (invazif olmaması), tedavi süresinin kısalığı, tedavi kolaylığı gibi avantajları sayesinde diğer metotlara göre daha pratik, güvenilir ve uzun süre etkilidir. Bu nedenlerle DH'in tedavi edilmesinde ilk seçenek olarak, dental iyontoforez yöntemi tercih edilmelidir [7, 12, 13].

İyontoforez uygulamasında, tübüllerin daraltılıp kapatılması amacıyla kullanılan iyon solüsyonları, içeriğine bağlı olarak pozitif veya negatif yüklü olabilmektedirler [14]. Buna bağlı olarak iyontoforez işleminde, akım yönüne ve solüsyonun elektrik yüküne bağlı olarak iyon hareketi gerçekleşmektedir. Bu nedenle dentin tübüllerinden sinire doğru iyon hareketinin olması ve solüsyonun daha derin dokulara ulaştırılması amacıyla uygulanacak akımın yönünün değişmemesi gerekmektedir. Bu açıdan akım yönü değişmeyen sürekli doğru akım (DC) kullanılması, tedavi işleminin başarılı olması ve kısa sürede tamamlanabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

DH tedavisine yönelik dental iyontoforez uygulamaları klasik olarak harici akım ve gerilim kaynakları kullanılarak herhangi bir kontrol olmadan elle ayarlanarak yapılmaktadır. Tedavi performansının olumsuz yönde etkilenmemesi için prob temas şekli ve yerinin yanı sıra nem, sıcaklık vb. faktörler nedeniyle vücut elektriksel direncinin sürekli değişimine bağlı olarak iyontoforez akımının kontrol edilmesi gerekmektedir. Ayrıca vücuda sürekli DC uygulanması durumunda meydana gelen cilt polarizasyonu nedeniyle akım değeri düşmektedir. Bu nedenle DC değerinin vücuda pils şeklinde uygulanması ve frekansının artırılarak iyontoforez tedavi akımının daha düşük gerilimde elde edilmesine yönelik çeşitli çalışmalar yapılmıştır [15]. Ancak pils DC uygulaması durumunda anahtarlar söz konusu olduğu için periyodik olarak akımın uygulanmadığı süreler mevcut olmaktadır [13]. Bu durum tedavinin kalitesini olumsuz olarak etkilemekte ve süresini uzatmaktadır. Diğer taraftan vücut elektriksel direnç değişimine karşılık iyontoforez akımının ayarlanan değerinde sabit kalması, tedavinin takibi ve başarısı açısından önemlidir. Ayrıca prob teması olduğu sürece iyontoforez akım uygulanması ve buna bağlı olarak süre takibinin yapılması da tedavi başarısını etkilemektedir.

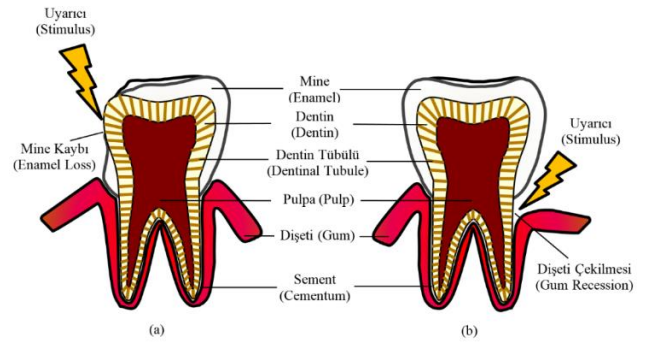
Bu çalışmada, DH'nin uzun süre etkili tedavi edilmesi amacıyla, tedavi süresinin ayarlanıp prob temasına göre takip edildiği, vücut direnci ve cilt polarizasyonu etkisine bağlı olarak maksimum 35 V DC olmak üzere 0-500 μA

aralığında sürekli DC kontrolünün hassas, hızlı ve otomatik olarak yapıldığı mikrodentleyici tabanlı dental iyontoforez sistemi (mikroDİS) tasarlanmış ve bir prototip geliştirilerek performansı incelenmiştir.

2 Materyal ve metot

2.1 Dentin hassasiyeti

Şekil 1'de görüldüğü gibi bir diş genel olarak dıştan içe doğru mine, dentin ve pulpa bölümlerinden oluşmaktadır. Diş dokusunun büyük bölümünü oluşturan dentin, sert mine tabakası ile kök yüzeyinde yumuşak sement tabakası arasında yer alan sarımsı renkli, ışığı yarı geçirgen, elastik yapılı, gelişme ve kimyasal bakımdan kemiği andıran kısımdır. Dentin tübülleri ise sinirlerin yer aldığı pulpadan dentin yüzeyine yayılan mikro yapıdaki kanallardır [16].



Şekil 1. DH'ye sebep olan dentin tübüllerinin açığa çıkması: (a) mine kaybı (b) dişeti çekilmesi

Diş sağlığı problemlerinden biri olan DH, tipik olarak ısı, kimyasal ve mekanik kaynaklı çeşitli uyarıcılara bağlı olarak açığa çıkmış dentin yüzeyinden yayılan ve uyarıcı etkinin ortadan kalkmasıyla geçen, bölgesel kısa süreli ve keskin ağrı olarak tanımlanmaktadır [17]. DH'nin başlıca oluşma sebepleri; yanlış diş fırçalama, periodontal tedaviler, aşırı kuvvet uygulanması, asitlenme durumu ve çeşitli fizyolojik etkenlere bağlı olarak mine kaybı (Şekil 1 (a)) gerçekleşmesinin yanı sıra dişeti çekilmesi ve sement dokusunun kaybolması (Şekil 1 (b)) sonucu dentin tabakası ve dentin tübüllerinin açığa çıkmasıdır [5]. Ayrıca hastanın yaşı, ağrı eşiği, fizyolojik ve psikolojik durumu, tükürük içerisindeki proteinler, dentin tübüllerindeki kalsiyum fosfatın çökmesi ve pulpaya yakın bölgede tamir dentininin oluşması gibi çeşitli faktörler DH oluşumunu etkileyebilmektedir [18]. Dentin tübüllerindeki sıvının hareket etmesi esasına dayanan hidrodinamik teorisine göre; dentin üzerine soğuk, sıcak gibi bir uyarıcı olması sonucunda tübüllerdeki değişen sıvı hareketi sinirleri uyararak dişte keskin bir ağrı oluşturmaktadır [3]. Yapılan çalışmalarda hassas dentinde, hassas olmayan dentine göre daha geniş ve daha fazla sayıda açık dentin tübülü olduğu saptanmıştır. Ayrıca dentin içerisindeki açığa çıkmış tübül sayısı pulpaya yaklaştıkça artmaktadır [19].

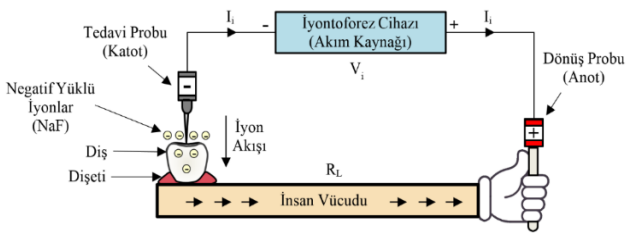
2.2 Dental iyontoforez

İyontoforez tedavi, anestezi vb. amaçlarla düşük değerli DC kullanılarak iyonların veya iyonize edilmiş ilaçların temas edilen dokuya transferinin iyileştirilmesi yöntemidir [20]. İyontoforez işlemi diş hekimliği, dermatoloji, fizik

tedavi, onkoloji, göz, spor hekimliği gibi alanlara yönelik birtakım rahatsızlıkların tedavisinin yanı sıra anestezi, kan şekerinin ölçülmesi gibi çeşitli medikal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [20-22].

Diş hekimliğinde elektrik akımı ve iyontoforez yöntemi DH tedavisinin yanı sıra topikal anestezi, bazı eklem rahatsızlıklarının tedavisi, endodonti, kavite lakı, adeziv sistem uygulamaları ve başlangıç çürük lezyonlarının remineralizasyonu gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır [23, 24]. Thongkukiattkun ve arkadaşları 2015 yılında, dental iyontoforez uygulamasında birtakım ilaç ve kimyasalların kullanımının tedaviye etkisini araştırmışlardır [25]. Irudaya ve arkadaşları 2016 yılında, DH tedavisi için iyontoforez yöntemi kullanılmasını incelemişler ve yöntemin güvenli ve etkili olduğu sonucuna varmışlardır [7]. Kim ve Park 2017 yılında, DH tedavisine yönelik olarak farklı elektrik akımı büyüklüklerinin ve tedavi sürelerinin karşılaştırmasını yapmışlardır [3].

Şekil 2'de prensip şeması görülen dental iyontoforez yönteminde, iyonize ilacı içeren negatif polariteli solüsyonun dokuya uygulanması için DC elektrik kaynağına bağlı biri tedavi (katot) diğeri dönüş (anot) olmak üzere iki adet prob kullanılır [21, 26]. Tedavi probu solüsyonla birlikte DH'nin olduğu bölgeye dokundurulurken, dönüş probu ise vücudun risk taşımayan dişe yakın bir noktasına temas ettirilir. Elektrik akımının uygulanmasıyla birlikte, tedavi probu yardımıyla iyon akışına bağlı olarak solüsyon diş dokusuna geçer. Solüsyona bağlı olarak, diş dokusunda meydana gelen kimyasal tepkimeler sonucu oluşan çökelmeler dentin tübüllerinin tıkanmasını sağlar [27]. Vücut sıvılarında bulunan negatif yüklü iyonlar (anyonlar) pozitif proba (anot), pozitif yüklü iyonlar (katyonlar) ise negatif proba (katod) doğru hareket ederler. Negatif iyonlar akım kaynağının negatif kutbundan, pozitif iyonlar ise akım kaynağının pozitif kutbundan canlı organizmaya sokulabilmektedir [20, 28].



Şekil 2. Dental iyontoforez yöntemi temel prensip şeması

İyontoforez tedavisinde polarite özelliğinden dolayı, pozitif (anot) ve negatif (katot) kutuplara sahip DC veya başka bir ifadeyle Galvanik Akım kullanılmaktadır. Teorik olarak iyontoforez işleminde DC kullanımı, tek yönde kesintisiz güç sağladığından dolayı maksimum iyon transferinin gerçekleşmesini sağlar. Ohm Kanunu'na göre; uygulanan iyontoforez akımı (I_i), tedavi süresince değişkenlik gösteren vücut direncine (R_L) bağlıdır. İyontoforez tedavisinin başarısında, dokuya uygulanacak iyonun seçimi ve probun doğru polaritesinin kullanımını kritik öneme sahiptir. Ayrıca uygulanan akım miktarı, vücudun elektriksel direnci, işlem süresi ve iyon solüsyonunun içeriği

de iyontoforez uygulamasının başarısını etkileyen faktörlerdir [29, 30]. İyontoforez işleminde insan vücudunun elektriksel direncinin yüksek olması ve değişmesi, ilacın dokuya ulaştırılması sürecini yavaşlatmaktadır [31].

İyontoforez işleminde tedavinin akım parametresi Kulomb birimiyle ölçülür. Kulomb Kanunu'na göre; iyontoforez tedavisi sırasında akım (I_i) ve süreye (t_i) bağlı olarak taşınan toplam elektrik yükü miktarı (Q_i) Denklem (1)'deki gibi ifade edilir. Burada I_i 'nin birimi Amper (A), t_i 'nin birimi saniye (s) ve Q_i 'nin birimi Kulomb (C) olarak alınır. İyontoforez işleminde uygulanan akım miktarı arttıkça, taşınan elektrik yükü miktarına bağlı olarak iyon transferi artacak ve böylelikle de tedavi süresi azalacaktır [29].

$$Q_i = I_i \cdot t_i \quad (1)$$

İyontoforez işleminde kullanılan elektrik akımı sürekli DC veya sürekli pals DC dalga formlarında olabilmektedir. Sürekli DC kullanımı daha etkili sonuçlar vermesine rağmen, mevcut uygulamanın süresi ile orantılı olarak iyontoforezin verimini düşüren cilt polarizasyonuna yol açmaktadır. Dokudan DC elektrik akımı geçişi sırasında cildin kapasitif etkisine bağlı olarak meydana gelen polarizasyon, tedavi amacıyla uygulanan DC elektrik akımının doku üzerindeki etkisini azaltmaktadır [14, 32]. Dolayısıyla uygulanan sabit gerilim altında polarizasyona bağlı olarak zamanla akım düşmektedir. Normalde iyontoforez işlemi sürekli DC ile yapılmasına rağmen, pals dalga formulu DC uygulanması ile polarizasyon etkisi azaltılarak dokudaki ilaç nüfuzu artırılmaktadır [14, 33]. Ayrıca iyontoforez işleminde uygulanan elektrik akımının dalga formu, genliği, frekansı gibi çeşitli özellikler tedavinin performansını etkilemektedir. Araştırmalarda uygulanan gerilim seviyesi arttıkça vücudu oluşturan canlı doku empedansında azalma görüldüğü [34], akımın frekansına bağlı olarak da deri empedansının ters orantılı olarak değiştiği [15] ifade edilmiştir. Vücutun bu karakteristik özelliği nedeniyle, uygulanan gerilim arttıkça akım doğrusal olarak değil eğrisel olarak artmaktadır.

İyontoforez uygulamasında, problemlerin uygulandığı diş ve vücut arasındaki doku türü ve özellikleri [35, 36], problemler arası mesafe, temas yüzeyi, nem, sıcaklık gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak vücut direnç değeri Ω seviyelerinden $M\Omega$ seviyelerine kadar geniş bir aralıkta değişkenlik gösterebilmektedir [34, 37, 38]. Vücutta elektrik akımına karşı gösterilen en büyük direnç kaynağı vücudu kaplayan deridir. Vücutun iç kısımlarını oluşturan dokuların elektriksel direnci, deri direncine oranla oldukça düşüktür [34]. Vücut elektriksel direnç değişimi ve meydana gelen polarizasyon nedeniyle, uygulama esnasında I_i iyontoforez akımının sabit kalabilmesi için V_i iyontoforez geriliminin otomatik olarak değiştirilmesi gerekmektedir. Bu açıdan iyontoforez uygulamasına bağlı olarak akımın sürekli ayarlanması veya akım kontrollü kaynak kullanımı gereklidir [39].

İyontoforez uygulamasında dokulara herhangi bir zarar vermeden istenilen iyon akışını sağlayan akım miktarının kullanılması gerekmektedir. DH'nin tedavisine yönelik

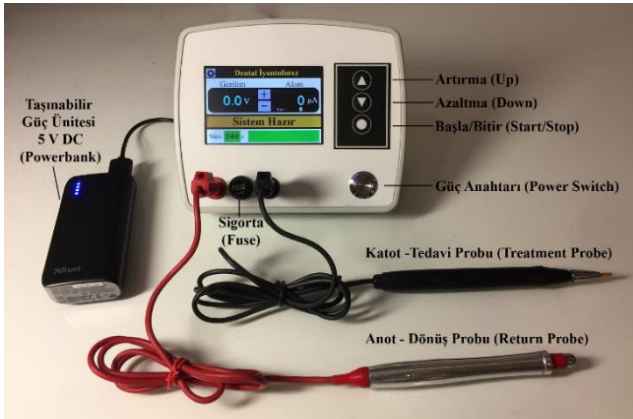
yapılan çalışmalarda, iyontoforez yöntemiyle uygulanacak elektrik akımının dişe zararının olmaması amacıyla, tek bir diş için maksimum 500 μ A, çoklu diş için ise maksimum 1 mA kullanımının güvenli olduğu ifade edilmiştir [26, 28, 31]. Özellikle 1 mA'in üzerine çıkılması durumunda hastada rahatsızlık başlar ve ciltte tahrişler meydana gelebilir [14]. Hastada elektrik şokunun oluşmaması amacıyla uygulanan akım değişiminin saniyede 2 mA'den daha fazla olmaması gerekmektedir [37]. Ayrıca dişe uygulanacak iyontoforez akımının aniden uygulanması hastada anlık ağrı hissine yol açabileceğinden dolayı, akımın yavaş yavaş artırılarak istenilen tedavi seviyesine getirilmesi gerekir [25].

İyontoforez işleminde dişe uygulanacak tedavi probunun polaritesinin, uygulamada kullanılacak solisyonun polaritesi ile aynı olması gerekmektedir. Dental iyontoforez işleminde, negatif polariteli tedavi probu ile negatif iyonlu %2'lik Sodyum Florür (NaF) solüsyon uygulaması yaygın olarak kullanılmaktadır [7, 31]. DH tedavisinde, tek bir diş için %2'lik NaF solüsyonu hastanın ağrı eşiğine bağlı olarak ortalama 120 s süresince 500 μ A DC veya 240 s süresince 250 μ A DC dişe uygulanarak Denklem (1)'den 60 mC tedavi dozunda dental iyontoforez işlemi gerçekleştirilir. Burada hastanın rahatsız olması durumuna göre akım azaltılabilir, ancak 60 mC tedavi dozunun elde edilmesi için sürenin orantılı olarak uzatılması gerekir [31].

3 Tasarlanan sistem

3.1 Sistemin genel yapısı

Tasarımı yapılan mikroDİS, ana gövde ile birlikte tedavi ve dönüş problemlerinden oluşmaktadır (Şekil 3). Geliştirilen sistem, dental iyontoforez uygulamaları için vücut direnç değişimine bağlı olarak maksimum 35 V DC olmak üzere 0-500 μ A DC aralığında ± 1 μ A doğrulukta sabit akım çıkışı verebilmektedir.



Şekil 3. mikroDİS'in genel görünümü

Kullanımı oldukça basit olan mikroDİS'te gerekli olan ayarlar ve kontroller dokunmatik ekran üzerinden ve ilgili butonlar yardımıyla yapılabilmektedir. Şekil 4'te sistemin çalışmasına yönelik örnek ekranlar görülmektedir. İyontoforez işlemi sırasında uygulanan akım, gerilim ve tedavi süresi sistem üzerinden izlenip ayarlanabilmektedir. Ayrıca ana ekranda iyontoforez işlemi başlatılıp sonlandırılabilir. Ayarlar ekranında ise, iyontoforez

tedavi süresi, güvenlik amacıyla uygulanacak olan iyontoforez akımı üst sınır değeri ve sesin açılıp kapatılması ayarlanabilmektedir. Uygulamada solisyonla aynı polariteye sahip tedavi probu dentin yüzeyine dokundurulurken, dönüş probu ise el, kulak memesi veya yanak içine temas ettirilmektedir. Örneğin negatif yüklü NaF solisyonu için tedavi probu katot iken, dönüş probu ise anottur. Problar temas halinde iken sistem üzerinden hastanın ağrı eşiğine bağlı olarak arzu edilen iyontoforez akımı ayarlanıp, "Başla" butonuna basılmak suretiyle iyontoforez işlemi başlatılmaktadır. Böylece vücut direnç değişimine bağlı analog akım kontrolünün otomatik olarak yapıldığı iyontoforez tedavisi belirlenen sürede devam etmektedir. Sistemde prob temasının olmaması veya kısa devre olması durumunda, süre durdurularak tedavi için geri sayım işlemi yapılmamaktadır. Prob temasının yeniden sağlanmasıyla birlikte tedavi işlemine kaldığı yerden otomatik olarak devam edilebilmektedir.



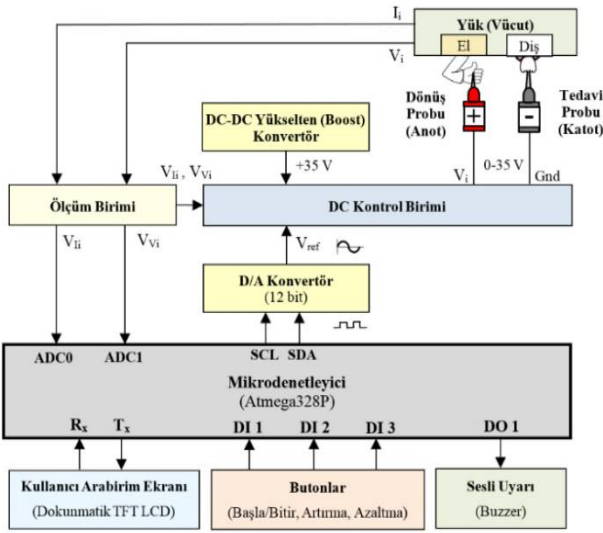
Şekil 4. Sistem dokunmatik ekran görüntüleri

3.2 Donanım

Tasarlanan mikroDİS'in genel blok diyagramı Şekil 5'te görülmektedir. Sistem donanımı mikrodenetleyici, D/A konvertör, DC-DC gerilim yükselten (Boost) konvertör, ölçüm birimi, analog DC kontrol birimi, dokunmatik ekran ile birlikte tedavi ve dönüş problemlerinden oluşmaktadır. Sistemde mikrodenetleyici olarak RISC mimarisine sahip 16 Mhz hızında 8-bit Atmega328P kullanılmıştır. Sisteme yönelik akım ve gerilim ölçümlerinin yapılabilmesi amacıyla ölçüm birimi geliştirilmiştir. Ayrıca vücut direnç değişimine bağlı olarak uygulanan iyontoforez akımının sabit kalması amacıyla hızlı bir şekilde tepki veren analog DC kontrol birimi geliştirilmiştir. DC kontrol birimi analog referans geriliminin elde edilmesinde, mikrodenetleyici ile I²C protokolü üzerinden seri haberleşen 12 bit çözünürlüklü MCP4725 D/A konvertör kullanılmıştır. Akım kontrolünde ihtiyaç duyulan yüksek gerilim, 5-35V DC-DC gerilim yükselten konvertör ile elde edilmiştir. Tasarımda tedavi probu olarak elektriksel iletkenliği yüksek, ucu takılıp çıkartılabilir fırça kullanılırken, dönüş probu olarak ise el ile rahat bir şekilde tutulabilen alüminyum mil kullanılmaktadır.

Geliştirilen mikroDİS'te dental iyontoforez tedavi süresince sabit gerilim yerine, vücut direncine göre oransal ayarlanan gerilim uygulayarak akım kontrolü yapılmakta ve sabit akım verilmektedir. Ayrıca iyontoforez işlemi esnasında direnç değerinin ani düşüşüne bağlı olarak aşırı

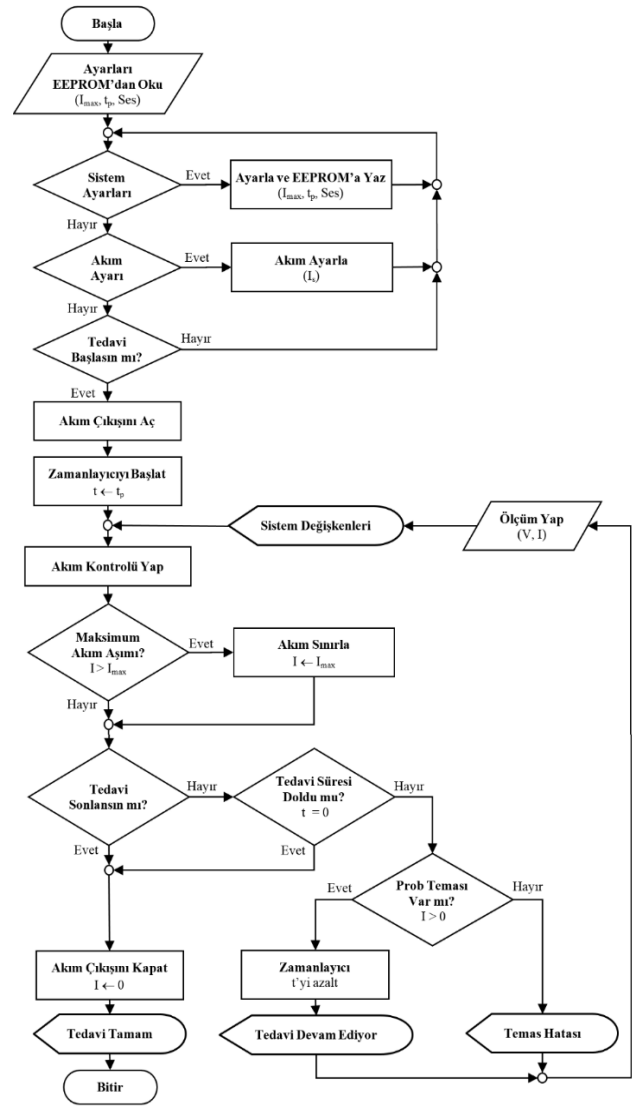
akım uygulamasının önüne geçmek amacıyla sistemde gerilim kontrolü yapılarak, ayarlanan her akım seviyesi için üst sınırlama yapılmaktadır. Akım kontrolü ve sınırlaması amacıyla geliştirilen DC kontrol biriminin temeli farksal ve evirmeyen yükselteçlerinden oluşmaktadır. Bu amaçla düşük güçlü, yüksek kazançlı, birbirinden bağımsız çift kanal Opamp'dan oluşan 2 adet LM358 kullanılmaktadır. DC kontrol birimi sayesinde, 0-5 V aralığındaki V_{ref} giriş değerine bağlı olarak yük üzerindeki I_i iyontoforez akımı için sabit akım kontrolü yapılmaktadır. Bu amaçla ölçüm biriminden alınan gerçek akım bilgisi (V_{li}) ile D/A konvertör üzerinden mikrodenetleyiciden gelen referans akım bilgisi (V_{ref}) için fark alma ve yükseltme işlemleri ile akım kontrolü yapılarak elde edilen iyontoforez gerilimi (V_i) yükte uygulanmaktadır. Bu sayede uygulanan V_i gerilimine bağlı olarak yük üzerinde I_i akımının elde edilmesi sağlanmaktadır.



Şekil 5. Tasarlanan mikroDİS'in genel blok diyagramı

3.3 Mikrodenetleyici yazılımı

Tasarlanan mikroDİS'in mikrodenetleyici yazılımı, C tabanlı mikroC Pro for AVR programlama dili ile geliştirilmiştir. Şekil 6'da gömülü sistem yazılımına ait genel akış şeması görülmektedir. Akış şemasına göre; öncelikle maksimum akım sınırı (I_{max}), işlem süresi (t_p) ve ses yetki durumu mikrodenetleyici EEPROM'undan okunmaktadır. Sonrasında sürekli bir çevrime girilerek, isteğe bağlı ayarlar yapılmak suretiyle gerekli veriler EEPROM'a kayıt edilmektedir. İyontoforez tedavisinin başlatılması ile birlikte ayarlanan akım değeri sürekli kontrol edilerek tedavi süresince çıkışa verilmektedir. $I > I_{max}$ olması durumunda maksimum akım sınırına ulaşıldığından sistemde otomatik olarak akım sınırlaması yapılmaktadır. Prob teması olmadığı durumlarda zamanlayıcı durdurularak "Temas Hatası" mesajı verilmektedir. Tedavi işlemi süresince akım, gerilim ve tedavi süresinin takibine yönelik ekran üzerinden bilgilendirme yapılmaktadır. Dental iyontoforez işlemi sonlandırılmak istendiğinde veya işlem süresi tamamlandığında akım çıkışı kapatılarak tedavi işlemi bitirilmektedir.



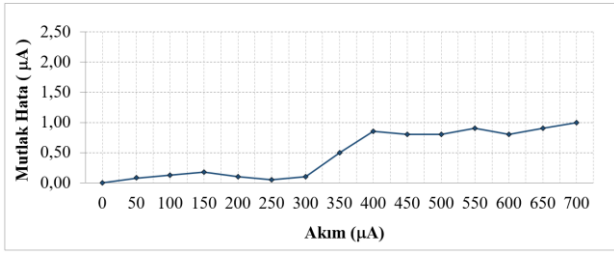
Şekil 6. Mikrodenetleyici yazılımı genel akış şeması

4 Bulgular ve tartışma

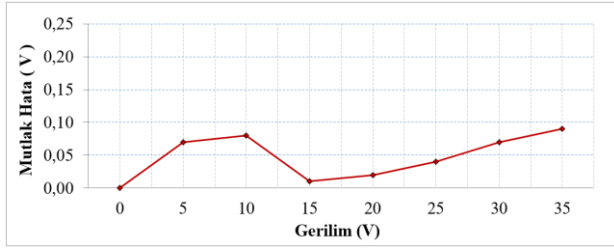
Geliştirilen mikroDİS'in performans ve çalışma kriterlerinin belirlenmesi amacıyla, tedavi ve dönüş problemleri arasında el ve diş arası direnci modelleyen 0-300 KΩ arası çeşitli yük dirençleri bağlanarak deneysel çalışmalar yapılmıştır. Çalışmada öncelikle Fluke 287 multimetre kullanılarak sistemin akım ve gerilim ölçüm kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir (Şekil 7). Bu kapsamda MATLAB Curve Fitting aracı kullanılarak ölçüm sistemine yönelik hata düzeltme kodları programa eklenmiştir. Sistemde 0-500 μA aralığında $\pm 1 \mu A$ doğrulukta akım ölçümleri, 0-35 V aralığında $\pm 0,1 V$ doğrulukta ise gerilim ölçümleri yapılabilmektedir.

Deneysel çalışmanın ikinci aşamasında; vücut direnç değişiminin geliştirilen mikroDİS'e etkisinin araştırılması amacıyla, sabit akım uygulamasında yük direnci değişimine bağlı iyontoforez akım ve gerilim değişimleri incelenmiştir (Şekil 8). Tedavi ve dönüş problemleri arasında 0-300 KΩ arasında çeşitli yük dirençleri bağlı iken iyontoforez akımı

500 μA 'e ayarlanarak akım ve gerilim değerleri ölçülmüştür. Sistemde yük direncine bağlı olarak iyontoforez gerilimi otomatik olarak ayarlanarak sabit akım kontrolü yapılmaktadır. Ancak sistemin desteklediği $V_{\text{max}} = 35\text{V DC}$ üst sınırına ulaşılması ile birlikte iyontoforez akımının düşmeye başladığı görülmektedir. mikroDİS'in 0-35 V DC çıkışına sahip olması sayesinde, 0-70 K Ω yük direnci aralığında 500 μA , 71-140 K Ω yük direnci aralığında 250 μA ve 141-280 K Ω yük direnci aralığında 125 μA iyontoforez akım desteği verilebilmektedir. Böylelikle mikroDİS kullanılarak daha düşük çıkış gerilimine sahip sistemlere göre, daha geniş yük direnci aralığında istenen iyontoforez akımı sağlanabilmektedir.



(a)



(b)

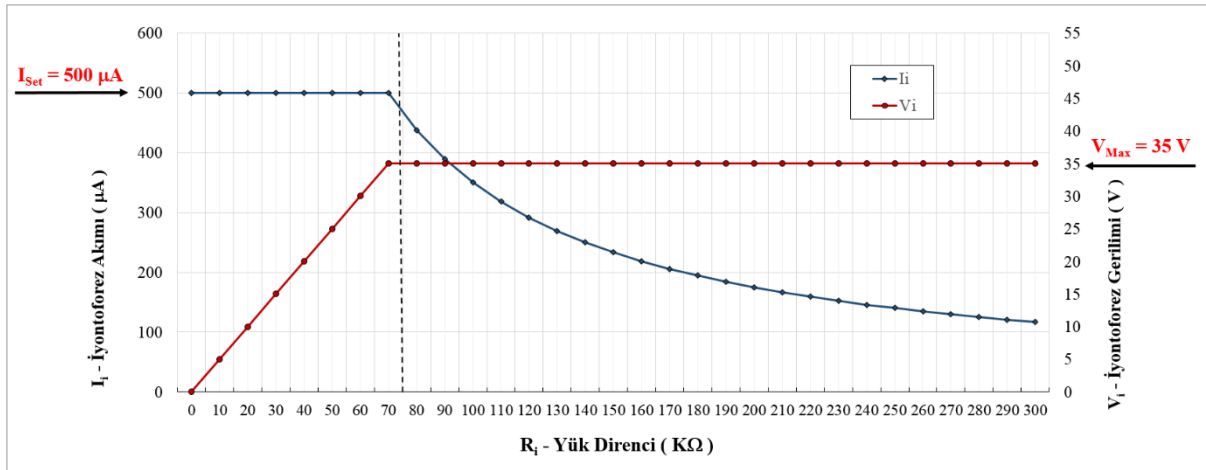
Şekil 7. mikroDİS'in (a) akım ve (b) gerilim ölçümlerine yönelik mutlak hata değişimleri

DeneySEL çalışmanın üçüncü aşamasında; geliştirilen mikroDİS'in DC kontrol özelliğinin test edilmesi amacıyla, tedavi ve dönüş problemleri arasında 100 K Ω yük direnci bağlanarak incelemeler yapılmıştır. Bu amaçla yük üzerinde

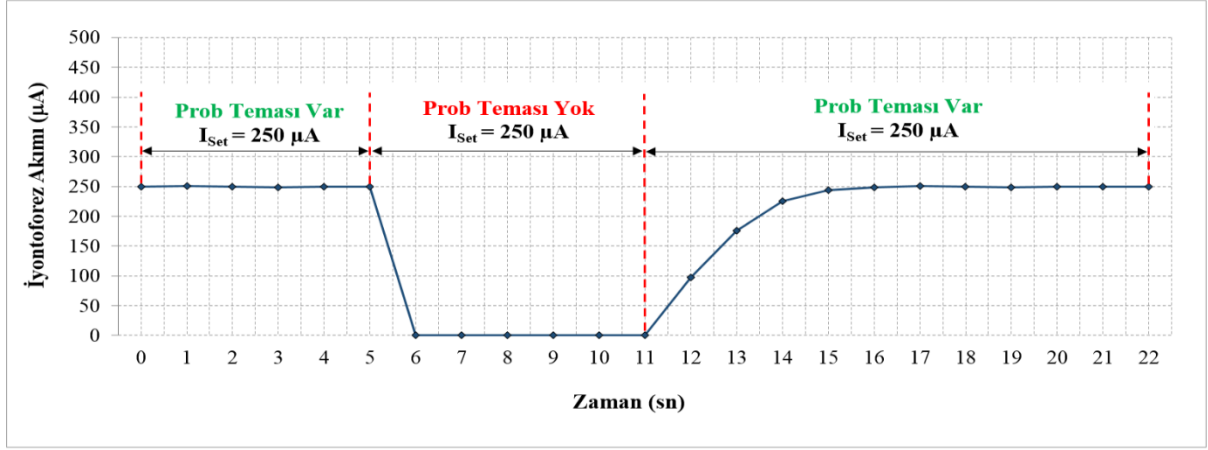
mevcut iyontoforez akımı 250 μA 'e ayarlı iken, prob teması kesilerek akımın 0 μA 'e düşmesi ve prob temasının yeniden sağlanmasıyla birlikte akımın 250 μA 'e yükselmesi incelenmiştir (Şekil 9). Sistemde ani akım düşüşünün hasta üzerinde herhangi bir risk ve sorun oluşturmaması nedeniyle, prob temasının kesilmesi durumunda akımın 250 μA 'den 0 μA 'e hızlı bir şekilde düşüşüne izin verilmektedir. Diğer taraftan ani akım artışının hasta üzerinde rahatsızlık vermemesi amacıyla, prob temasının yeniden sağlanması ile birlikte akım otomatik olarak artırılarak yaklaşık 5 s içerisinde tekrardan 250 μA 'e getirilmektedir.

Çalışmanın dördüncü aşamasında dental iyontoforez akımının pals genişlik modülasyonu (PWM) şeklinde uygulanmasına bağlı olarak tedavi süresi değişimi araştırılmıştır. Şekil 10'da verilen grafikte, 10 K Ω 'luk bir yüke yönelik 60 mC tedavi dozunda dental iyontoforez uygulaması için gerilim ve tedavi süresi arasındaki ilişki görülmektedir. Görüldüğü gibi sürekli DC uygulamasında tedavi süresi, pals DC'ye oranla daha kısadır. Hastanın ağrı eşiğine bağlı olarak 2.5 V, 250 μA 'lik bir iyontoforez tedavisi uygulanmak istendiğinde, sürekli DC'de 4 dakika olan tedavi süresi görev çevrimi %50 PWM olan pals DC'de iki katına çıkarak 8 dakika olmaktadır.

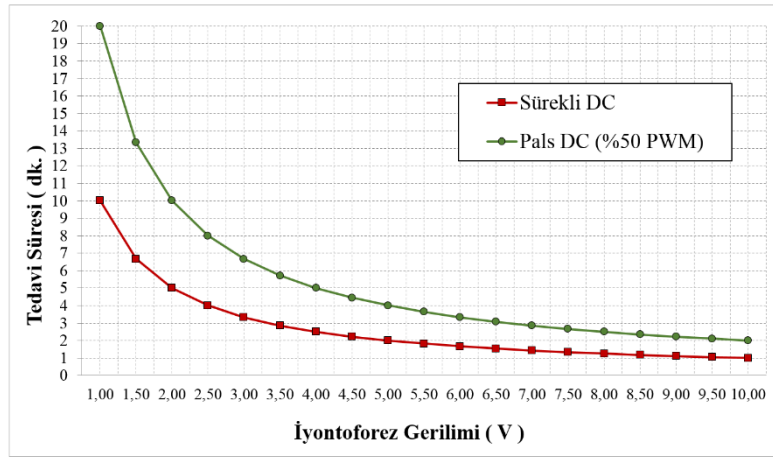
Çalışmanın son aşamasında; geliştirilen mikroDİS'in özellikleri literatürde yer alan Sistem A [7] Jonoflor Scientific dental iyontoforez cihazı ve Sistem B [31] iyontoforez tasarımı ile karşılaştırılmıştır (Tablo 1). Genel olarak sistemlerin hasta güvenliği açısından şebeke ile bağlantılarının olmadığı ve pratik kullanım açısından dönüş problemlerinin el ile tutulduğu anlaşılmaktadır. Geliştirilen mikroDİS'in daha hassas olarak ayarlanabilen iyontoforez akımını daha yüksek vücut direnç değerlerinde otomatik olarak sağlayabildiği görülmektedir. mikroDİS'te akım ayarı diğer sistemlere göre daha düşük olan 10 μA hassasiyetle yapılabilmektedir. mikroDİS, vücut direnç değişimine bağlı olarak 50 K Ω 'a kadar 500 μA 'lik iyontoforez tedavisini garanti etmektedir. Ayrıca mikroDİS'te iyontoforez akımının maksimum 500 μA olarak sınırlandırılması, lokal diş tedavisinde ani direnç düşüşü veya yanlış kullanım sonucu pulpal dokulara zarar verecek fazla akım uygulamasını engellemektedir.



Şekil 8. mikroDİS sabit akım uygulamasında yük direncine bağlı iyontoforez akım ve gerilim değişimi



Şekil 9. mikroDİS kullanılarak yapılan DC kontrolü esnasında prob temasına bağlı akım değişimi



Şekil 10. 10KΩ'luk bir yükte 60 mC tedavi dozunda dental iyontoforez uygulaması için gerilim-tedavi süresi arası ilişki

Tablo 1. Farklı dental iyontoforez sistemlerinin karşılaştırılması

	mikroDİS	Sistem A	Sistem B
Besleme Özellikleri			
Şebeke Bağlantısı	Yok	Yok	Yok
Besleme Gerilimi	5 V DC	12 V DC	9 V DC
İyontoforez Çıkış Özellikleri			
Gerilim Aralığı	0-35 V DC	0-12 V DC	0-9 V DC
Akım Aralığı	0-500 µA	0-5000 µA	0-3000 µA
Akım Ayar Kademesi	10 µA	500 µA	50 µA
Akım Kontrolü	Otomatik	Manuel	Manuel
Tedavi Probu Özellikleri			
Probu Tipi	İletken Fırça	Ağız Tepsisi	İletken Fırça
Uygulama Alanı	Lokal Diş	Tüm Dişler Birlikte	Lokal Diş
Dönüş Probu Özellikleri			
Probu Tipi	İletken Mil	İletken Mil	İletken Mil
Uygulama Alanı	El içi	El içi	El içi
Vücut Direncine Bağlı Verilen Maksimum Akım			
10 KΩ	500 µA	1200 µA	900 µA
50 KΩ	500 µA	240 µA	180 µA
100 KΩ	350 µA	120 µA	90 µA

5 Sonuçlar

Bu çalışmada, DH'nin dişe zarar vermeden hızlı ve pratik bir şekilde, uzun süre etkili tedavi edilmesi amacıyla, temeli dental iyontoforez yöntemine dayalı, vücut direnç değişimi ve polarizasyon etkisine yönelik sürekli DC kontrolüne sahip

mikroDİS tasarlanmış ve bir prototip geliştirilmiştir. mikroDİS ile dental iyontoforez akım uygulaması, maksimum 35 V DC çıkış verebilecek kapasitede ve 0-500 µA aralığında ± 1 µA doğrulukta yapılabilmektedir. Sistemde, iyonize ilacın polaritesiyle aynı olan prob tedavi probu, farklı olan ise dönüş probu olmak şartıyla negatif ve

pozitif polariteli iyonize ilaçlar kullanılarak dental iyontoforez tedavisi yapılabilmektedir.

Dental iyontoforez tedavisinde, belirlenen miktarda tedavi dozunun akım ve süreye bağlı olarak DH olan bölgeye uygulanması gerekmektedir. Geliştirilen mikroDİS'te iyontoforez akımı, tedavinin uygulanacağı kişinin ağrı eşiğine bağlı olarak 0-500 μ A aralığında, tedavi süresi ise 0-600 s arasında ayarlanabilmektedir. Geliştirilen mikroDİS'te prob temasına bağlı olarak akım uygulanmakta ve tedavi süresi takip edilmektedir. İyontoforez uygulaması esnasında, temas hatası meydana gelmesi durumunda akım kesilerek tedavi süreci otomatik olarak durdurulmaktadır. Prob temasının yeniden sağlanmasının ardından yavaş yavaş artırılan akımın referans değerine gelmesiyle birlikte tedaviye kalındığı yerden otomatik olarak devam edilebilmektedir. Ayrıca vücut polarizasyonu ve direnç değişimi nedeniyle otomatik olarak analog akım kontrolü yapılarak, iyontoforez tedavisinde sürekli DC uygulaması söz konusudur. Uygulanan gerilimin pals yerine sürekli DC formunda olması, maksimum iyon transferine izin verdiğinden dolayı iyontoforez tedavi süresinin kılmasını sağlamaktadır. Böylelikle mikroDİS iyontoforez tedavi süresi, polarizasyon etkisini yok etmek amacıyla görev çevrimi %50 olan PWM sinyalinin kullanıldığı sisteme göre yarı yarıya kılalmaktadır.

mikroDİS'te iyontoforez akımı üst limitinin yazılımsal olarak maksimum 500 μ A'e kadar ayarlanabilmesinin yanı sıra donanımsal olarak prob çıkışına düşük akımlı sigorta konulması sayesinde akım koruması yapılmaktadır. Bu sayede herhangi bir arıza veya kısa devre olma durumunda çıkışa verilebilecek maksimum akım 500 μ A civarında olabilmektedir. Sistemde hastaya uygulanan iyontoforez akımı 0 - 500 μ A aralığında olduğundan dolayı, ani akım değişiminin şok etkisi bulunmamaktadır. Ayrıca ani akım artışının hastada rahatsızlık vermemesi amacıyla akım yavaş yavaş artırılarak kontrollü olarak referans değere getirilmektedir. Bu nedenlerle sistemin hasta açısından herhangi bir elektriksel zararı bulunmamaktadır.

Geliştirilen mikroDİS'te tedavi probu dentin hassasiyetinin olduğu dişe, dönüş probu ise el, kulak memesi, yanak içi gibi vücudun farklı noktalarına temas ettirilerek kullanım sağlanabilmektedir. Uygulamada dönüş probu temas noktası, tedavi probu temas noktasına yaklaştıkça direnç değerinin düşmesi nedeniyle, en düşük direnç değeri diş-yanak içi arasında, en yüksek direnç değeri ise diş ile el arasında olmaktadır. Dental iyontoforez uygulaması esnasında direnç değerinin düşük olması nedeniyle düşük gerilimde daha yüksek akımın sağlanması, polarizasyon etkisinin düşük olması nedeniyle akım kontrolünün daha sağlıklı yapılması ve kalp gibi vücudun diğer organlarına olan riskin azaltılması amacıyla tedavi probunun dişe, dönüş probunun ise yanak içine temas ettirilmesinin daha uygun olduğu anlaşılmaktadır. Ancak hasta açısından daha konforlu olması ve kullanım kolaylığı sağlaması nedeniyle dönüş probunun el ile tutulması tercih edilebilmektedir. Bu açıdan direnç değişiminden etkilenmeden istenen iyontoforez akımını verebilmesi amacıyla sistemin desteklediği gerilimin yeterli aralıkta olması gerekir. Bu nedenle geliştirilen yeni sistemde, akım

kontrolü için otomatik olarak ayarlanabilir 0-35 V DC aralığı ile vücut elektriksel direnç değişiminin iyontoforez akımına etkisi azaltılarak, 70 K Ω 'a kadar 500 μ A, 140 K Ω 'a kadar 250 μ A ve 280 K Ω 'a kadar 125 μ A sürekli sabit akım çıkışı sağlanabilmektedir. Bu sayede geliştirilen yeni sistemin, elektrik direncini düşürmek amacıyla mevcut uygulamalarda gerekli olan prob ve temas yerinin çeşitli sıvılarla ıslatılmasına ihtiyaç duyulmadan kullanılabilmesi büyük kolaylık sağlamaktadır.

mikroDİS'in çalışma kapsamında karşılaştırılan diğer sistem ve düzeneklere göre hem iyontoforez akımının 0-500 μ A aralığında 10 μ A hassasiyetle otomatik olarak ayarlanabilmesi hem de tedavi süresinin uzamasına yol açan pals DC kullanımına veya dönüş probunun uygulandığı uzvun ıslatılmasına gerek kalmadan daha yüksek ve değişen vücut direnç değerlerinde istenilen akımı sağlayabilmesi sayesinde, DH tedavisi lokal olarak tek bir diş üzerinde hasta konforu ve güvenliği ön planda tutularak hızlı ve güvenilir bir şekilde yapılabilmektedir.

Sonuç olarak; uygulama ve araştırma cihazı özelliğine sahip mikroDİS'in ve elde edilen bilimsel sonuçların başta DH'nin tedavi edilmesi olmak üzere, ağız sağlığına yönelik tıbbi ve bilimsel çalışmaların yapılmasına büyük katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Yapılacak yeni çalışmalarda mikroDİS kullanılarak vücut temas noktalarının, elektriksel direnç değişiminin, meydana gelen polarizasyonun, ağrı eşiğinin ve tedavi süresinin dental iyontoforez tedavisine etkisi araştırılabilir.

Teşekkür

Bu çalışma KOSGEB (Proje No:16.0.2019/379) ve Farko Dental firması tarafından desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 19

Kaynaklar

- [1] I. C. Porto, A. K. Andrade and M. A. Montes, Diagnosis and treatment of dentinal hypersensitivity, Journal of Oral Science, 51(3), 323-332, 2009. <https://doi.org/10.2334/josnusd.51.323>.
- [2] F. S. Güngör ve S. Karbekiroğlu, Treatment of dentin hypersensitivity and lasers. Selcuk Dent J, 5, 91-102, 2018. <https://doi.org/10.15311/selcukdentj.342116>.
- [3] J. W. Kim and J. C. Park, Dentin hypersensitivity and emerging concepts for treatments. Journal of Oral Biosciences, 59, 211-217, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.job.2017.09.001>.
- [4] L. I. Grossman, A systematic method for the treatment of hypersensitive dentine. The journal of the American Dental Association, 22(4), 592-602, 1935. <https://doi.org/10.14219/jada.archive.1935.0110>.
- [5] M. Mantzourani and D. Sharma, Dentine sensitivity: Past, present and future. Journal of Dentistry, 41S4, 3-17, 2013. [https://doi.org/10.1016/s0300-5712\(13\)70002-2](https://doi.org/10.1016/s0300-5712(13)70002-2).
- [6] H. G. Yılmaz, H. Bayındır, E. Cengiz and A. Berberoğlu, Dentin hypersensitivity and treatment

- methods. *Cumhuriyet Dental Journal*, 15(1), 71-82, 2012. <https://doi.org/10.7126/cdj.2012.736>.
- [7] N. J. Irudaya, T. Ramakrishnan, P. Sivaranjani, P. Shobana, N. Manisundar and M. Ebenezar, Iontophoresis a boon for treatment of dentinal hypersensitivity: case report. *Int J Cur Res Rev*, 8(23), 16-20, 2016.
- [8] P. M. Bartold, Dentinal hypersensitivity: a review. *Australian Dental Journal*, 51(3), 212-218, 2006. <https://doi.org/10.1111/j.1834-7819.2006.tb00431.x>.
- [9] H. E. Kim, H. K. Kwon and B. I. Kim, Application of fluoride iontophoresis to improve remineralization. *Journal of Oral Rehabilitation*, 36, 770-775, 2009. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2842.2009.01992.x>.
- [10] F. Sgolastra, A. Petrucci, R. Gatto and A. Monaco, Effectiveness of laser in dentinal hypersensitivity treatment: a systematic review. *Journal of Endodontics*, 37(3), 297-303, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2010.11.034>.
- [11] D. A. Kern, M. J. McQuade, M. J. Scheidt, B. Hanson and T. E. Van Dyke, Effectiveness of sodium fluoride on tooth hypersensitivity with and without iontophoresis. *Journal of Periodontology*, 60(7), 386-389, 1989. <https://doi.org/10.1902/jop.1989.60.7.386>.
- [12] S. Shende, S. Ansari, D. Gattani, G. Bhutada, M. Mishra, G. Niswade and A. Wankhede, Comparative evaluation of efficacy of low level laser therapy using diode laser and iontophoresis with 2% sodium fluoride gel in the treatment of patients with dentinal hypersensitivity. *International Journal of Current Advanced Research*, 6(8), 5368-5373, 2017. <https://dx.doi.org/10.24327/ijcar.2017.5373.0708>.
- [13] A. J. Shinde, A. L. Shinde, K. C. Garala, S. A. Kandekar and H. N. More, Physical penetration enhancement by iontophoresis: a review. *International Journal of Current Pharmaceutical Research*, 2(1), 1-9, 2010.
- [14] N. Kirubakaran, M. Chandrika and K. R. V. Rani, Iontophoresis: controlled transdermal drug delivery system. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 6(8), 3174-3185, 2015. [https://dx.doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.6\(8\).3174-85](https://dx.doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.6(8).3174-85).
- [15] M. Ş. Kaynakçı, Ters iyontoforez yöntemiyle non-invazif kan şekeri ölçümü. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
- [16] A. Linde and M. Goldberg, Dentinogenesis. *Critical Reviews in Oral Biology and Medicine*, 4(5), 679-728, 1993. <https://doi.org/10.1177/10454411930040050301>.
- [17] H. J. Shiau, Dentin hypersensitivity. *Journal of Evidence-Based Dental Practice Special Issue - Periodontal and Implant Treatment*, 12(3), 220-228, 2012. [https://doi.org/10.1016/s1532-3382\(12\)70043-x](https://doi.org/10.1016/s1532-3382(12)70043-x).
- [18] A. M. Kielbassa, Dentin hypersensitivity: Simple steps for everyday diagnosis and management. *International Dental Journal*, 52(5), 394-396, 2002. <https://doi.org/10.1002/j.1875-595X.2002.tb00939.x>.
- [19] M. Addy, Dentin hypersensitivity: new perspectives on an old problem. *International Dental Journal*, 52(5), 367-375, 2002. <https://doi.org/10.1002/j.1875-595X.2002.tb00936.x>.
- [20] P. Bakshi, D. Vora, K. Hemmady and A. K. Banga, Iontophoretic skin delivery systems: Success and failures. *International Journal of Pharmaceutics*, 586, 119584, 1-9, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119584>.
- [21] J. D. Byrne, J. J. Yeh and J. M. DeSimone, Use of iontophoresis for the treatment of cancer. *Journal of Controlled Release*, 284, 144-151, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2018.06.020>.
- [22] E. Krueger, J. L. Claudino Junior, E. M. Scheeren, E. B. Neves, E. Mulinari and P. Nohama, Iontophoresis: principles and applications. *Fisioter Mov*, 27(3), 469-481, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-5150.027.003.AR02>.
- [23] M. Y. Bhat, S. Farhat, V. Sawhney and S. Mir, The use of electric current - Iontophoresis for transcutaneous drug delivery - Novel drug delivery system (NDDS). *International Journal of Research in Pharmacology & Pharmacotherapeutics*, 3(3), 237-245, 2014.
- [24] P. Singal, R. Gupta and N. Pandit, 2% sodium fluoride-iontophoresis compared to a commercially available desensitizing agent. *Journal of Periodontology*, 76(3), 351-357, 2005. <https://doi.org/10.1902/jop.2005.76.3.351>.
- [25] W. Thongkukiatkun, K. Vongsavan, P. Kraivaphan, P. Rirattanapong, N. Vongsavan and B. Matthews, Effects of the iontophoresis of lignocaine with epinephrine into exposed dentine on the sensitivity of the dentine in man. *Archives of Oral Biology*, 60, 1098-1103, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.archoralbio.2015.04.006>.
- [26] G. Gupta, P. Gupta and R. Gupta, Iontophoresis and dentistry. *Indian Journal of Dental Sciences*, 2(1), 27-31, 2010.
- [27] Ç. Çınar, M. E. Odabaş ve T. Ulusu, Fluorid iyontoforezin iki farklı adeziv sistemin mikrogerilme bağlanma kuvveti üzerine etkisi. *Gazi Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi*, 29(2), 73-78, 2012.
- [28] Y. N. Kalia, A. Naik, J. Garrison and R. H. Guy, Iontophoretic drug delivery. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 56, 619-658, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2003.10.026>.
- [29] L. C. Li and R. A. Scudds, Iontophoresis: an overview of the mechanisms and clinical application. *Arthritis Care and Research*, 8(1), 51-61, 1995. <https://doi.org/10.1002/art.1790080111>.
- [30] T. Marjanovic, Z. Stare and M. Ranilovic, Electrical Properties of Teeth Regarding the Electric Vitality Testing. XII Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing (MEDICON 2010), pp. 391-394, Chalkidiki, Greece, 27-30 May 2010.
- [31] S. P. Sandhu, R. L. Sharma and V. Bharti, Comparative evaluation of different strengths of electrical current in the management of dentinal hypersensitivity. *Indian*

- Journal of Dental Research, 21(2), 207-212, 2010.
<https://doi.org/10.4103/0970-9290.66643>.
- [32] Ş. Dursun, Ü. B. Barutçu, M. C. Akyolcu, M. T. Kalkan, M. A. Körpınar, S. Toplan, M. Ercan, D. Özçelik, H. Tuncel ve S. Özdemir, *Biyofizik Uygulama Kitabı*. İstanbul Üniversitesi Yayınları (Yayın No: 5205), 2015.
- [33] M. Clemessy, G. Couaraze, B. Bevan and F. Puisieux, Preservation of skin permeability during in vitro iontophoretic experiments. *International Journal of Pharmaceutics*, 101(3), 219-226, 1994.
[https://doi.org/10.1016/0378-5173\(94\)90217-8](https://doi.org/10.1016/0378-5173(94)90217-8).
- [34] A. Ouazani and I. Habi, The Electric Impedance of the Human Body. 4th International Conference on Electrical, Electronics and Civil Engineering (ICEECE'2013), pp. 27-28, Dubai, UAE, 6-7 October 2013.
- [35] F. Clemente, P. Arpaia, and C. Manna, Characterization of human skin impedance after electrical treatment for transdermal drug delivery. *Measurement*, 46(9), 3494-3501, 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.06.033>.
- [36] M. Odell, The human body as an electric circuit. *Journal of Clinical Forensic Medicine*, 4, 1-6, 1997.
[https://doi.org/10.1016/S1353-1131\(97\)90001-8](https://doi.org/10.1016/S1353-1131(97)90001-8).
- [37] M. E. Aksoy, Elektrik akımlarının neden olduğu yaralanmalar. *Adli Tıp Bülteni*, 2(1), 25-34, 1997.
- [38] D. Krizaj, J. Svajger, J. Jan and V. Valencic, Analysis of AC Current Conduction Through the Human Tooth, *Bioelectromagnetic Measurements - 3. International Conference on Bioelectromagnetism*, pp. 125-126, Bled, Slovenia, 8-12 October 2000.
- [39] A. Güneç, İyontoforezin dişin yapısal ve fiziksel özelliklerine etkisi. *Doktora Tezi*, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, 1982.





Real-time monitoring and operation of power generation in a solar power plant with three phase central inverter topology

Üç fazlı merkezi invertör topolojisine sahip güneş enerjisi santralinde güç üretiminin gerçek zamanlı izlenmesi ve işletimi

Ali Unluturk^{1,*}, Fatih Sulan²

¹ Erzurum Technical University, Electric-Electronic Engineering Department, 25050, Erzurum, Turkey

² Tegnatia EPC Solution, Eastern Anatolia Regional Officer, Electric-Electronic Engineer, 25000, Erzurum, Turkey

Abstract

In this article, real-time monitoring, control and operation of the power generation of Şenyurt (Erzurum/Turkey) Solar Power Plant (SPP) with a three-phase central inverter topology is discussed. In the study, firstly, the power generation model of Şenyurt SPP with direct grid feed and central inverter topology was examined. Secondly, the data obtained by means of solar radiation sensor, Photovoltaic (PV) panel temperature sensor, outdoor temperature sensor and wind speed sensor, which are vital for monitoring and controlling the power generation of SPP, were evaluated. Real-time data obtained from these sensors were obtained with the help of a remote monitoring interface compatible with the Central Control and Data Acquisition (SCADA) system in the SPP. With the data of the sensors, the graphs obtained regarding the change of one-day active power generation of the SPP are interpreted. Thus, the operational inspection of the SPP for uninterrupted active power generation was carried out. Finally, practical field applications such as cleaning the snow accumulated on the PV panel surface, detection of hot zone faults in PV panels, measurement of current-voltage (I-V) characteristics of PV panel arrays, which are necessary for efficient power generation in the solar power plant, are also included.

Keywords: Central inverter topology, Three phase inverter, Power monitoring and control, Solar power plant.

1 Introduction

The rapid increase of the world population, the economic enrichment of developing countries, the active use of artificial intelligence-based devices in every field increase the demand for energy day by day. In addition, energy is an indispensable requirement in many areas such as private residences, industrial manufacturing, tourism sector, health care and agricultural production areas [1]. Despite this, the Covid-19 pandemic, which started in late 2019 and is still ongoing, has brought short-term uncertainties about the future of energy. In addition, this global epidemic has brought serious economic consequences in almost all countries, especially in underdeveloped and developing countries. According to the updated assessments of the

Özet

Bu makalede, üç fazlı merkezi invertör topolojisine sahip Şenyurt (Erzurum/Türkiye) Güneş Enerjisi Santrali (GES) güç üretiminin gerçek zamanlı olarak izlenmesi denetimi ve işletimi ele alınmıştır. Çalışmada ilk olarak doğrudan şebeke beslemeli ve merkezi invertör topolojisine sahip Şenyurt GES'in güç üretim modeli incelenmiştir. İkinci olarak, GES'in güç üretiminin izlenmesi ve denetimi için oldukça hayati öneme sahip güneş ışınımı sensörü, Fotovoltaik (FV) panel sıcaklık sensörü, dış ortam sıcaklık sensörü ve rüzgar hızı sensöründen elde edilen veriler değerlendirilmiştir. Bu sensörlerden elde edilen gerçek zamanlı veriler GES'de bulunan Merkezi Denetim ve Veri Toplama (MD&VT) sistemi ile uyumlu olan uzaktan izleme arayüzü yardımıyla elde edilmiştir. Sensörlere ait verilerle GES'in bir günlük aktif güç üretiminin değişimine ait elde edilen grafikler yorumlanmıştır. Böylece GES'in kesintisiz aktif güç üretimine dair işleme denetimi gerçekleştirilmiştir. Son olarak GES'de verimli bir şekilde güç üretiminin gerçekleştirilebilmesi için gerekli olan FV panel yüzeyinde biriken karların temizliği, FV panellerde oluşan sıcak bölge arızalarının tespiti, FV panel dizilerine ait akım-gerilim (I-V) karakteristiklerinin ölçümleri gibi pratik saha uygulamalarına da yer verilmiştir.

Anahtar kelimeler: Merkezi invertör topolojisi, Üç fazlı invertör, Güç izleme ve denetim, Güneş enerji santrali.

International Energy Agency (IEA) regarding the immediate effects of the epidemic on the energy system, they reported that they expect a 5% decrease in global energy demand, 7% in energy-related CO₂ emissions and 18% in energy investment in 2020. They expect oil consumption to decrease by 8% and coal use by 7% in 2020 [2]. The biggest reasons for the small contraction in energy demand are the curfew restrictions of the countries in order to prevent the spread of the pandemic disease, the gradual working order of the production industry and the restrictions in almost all social life. Nevertheless, renewable electricity generation is the only major energy source that continues to grow in 2020, and this resilience sets the course for the next decade and beyond. Unfortunately, not only is the supply of oil, coal and natural

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ali.unluturk@erzurum.edu.tr (A. Unluturk)
Geliş / Recieved: 08.04.2021 Kabul / Accepted: 25.05.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021
doi: 10.28948/ngumuh.911764

gas limited, there are also significant pollution and environmental concerns associated with the use of traditional energy sources and alternatives. For this reason, the Paris Agreement, which was realized with the participation of 195 countries in December 2015, it was aimed to limit the pre-industrial temperature increase to 1.5 °C by keeping the average temperature increase of the world well below 2 °C [3]. The only way to fix the global temperature increase to 2 degrees or less is to prefer alternative renewable energy sources with low carbon emission, which do not emit greenhouse gases [4].

Among the renewable energy sources, solar Photovoltaic (PV) systems show an enormous spread and development as the favorite of electricity supply worldwide. Thanks to the innovations in photovoltaic technology, PV cells have managed to go beyond laboratory prototypes and go into commercial production as PV modules [5]. Especially in the last decade, the cost of producing solar panels has dropped significantly. This visible decline in the cost of solar panels has made them the cheapest type of electricity. Thus, it has reached a level where it can compete with other energy sources in electricity generation in residential, commercial applications and public service-scale projects. Since 2014, the global weighted average cost of electricity of solar photovoltaics (PV) has also fallen into the fossil-fuel cost range [6]. It is predicted that solar PV systems will grow an average of 13% per year between 2020 and 2030 and will meet almost one-third of the electricity demand during this period [2]. In 2020, the total capacity of solar photovoltaic (PV) installations worldwide reached 707,494 MW [7].

Besides all these positive predictions about energy with solar PV systems, the optimum performance of PV energy systems is affected by external factors related to the light intensity of the sun, the power conversion structure and the other internal components of the PV system, geographical location and environmental factors. One of the most important components of solar PV systems is inverters that convert the generated DC power into AC power, which is the grid voltage. An important issue in inverter structures used in grid-connected PV systems is to achieve high output

power efficiency for different configurations at minimum cost. Moreover, real-time power monitoring and periodic control of the power plant is an important factor affecting the efficient power conversion of the SPP.

The purpose of this article is to provide a better understanding of the operation of a solar power plant with a three-phase central inverter structure. In addition, this study includes practical information about the operational maintenance and monitoring of a solar power plant with a three-phase central inverter structure, which is necessary for efficient energy conversion. This article is organized as follows. In section II, inverter topologies used in SPPs are discussed. Section III includes the structure, real-time monitoring, operation and maintenance procedures of a solar power plant with a central inverter structure. The last section addresses the discussion and conclusion part of this work.

2 Material and method

2.1 Inverter topologies of solar power plant

Solar PV modules used in SPPs generate DC power. However, to ensure that the DC power generated by the PV arrays flows into the AC grid, inverter systems that convert DC power to AC power must be used. In the last 10 years, the PV industry has grown rapidly in parallel with the developments in semiconductor and power electronics technologies. In particular, power electronics technology has played an important role in the development of new PV inverter topologies. Basically, two types of inverter structures are used in photovoltaic power conversions. These are power converters that use batteries directly independent of the grid and power converters that interact with the grid. Power inverters interacting with the electricity grid can be designed in accordance with central, string, module and multi-string structures. Figure 1 shows the different inverter topologies used in grid-connected solar power plants [8]. Each configuration consists of a combination of serial or/and parallel PV modules [9].

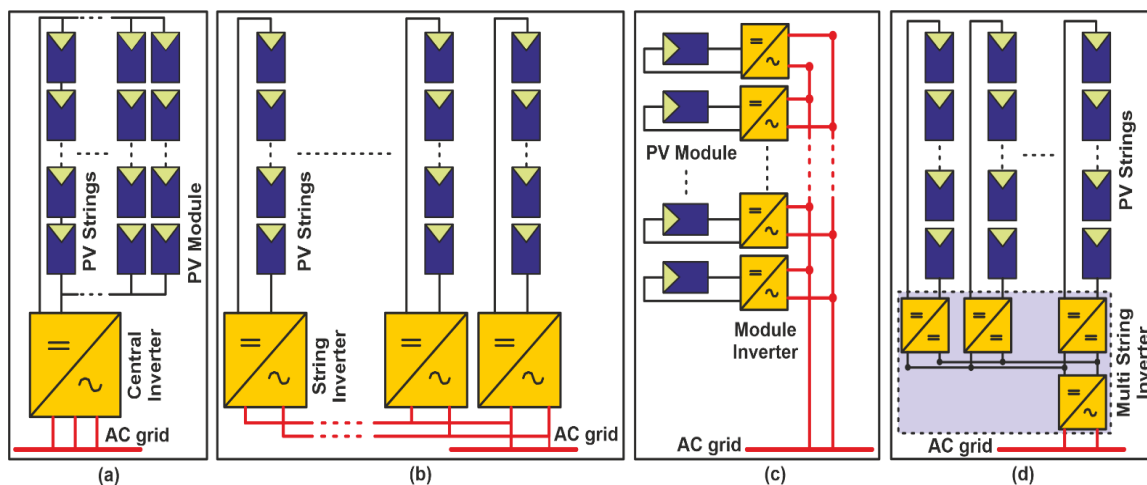


Figure 1. (a) Central (b) String (c) Module (d) Multi-String Inverter Topologies used in Solar Power Plant [8-9]

3 Monitoring and operation of the solar power plant

3.1 Monitoring of the solar power plant

Şenyurt Solar Power Plant, which is located in Erzurum/Turkey, is a facility with a DC installed power of 3.36 MW and This facility consists of 3 parts, each of which is 1 MW in equal parts. There are generally two types of structuring in solar power plants established on the field, these are power plants with a string inverter and power plants with the central inverter. Although it is variable in power plants with a string inverter, it can be said that it is designed as an inverter for every 100 kW of power. In the mentioned power plant, a central inverter of 1 MW was used for each plot zone. There are 24 strings in a combiner box of 140 kW. Figure 2 shows the power flow block diagram of the Şenyurt solar power plant with grid connection and central inverter structure [10]. In addition, the connection structures of the PV modules in Şenyurt Solar Power Plant are included in Figure 2. This structure is converted to DC-AC by means of an inverter, and electricity generation is realized by adjusting it to the level of 34.5 kV, which is the city grid, with the help of a transformer with a power of 1250 kVA. In addition, many data such as production, consumption radiation values, air conditions can be monitored instantly from the SCADA system, which is installed in the power plant.

In order to monitor the power generation obtained from Şenyurt solar power plant instantly, radiation, cell

temperature, wind and ambient temperature sensors are used. Figure 3a shows the solar irradiance, PV cell temperature, air temperature and wind speed values. Figure 3b shows the power generation values of the SPP for one day. The data in Figure 3a-b are obtained in clear air without clouds. The distribution of solar radiation is quite smooth. At the same time, the temperature of the PV panel and the ambient temperature is quite regular. Wind speed varies considerably. However, in general, the radiation and cell temperature values, which significantly affect the production of the SPP, and the power generation value is in harmony. However, such smooth power generation values cannot always be achieved. Some production losses occur on days when the solar radiation is largely varying, and on sunny days when the cell temperature increases too much. In addition, the shading on the PV panels and the blocking of the surface of the PV panels as a result of snowfall are other important parameters affecting the production of the SPP. At the same time, the power generation value of SPP is not realized in any power cut on the grid side in power plants that have a central inverter structure due to their nature. In Figure 4a-b, it is seen that the power generation value of the SPP suddenly becomes zero due to the interruption on the electricity grid side.

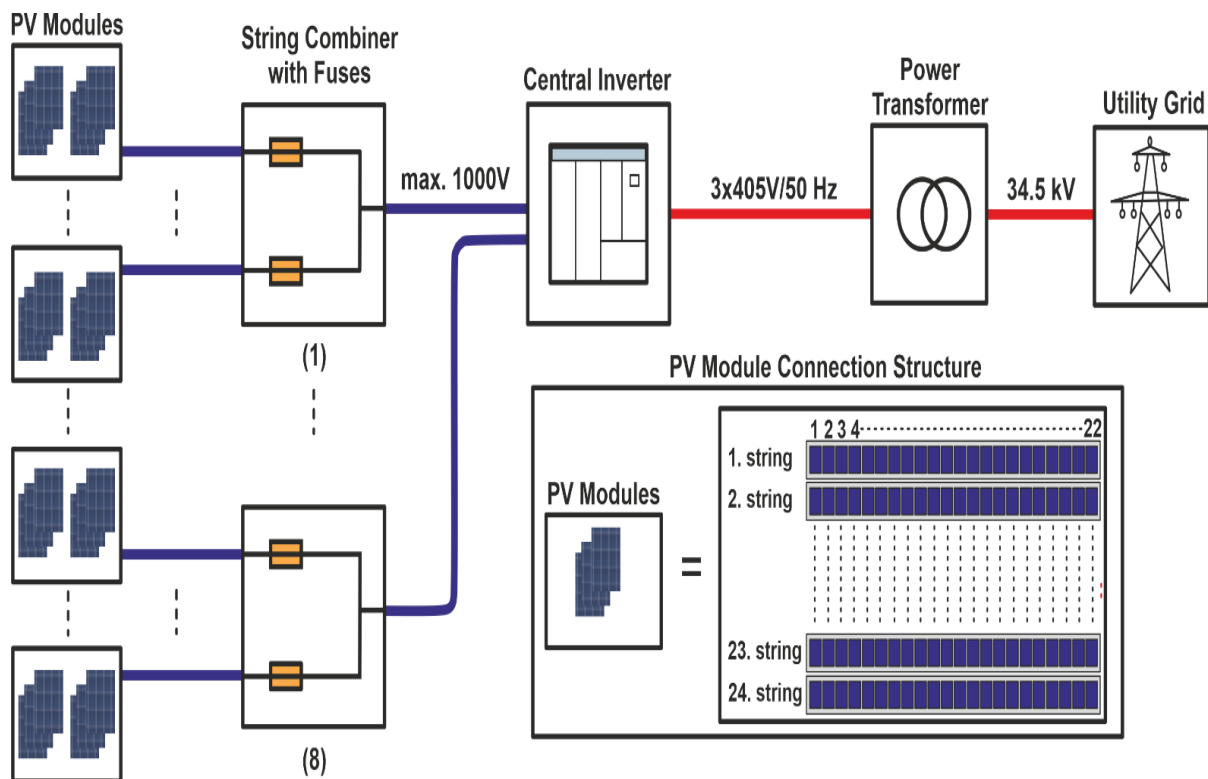


Figure 2. (a) Power flow diagram of the Şenyurt Solar Power Plant [10]

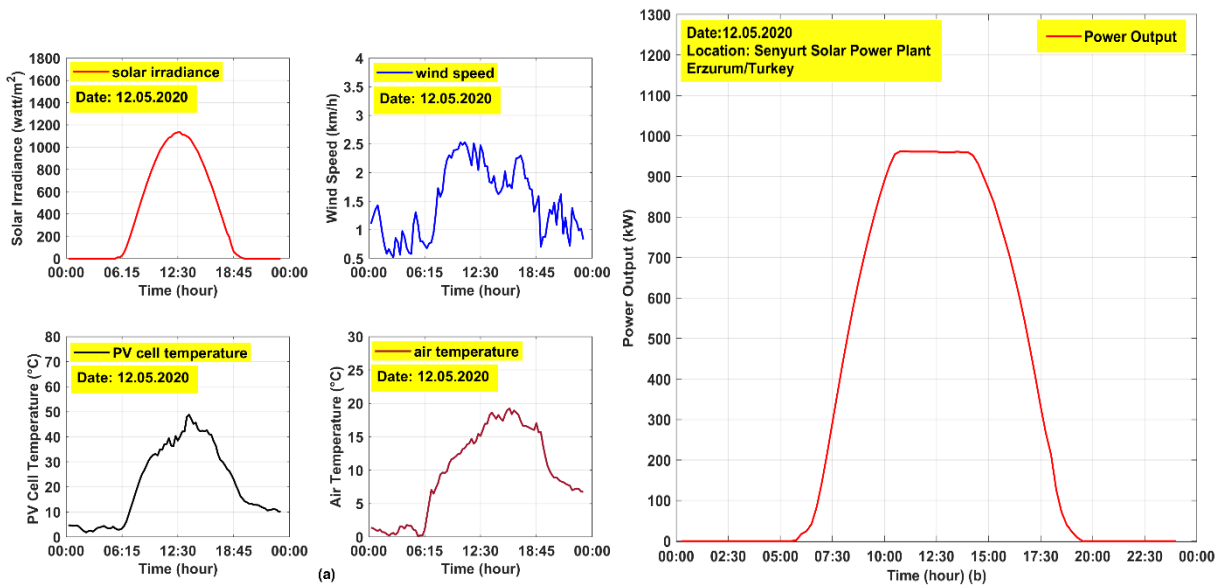


Figure 3. (a) Values obtained from the sensors, (b) One-day power generation value of a solar power plant

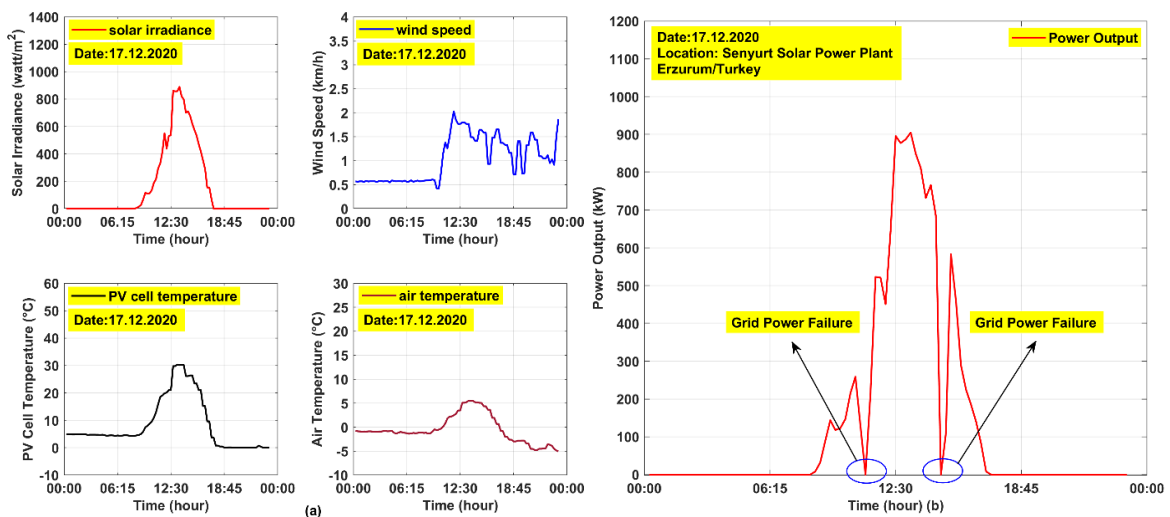


Figure 4. (a) Values obtained from the sensors, (b) Power generation on a grid power failure day

3.2 Operation of the solar power plant

The main goal of maintenance and repair in solar power plants is to keep the production of the system at an optimum level continuously. Studies in this context should be carried out on a daily, 6-month and annual basis. The works carried out in the solar PV plant can be listed as follows.

- I-V characteristic measurements
- Thermal imaging (Hot-Spot Failure Detection)
- Cleaning of PV panel dirtiness
- Weed cleaning, Snow Cleaning
- High voltage installation control and operating
- Transformer maintenance
- SCADA system control
- PV string measurements
- Weather station maintenance
- MC4 connector controls
- Measurement and controls for inverter
- Grounding measurements
- Lightning protection system measurement
- Construction torque measurements
- Low voltage electrical installation measurements
- Camera system (remote monitoring of SPP) control
- Relay maintenance
- Control of the power generation value of SPP
- Labeling operations

One of these important works is the snow cleaning of the PV panels and it shown in Figure 5a. Although low temperature plays a major role in increasing the efficiency of photovoltaic panels, this situation causes the snow accumulated on the panel to not melt after the snowfall and to freeze and stick on it.

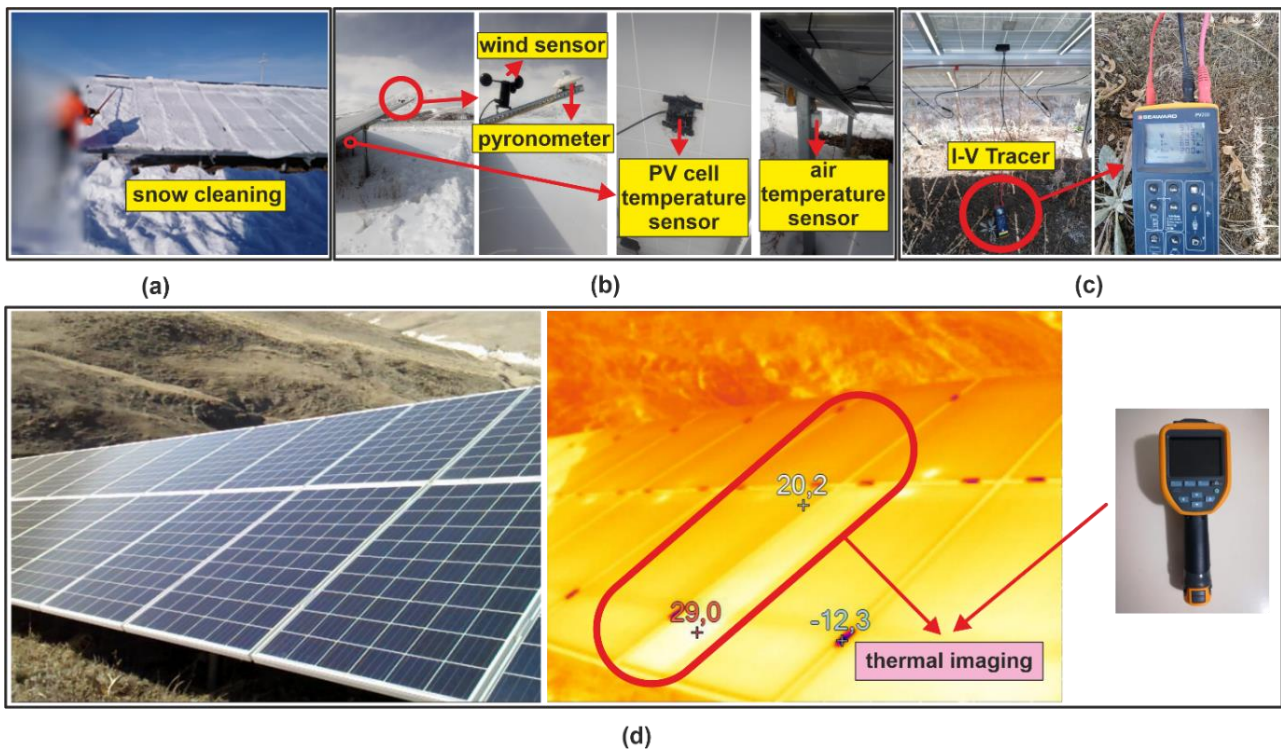


Figure 5. (a) Snow Cleaning (b) Solar Power Plant Sensors (c) PV I-V tracer (d) PV Thermal Imaging

It is aimed that the accumulation of snow, which remains as frost on it, is first thinned and the sunlight penetrates the panels, even if a little, and the panel starts production and generates heat. Special floor mats used in this process should be used with care and should be worked without damaging the panels. If the works are done correctly, the snow on the ground will increase the power generation of the power plant above its normal level with the albedo effect. The sensors in the weather station shown in Figure 5b should be maintained frequently and should work correctly. The data produced by these sensors are recorded and instantaneous values can be seen by remotely reading the data. Thanks to the data seen from the sensors, the energy actually produced and the energy that must be realized is compared and it is understood whether there is any problem. I-V measurements shown in Figure 5c should be made at least once a year. These measurements are made on the basis of strings and the Maximum Power Point (MPP) status of the strings is observed by creating an I-V chart. In the strings with defects in the I-V graph, if there is no DC fuse, broken cable or the panels are dirty, thermal measurements can be made as shown in Figure 5d. Thermal measurements are made with hand thermal or drone with a thermal camera. Figure 5d shows the irregularity of the temperature distribution at different points of the PV panel. As a result of thermal measurements, micro-cracks, cell failures and by-pass diode failures in photovoltaic panels are detected.

4 Conclusion

In this study, real-time monitoring, control and operation of the power generation of Şenyurt (Erzurum/Turkey) SPP with a three-phase central inverter topology is discussed. The

study includes detailed information about the power monitoring, control and operation procedures of the SPP. At the same time, with the SCADA system in the SPP, solar radiation affecting the production of the SPP, temperature value of the PV panel cell, air temperature and wind speed values were obtained. In addition to all these, visuals about thermal imaging for hot zone faults of solar energy panels and I-V characteristic measurement of PV panels were given. Finally, the daily power generation value of the solar power plant was monitored and it was evaluated whether there was any problem with the power generation values.

Acknowledgement

This study was carried out practically at Şenyurt Solar Power Plant. The operating responsibility of Şenyurt Solar Power Plant belongs to the Tegnatia EPC Solution (Tegnatia Üretim San. Tic. A. Ş.) company in Erzurum/Turkey. We would like to thank Tegnatia EPC Solution company for the opportunities provided to us in the realization of this study.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): %5

References

- [1] G. Y. Cao, J. Gao, T. Ermolieva, X. Xu and E. Rovenskaya, Societal dimension of energy consumption-exploring environmental inequality in China. Institute for Applied Systems Analysis, 8(2), 59-65, 2017. <https://doi.org/10.5430/rwe.v8n2p66>
- [2] F. Birol, et. al., World energy outlook 2020, International Energy Agency, 1-464, 2020.

- [3] Y. Gao, X. Gao and X. Zhang. The 2 °C global temperature target and evolution of the long-term goal of addressing climate change-from the United Nations framework convention on climate change to the Paris Agreement. *Engineering*, 3(2), 272-278, 2017. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.01.022>
- [4] B. Burger, D. Kranzer, Extreme high efficiency PV-power converters. In: 13th European conference on power electronics and applications, pp. 1-13, Barcelona, Spain, 8-10 September 2009: IEEE.
- [5] M. Saidan, A. G. Albaali, E. Alasis and J. K. Kaldellis, Experimental Study on the Effect of Dust Deposition on Solar Photovoltaic Panels in Desert Environment, *Renewable Energy*, 92, 499-505, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.031>
- [6] IRENA (2019), Renewable Power Generation Costs in 2018, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/May/IRENA_Renewable-Power-Generations-Costs-in-2018.pdf, Accessed 10 May 2021.
- [7] Solar Energy. <https://www.irena.org/solar>, Accessed 29 April 2021.
- [8] L. Hassaine, E. OLias, J. Quintero and V. Salas, Overview of power inverter topologies and control structures for grid connected photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 796-807, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.005>
- [9] T. K. S. Freddy and N. A. Rahim, Photovoltaic Inverter Topologies for Grid Integration Applications, in *Advances in Solar Photovoltaic Power Plants*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016, ch. 2, pp. 15-23. https://doi.org/10.1007/978-3-662-50521-2_2
- [10] Sunny Central 1000CP XT. <https://files.sma.de/downloads/SC1000CP-DEN1751-V23web.pdf>, Accessed 25 April 2021.





Dik açılı dördün genlik modülasyonu ve L-kollu MRC tekniğine dayalı bir kablosuz haberleşme sisteminin Fisher-Snedecor F sönümlü kanallardaki performansı

Performance of a wireless communication system based on rectangular quadrature amplitude modulation and L-branch MRC schemes over Fisher-Snedecor F fading channels

Nuri Kapucu^{1,*} 

¹ Hitit Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 19030, Çorum Türkiye

Özet

Bu çalışmada, iletim yöntemi olarak dik açılı dördün genlik modülasyonunu kullanan L kollu en yüksek oranlı birleştirme alıcısına sahip bir kablosuz haberleşme sisteminin Fisher-Snedecor F sönümlenme koşulları altındaki ortalama sembol hata oranı analiz edilmiştir. Analiz, L kollu en yüksek oranlı birleştirme tekniğine dayalı alıcıdaki toplam anlık işaret-gürültü oranının olasılık yoğunluk fonksiyonuna dayanarak yapılmıştır. Ele alınan sistemin ortalama sembol hata oranı için Gauss Q fonksiyonunun yaklaşık bir ifadesi kullanılarak kapalı formda yaklaşık bir çözüm sunulmuştur. Daha sonra ise sistemin asimptotik ortalama sembol hata oranı türetilmiştir. Sönümlenme parametresi (m), gölgeleme parametresi (m_s), kol sayısı (L) ve modülasyon seviyesi değiştirilerek ortalama sembol hata oranı farklı konfigürasyonlar için gösterilmiştir. Buna ek olarak, türetilen yaklaşık ifadenin analitik sonuçları ile ortalama sembol hata oranı integralinin nümerik hesaplanması ile elde edilen sonuçların yakın uyum içinde olduğu da gösterilmiştir. Asimptotik sonuçların ise yüksek işaret-gürültü oranı bölgesinde diğer sonuçlar ile çok iyi uyum gösterdiği gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Fisher-Snedecor F sönümlenmesi, En yüksek oranlı birleştirme, Ortalama sembol hata oranı

1 Giriş

Kablosuz haberleşmede karşılaşılan en önemli sorunlardan birisi sönümlenmedir. Bu olumsuz etki ile mücadele etmede en önemli çözüm ise işaretin birbirinden bağımsız sönümlenmeye maruz kalmış kopyalarının alıcıya ulaştırılması olan çeşitleme teknikleridir. Çeşitleme yapılan sistemlerde seçmeli birleştirme (selection combining, SC), eşit kazançlı birleştirme (equal gain combining, EGC) ve en yüksek oranlı birleştirme (maximum ratio combining, MRC) gibi alıcıda birleştirme teknikleri kullanılmaktadır. Bu teknikler arasında en optimum olan yöntem MRC tekniğidir [1, 2]. En optimum yöntem olan MRC tekniğine dayalı alıcıların performansı çeşitli çalışmalarda analiz edilmiştir ve bazıları [3-8]'de verilmiştir. Jamal ve Hamid [3], masif

Abstract

In this study, average symbol error rate (ASER) of a wireless communication system which employs L-branch maximum ratio combining (MRC) at receiver and uses rectangular quadrature amplitude modulation (RQAM) as a transmission scheme is analyzed under Fisher-Snedecor F fading conditions. The analysis is conducted based on probability density function of total instantaneous signal-to-noise ratio (SNR) at L-branch MRC receiver. A closed-form approximate solution is presented for the ASER of the considered system by utilizing an approximate expression of Gaussian Q function. Then, asymptotic ASER of the system is derived. The ASER is illustrated for different configurations by varying fading parameter (m), shadowing parameter (m_s), number of branches (L) and modulation level. In addition, it is also shown that analytical results of the derived approximate expression are close to the ones obtained by the numerical computation of the ASER integral. It is observed that the asymptotic results are in well agreement with other results at high SNR region.

Keywords: Fisher-Snedecor F fading, Maximum ratio combining, Average symbol error rate

çok girişli çok çıkışlı (multiple-input multiple-output, MIMO) sistemlerde MRC tekniğine dayalı alıcıların performansını işaret-gürültü+girişim oranı (signal-to-interference-plus-noise ratio, SINR) için olasılık yoğunluk fonksiyonu (probability density function, PDF) türeterek analiz etmiştir. [4]'te verilen çalışmada, işbirlikli kod bölmeli çoklu erişim sistemlerinde alıcıda birleştirme işlemi MRC tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Benzer şekilde [5]'te ise L kollu MRC alıcıların η - μ ve κ - μ sönümlü kanallardaki ortalama sembol hata oranı (average symbol error rate, ASER) başarımı için kapalı formda ifadeler önerilmiştir. [6]'da M -li faz kaydırmalı anahtarlama modülasyonu kullanılan ve MRC alıcıların bulunduğu sistemin ortalama sembol hata oranı κ - μ sönümlü kanallarda analiz edilmiştir.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: nurikapucu@hitit.edu.tr (N. Kapucu)

Geliş / Received: 19.04.2021 Kabul / Accepted: 03.06.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.922679

Bir başka çalışmada [7]'de MRC alıcıların iki dalga yayılmış güç (two wave diffused power, TWDP) sönümlü kanallarda kanal kapasitesi başarımları sunulmuştur. Liu vd. [8], veri sezimi ve kanal kestirimi için düşük çözünürlüklü analog-dijital çeviricilerin kullanıldığı masif MIMO sistemlerin alıcı kısmında MRC yöntemini tercih ederek Rician sönümlü kanallarda performans analizi yapmışlardır.

Yukarıda bir kısmı [3-8]'de verilen çalışmalarda MRC alıcıların performansı çeşitli sönümlü kanallarda analiz edilmiştir. Yakın zamanda bu sönümlü kanal modellerinden farklı olarak, çokyollu yayılım ve gölgeleme etkilerini birleşik olarak iyi bir şekilde tanımlayan, matematiksel olarak analiz kolaylığı sağlayabilen Fisher-Snedecor F isimli bir sönümlenmeli kanal modeli [9]'da önerilmiştir. Önerilen bu kanal modeli için bina içi ve bina dışı ortamlarda deneysel veriler toplanmış ve bu veriler ile kanal modelinin doğruluğu ortaya konulmuştur. Deneysel veriler, bina içi ve bina dışı ortamlarda 5.8 GHz frekans bandında cihazdan cihaza (device-to-device, D2D) haberleşme için elde edilmiştir [9, 10].

Bugüne kadar Fisher-Snedecor F sönümlü kanallarda çeşitli haberleşme sistemlerinin performansları analiz edilmiştir ve bazıları [11-22]'de verilmiştir. [11]'de tek girişli tek çıkışlı bir sistemde sayısal modülasyonların Fisher-Snedecor F sönümlü kanallardaki performansı sunulmuştur. Bununla birlikte, çeşitli iletim teknikleri için Fisher-Snedecor F sönümlü kanalın kapasitesi [12]'de ele alınmıştır. [13, 14]'te sırasıyla tek girişli tek çıkışlı ve çok girişli tek çıkışlı sistemlerin Fisher-Snedecor F sönümlü kanallardaki efektif kapasitesi için analitik ifadeler türetilmiştir. Badarneh vd. [15] Fisher-Snedecor F değişkenlerin çarpımı ve oransal çarpımını ele alarak kaskat F kanalında performans analizi ile spektrum paylaşımı ağların performans analizini ortaya koymuştur. [16]'da F sönümlü kanallarda SC alıcıların, [17-19]'da ise MRC alıcıların performansı sunulmuştur. [20]'de ise F sönümlü kanalların seviye geçiş oranı (level crossing rate) ve ortalama sönüm süresi (average fade duration) bulunmuştur. İki atlamalı röleli haberleşme sistemlerinin F sönümlü kanallardaki servis-dışı kalma olasılığı, hata analizi, kanal kapasitesi ve efektif kapasitesi [21]'de türetilmiştir. [22]'de F dağılımlı rastgele değişkenlerin toplamı için çok değişkenli Fox-H fonksiyonu cinsinden PDF önerilmiş ve önerilen ifade kullanılarak MRC alıcıların servis-dışı kalma olasılığı, efektif kapasitesi ve farklı iletim teknikleri için kanal kapasitesi performansı gösterilmiştir.

Bilindiği kadarıyla literatürde, dik açılı dördün genlik modülasyonu (rectangular quadrature amplitude modulation, RQAM) yöntemini kullanan L kollu MRC alıcısına sahip bir kablosuz haberleşme sisteminin Fisher-Snedecor F sönümlenmeli kanallardaki ASER performansını analiz eden bir çalışma bulunmamaktadır. RQAM modülasyonu band genişliği yönünden verimli olan genel bir modülasyon türüdür ve yüksek hızlı mobil iletişim ile mikrodalga iletişim alanında pratik uygulamalara sahip olan çok önemli bir iletim yöntemidir [23]. Bu motivasyon ile bu çalışmada, RQAM iletim yöntemini kullanan ve L kollu MRC alıcısına sahip sistemlerin Fisher-Snedecor F sönümlü kanallarda ortalama sembol hata oranı (average symbol error rate,

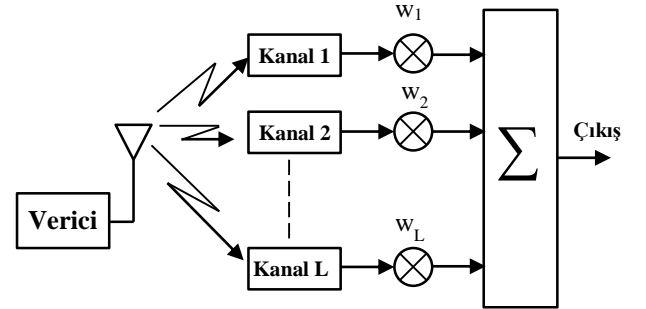
ASER) için PDF'ye dayalı olarak kapalı formda yaklaşık bir ifade türetilmiştir. Türetilen ifade yaklaşık bir ifade olup Gamma fonksiyonu, Whittaker fonksiyonu gibi popüler paket programlarda yerleşik olarak bulunan fonksiyonlar içermektedir ve Matlab ile Mathematica gibi popüler yazılımlar kullanılarak nümerik olarak kolaylıkla hesaplanabilmektedir. Daha sonra, ele alınan sistemin yüksek SNR bölgesindeki davranışını analiz etmek için asimptotik bir ASER ifadesi önerilmiştir. Ele alınan sistemin ASER performansı sönümlenme parametresi, gölgeleme parametresi, kol sayısı ve modülasyon seviyesinin farklı konfigürasyonları için gösterilmiştir.

2 Sistem ve kanal modelleri

Bu çalışmada ele alınan MRC birleştirme yöntemi Şekil 1'de gösterilmektedir. L adet farklı yoldan gelen işaretler alıcıda birleştirilmektedir. Buna göre l . yoldan gelen işaretin anlık SNR'si (γ_l)

$$\gamma_l = \frac{h_l^2 E_s}{N_0} \quad (1)$$

olarak ifade edilir. Burada, h_l l . yolun sönümlenme katsayısı, E_s sembol enerjisi ve N_0 ise l . yolun tek taraflı güç spektral yoğunluğudur.



Şekil 1. MRC yöntemi blok şeması

Şekil 1'deki w_l ifadesi l . yolun MRC yöntemindeki ağırlıklandırma katsayısıdır. L -kollu MRC alıcısında toplam anlık SNR aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\gamma_{MRC} = \sum_{l=1}^L \gamma_l \quad (2)$$

Şekil 1'deki L adet kanal ise Fisher-Snedecor F sönümlenmeli olarak kabul edilmiştir. Anlık SNR'ye ait PDF ifadesi Fisher-Snedecor F dağılımına göre

$$f_\gamma(\gamma) = \frac{m^m (m_s \bar{\gamma})^{m_s} \gamma^{m-1}}{B(m, m_s) (m\gamma + m_s \bar{\gamma})^{m+m_s}} \quad (3)$$

olarak verilir [9]. Burada, m sönümlenme parametresi, m_s gölgeleme parametresi, $B(\cdot, \cdot)$ ifadesi Beta fonksiyonunu göstermektedir. $\bar{\gamma}$ ise ortalama SNR olup $\bar{\gamma} = E[\gamma]$ şeklinde ifade edilir ve $E[\cdot]$ ise beklenen değerdir. **Denklem (2)**'ye dayalı olarak MRC alıcısındaki toplam anlık SNR için PDF ifadesi bağımsız ve özdeş dağılımlı L adet Fisher-Snedecor F değişkeninin toplamına ait PDF'ye eşit olmaktadır. MRC alıcı çıkışındaki toplam anlık SNR için PDF aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [18]:

$$f_{\gamma_{MRC}}(\gamma) = \frac{1}{\Gamma(mL)} \left(\frac{m}{m_s \bar{\gamma}} \right)^{mL} \left(\frac{\Gamma(m+m_s)}{\Gamma(m_s)} \right)^L \times \gamma^{mL-1} {}_2F_1 \left(m+m_s, mL; mL; -\frac{m}{m_s \bar{\gamma}} \gamma \right) \quad (4)$$

Burada, L kol (ya da yol) sayısı, $\Gamma(\cdot)$ Gamma fonksiyonu, ${}_2F_1(\cdot, \cdot; \cdot; \cdot)$ ise Gauss hipergeometrik fonksiyondur.

3 Ortalama sembol hata oranı analizi

Ortalama sembol hata oranı şu şekilde ifade edilir:

$$P_s(e) = \int_0^{\infty} P_s(e|\gamma) f_{\gamma}(\gamma) d\gamma \quad (5)$$

$P_s(e|\gamma)$ ifadesi toplamsal beyaz Gauss gürültülü (additive White Gaussian noise, AWGN) kanalın koşullu sembol hata oranı (symbol error rate, SER) ve $f_{\gamma}(\gamma)$ ise kanal modeline ait anlık SNR için PDF ifadesidir. M -li RQAM tekniğinin AWGN kanalındaki koşullu SER ifadesi şu şekildedir:

$$P_s(e|\gamma) = 2 \left[pQ(x_1) + qQ(x_2) - 2pqQ(x_1)Q(x_2) \right] \quad (6)$$

Burada $Q(\cdot)$ sembolü Gauss Q fonksiyonunu temsil etmektedir. Bunun yanında diğer parametreler; $M = M_I \times M_Q$ eş fazlı (in-phase) ve dördün (quadrature) elemanların çarpımından oluşan modülasyon seviyesi, $x_1 = a\sqrt{\gamma}$, $x_2 = b\sqrt{\gamma}$, $p = 1 - (1/M_I)$, $q = 1 - (1/M_Q)$, $b = \beta a$, $\beta = d_Q/d_I$ ve

$$a = \sqrt{\frac{6}{(M_I^2 - 1) + (M_Q^2 - 1)\beta^2}}$$

şeklinde. d_I ve d_Q parametreleri ise sırasıyla eş fazlı ve dördün karar uzaklıklarıdır [5]. **Denklem (6)**'daki ifade **Denklem (5)**'te yerine yazılarak ASER aşağıdaki gibi yazılır:

$$P_s(e) = \int_0^{\infty} 2pQ(x_1) f_{\gamma}(\gamma) d\gamma + \int_0^{\infty} 2qQ(x_2) f_{\gamma}(\gamma) d\gamma - \int_0^{\infty} 4pqQ(x_1)Q(x_2) f_{\gamma}(\gamma) d\gamma \quad (7)$$

Bu integral Gauss Q fonksiyonunu içerdiğinden bilindiği kadarıyla kapalı formda bir çözüme sahip değildir. Bu yüzden Gauss Q fonksiyonunu üstel fonksiyonlar cinsinden ifade ederek **Denklem (7)**'deki integrale kapalı formda yaklaşık bir çözüm bulunabilir. Literatürde sıklıkla kullanılan ve Gauss Q fonksiyonunun iyi bir yaklaşıklığı olan ifade [24]'te önerilmiştir ve şu şekildedir:

$$Q(x) \approx \frac{1}{12} e^{-\frac{x^2}{2}} + \frac{1}{4} e^{-\frac{2x^2}{3}} \quad (8)$$

Bu yaklaşıklığın kullanılması ile **Denklem (7)**'deki integral için bir çözüm bulmak mümkün hale gelmiştir. **Denklem (7)**'deki ifade üç ayrı sembol ile aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$P_s(e) = I_1 + I_2 - I_3 \quad (9)$$

Denklem (4)'teki PDF ifadesinin kullanılması ile birlikte I_1 , I_2 ve I_3 şu şekilde yazılır:

$$I_1 = 2p \int_0^{\infty} \left(\frac{1}{12} e^{-\frac{a^2\gamma}{2}} + \frac{1}{4} e^{-\frac{2a^2\gamma}{3}} \right) \psi \gamma^{mL-1} \times {}_2F_1(m+m_s, mL; mL; -\lambda\gamma) d\gamma \quad (10)$$

$$I_2 = 2q \int_0^{\infty} \left(\frac{1}{12} e^{-\frac{b^2\gamma}{2}} + \frac{1}{4} e^{-\frac{2b^2\gamma}{3}} \right) \psi \gamma^{mL-1} \times {}_2F_1(m+m_s, mL; mL; -\lambda\gamma) d\gamma \quad (11)$$

$$I_3 = 4pq \int_0^{\infty} \left(\frac{1}{12} e^{-\frac{a^2\gamma}{2}} + \frac{1}{4} e^{-\frac{2a^2\gamma}{3}} \right) \left(\frac{1}{12} e^{-\frac{b^2\gamma}{2}} + \frac{1}{4} e^{-\frac{2b^2\gamma}{3}} \right) \times \psi \gamma^{mL-1} {}_2F_1(m+m_s, mL; mL; -\lambda\gamma) d\gamma \quad (12)$$

Burada

$$\psi = \frac{1}{\Gamma(mL)} \left(\frac{m}{m_s \bar{\gamma}} \right)^{mL} \left(\frac{\Gamma(m+m_s)}{\Gamma(m_s)} \right)^L$$

ve $\lambda = m/(m_s \bar{\gamma})$ olarak tanımlıdır. **Denklem (10)** ve **Denklem (11)**'de iki adet, **Denklem (12)**'de ise dört adet benzer formda integral bulunmaktadır. Bu integральer

$$I(\rho) = \int_0^{\infty} \gamma^{mL-1} e^{-\rho\gamma} {}_2F_1(m+m_s, mL; mL; -\lambda\gamma) d\gamma \quad (13)$$

formundadır. Buna göre Denklem (10), Denklem (11) ve Denklem (12)'deki ifadeler Denklem (13)'e göre tekrar aşağıdaki gibi yazılır:

$$I_1 = \frac{p}{6} \psi I \left(\frac{a^2 \gamma}{2} \right) + \frac{p}{2} \psi I \left(\frac{2a^2 \gamma}{3} \right) \quad (14)$$

$$I_2 = \frac{p}{6} \psi I \left(\frac{b^2 \gamma}{2} \right) + \frac{p}{2} \psi I \left(\frac{2b^2 \gamma}{3} \right) \quad (15)$$

$$I_3 = \frac{pq}{36} \psi I \left(\frac{a^2 \gamma}{2} + \frac{b^2 \gamma}{2} \right) + \frac{pq}{12} \psi I \left(\frac{a^2 \gamma}{2} + \frac{2b^2 \gamma}{3} \right) + \frac{pq}{12} \psi I \left(\frac{2a^2 \gamma}{3} + \frac{b^2 \gamma}{2} \right) + \frac{pq}{4} \psi I \left(\frac{2a^2 \gamma}{3} + \frac{2b^2 \gamma}{3} \right) \quad (16)$$

Buna göre Denklem (14)'teki integral için [25, 2.21.2.2]'den faydalanarak aşağıdaki ifade türetilmiştir:

$$I_1 = \frac{p}{6} \psi \Xi \left(\frac{a^2}{2} \right) + \frac{p}{2} \psi \Xi \left(\frac{2a^2}{3} \right) \quad (17)$$

Burada

$$\Xi(\varphi) = \frac{\Gamma(mL)}{\varphi^{mL}} \left[\frac{\varphi}{\lambda} \right]^{-(m+m_s+mL-1)/2} e^{\frac{\varphi}{2\lambda}} \times W_{(1-m-m_s-mL)/2, (m+m_s-mL)/2} \left(\frac{\varphi}{\lambda} \right) \quad (18)$$

olarak türetilmiştir. Burada $W_{\cdot}(\cdot)$ Whittaker fonksiyonudur. Türetilen bu ifade önce Denklem (14) ve benzer çözümler Denklem (15) ve Denklem (16)'da yerine yazılarak I_1 , I_2 ve I_3 elde edilmiş ve daha sonra bu ifadeler Denklem (9)'da yerine yazılarak ASER türetilmiştir:

$$P_s(e) = \psi p \left\{ \frac{1}{6} \Xi \left(\frac{a^2}{2} \right) + \frac{1}{2} \Xi \left(\frac{2a^2}{3} \right) \right\} + q \psi \left\{ \frac{1}{6} \Xi \left(\frac{b^2}{2} \right) + \frac{1}{2} \Xi \left(\frac{2b^2}{3} \right) \right\} - \psi pq \left\{ \frac{1}{36} \Xi \left(\frac{a^2 + b^2}{2} \right) + \frac{1}{12} \Xi \left(\frac{a^2}{2} + \frac{2b^2}{3} \right) + \frac{1}{12} \Xi \left(\frac{2a^2}{3} + \frac{b^2}{2} \right) + \frac{1}{4} \Xi \left(\frac{2a^2}{3} + \frac{2b^2}{3} \right) \right\} \quad (19)$$

4 Asimptotik analiz

$\bar{\gamma} \rightarrow \infty$ iken Denklem (4)'teki PDF, [26, 07.23.03.0001.01]'deki özellik kullanılarak asimptotik olarak aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

$$f_{\nu_{MRC}}^{asympt}(\gamma) = \frac{1}{\Gamma(mL)} \left(\frac{m}{m_s \bar{\gamma}} \right)^{mL} \left(\frac{\Gamma(m+m_s)}{\Gamma(m_s)} \right)^L \gamma^{mL-1} \quad (20)$$

Denklem (20)'de verilen asimptotik PDF ifadesi kullanılarak I_1 , I_2 ve I_3 asimptotik olarak şu şekilde yazılır:

$$I_1^{asympt} = 2p \int_0^{\infty} \left(\frac{1}{12} e^{-\frac{a^2 \gamma}{2}} + \frac{1}{4} e^{-\frac{2a^2 \gamma}{3}} \right) \psi \gamma^{mL-1} d\gamma \quad (21)$$

$$I_2^{asympt} = 2q \int_0^{\infty} \left(\frac{1}{12} e^{-\frac{b^2 \gamma}{2}} + \frac{1}{4} e^{-\frac{2b^2 \gamma}{3}} \right) \psi \gamma^{mL-1} d\gamma \quad (22)$$

$$I_3^{asympt} = 4pq \int_0^{\infty} \left(\frac{1}{12} e^{-\frac{a^2 \gamma}{2}} + \frac{1}{4} e^{-\frac{2a^2 \gamma}{3}} \right) \left(\frac{1}{12} e^{-\frac{b^2 \gamma}{2}} + \frac{1}{4} e^{-\frac{2b^2 \gamma}{3}} \right) \times \psi \gamma^{mL-1} d\gamma \quad (23)$$

[27, (3.381.4)]'teki ilişkinin yardımıyla I_1^{asympt} , I_2^{asympt} ve I_3^{asympt} için aşağıdaki ifadeler elde edilmiştir:

$$I_1^{asympt} = p \left\{ \frac{\psi}{6} \left(\frac{a^2}{2} \right)^{-mL} \Gamma(mL) + \frac{\psi}{2} \left(\frac{2a^2}{3} \right)^{-mL} \Gamma(mL) \right\} \quad (24)$$

$$I_2^{asympt} = q \left\{ \frac{\psi}{6} \left(\frac{b^2}{2} \right)^{-mL} \Gamma(mL) + \frac{\psi}{2} \left(\frac{2b^2}{3} \right)^{-mL} \Gamma(mL) \right\} \quad (25)$$

$$I_3^{asympt} = pq \Gamma(mL) \left\{ \frac{\psi}{36} \left(\frac{a^2 + b^2}{2} \right)^{-mL} + \frac{\psi}{12} \left(\frac{3a^2 + 4b^2}{6} \right)^{-mL} + \frac{\psi}{12} \left(\frac{4a^2 + 3b^2}{6} \right)^{-mL} + \frac{\psi}{4} \left(\frac{2a^2 + 2b^2}{3} \right)^{-mL} \right\} \quad (26)$$

Ele alınan sistemin asimptotik ASER ifadesi şu şekilde yazılır: $P_s^{asympt}(e) = I_1^{asympt} + I_2^{asympt} - I_3^{asympt}$

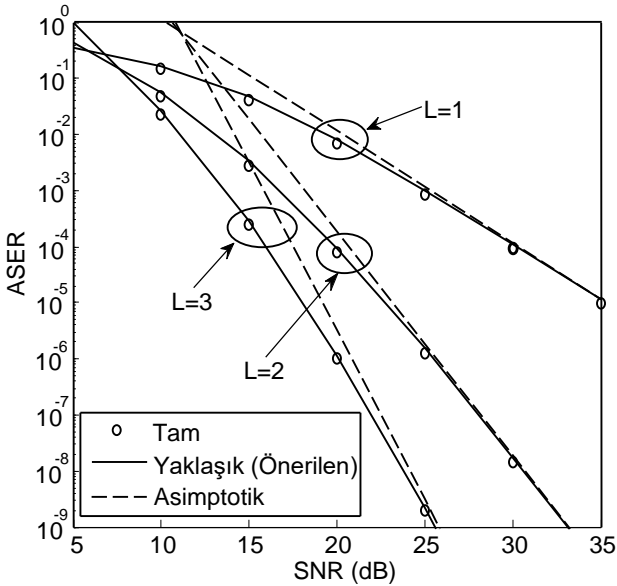
$$P_s^{asympt}(e) = p \left\{ \frac{\psi}{6} \left(\frac{a^2}{2} \right)^{-mL} \Gamma(mL) + \frac{\psi}{2} \left(\frac{2a^2}{3} \right)^{-mL} \Gamma(mL) \right\} + q \left\{ \frac{\psi}{6} \left(\frac{b^2}{2} \right)^{-mL} \Gamma(mL) + \frac{\psi}{2} \left(\frac{2b^2}{3} \right)^{-mL} \Gamma(mL) \right\} - pq \Gamma(mL) \left\{ \frac{\psi}{36} \left(\frac{a^2 + b^2}{2} \right)^{-mL} + \frac{\psi}{12} \left(\frac{3a^2 + 4b^2}{6} \right)^{-mL} + \frac{\psi}{12} \left(\frac{4a^2 + 3b^2}{6} \right)^{-mL} + \frac{\psi}{4} \left(\frac{2a^2 + 2b^2}{3} \right)^{-mL} \right\} \quad (27)$$

5 Nümerik sonuçlar

Bu bölümde ele alınan sistemin ASER performansını göstermek için çeşitli nümerik sonuçlar sunulmuştur. Denklem (19)'da önerilen yaklaşık ifadeden elde edilen analitik sonuçlar, Denklem (7)'deki integrallerin nümerik

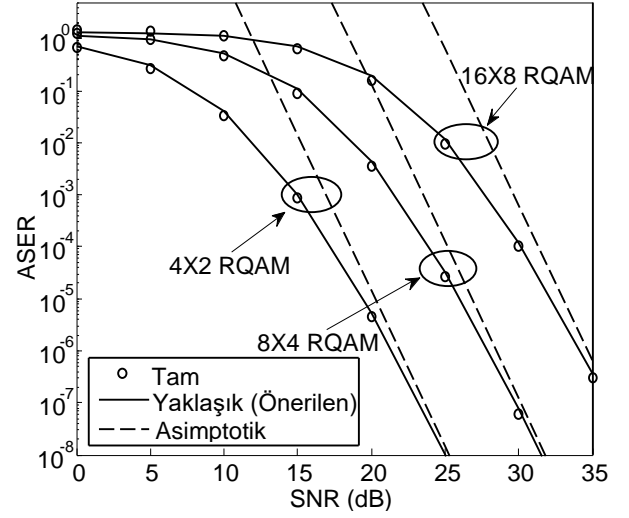
olarak hesaplanması ile elde edilen tam sonuçlar ve Denklem (27)'deki asimptotik ifadeden elde edilen sonuçlar kıyaslamalı olarak gösterilmiştir.

Şekil 2'de ele alınan L -kollu MRC alıcılı sistemde 4X2 RQAM yöntemi kullanıldığı durum için alıcıdaki kol sayısına göre Fisher-Snedecor F sönümlenmeli kanallardaki ASER performansı verilmiştir. Bu şekilde kanal sönümlenme parametresi $m=2$, gölgeleme parametresi $m_s=2$ ve $\beta=1$ olarak alınmıştır. Şekil 2 incelendiğinde beklenildiği gibi kol sayısı arttığında performans iyileşmektedir. Dolayısıyla bu şekilden de görüleceği üzere $L=3$ olduğunda en iyi performans elde edilmiştir. Çeşitlemedeki amaç orijinal bilginin birbirinden farklı sönümlenmeye maruz kalmış kopyalarının alıcıda birleştirilmesi olduğundan dolayı fazla sayıda birbirinden bağımsız işaret alınması performansı iyileştirmektedir ve aynı zamanda bu durum alıcıda MRC birleştirilmesi sonucunda elde edilen işaretin orijinal işarete yakın olması anlamına gelmektedir. Bunun yanında Denklem (17)'de önerilen yaklaşık ifadeden bulunan yaklaşık sonuçların Denklem (7)'nin nümerik olarak hesaplanması ile elde edilen tam sonuçlara oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu sonuç, önerilen yaklaşık ifadenin ele alınan sistem için iyi bir üst sınır olduğunu göstermektedir. Ayrıca Denklem (27)'den elde edilen asimptotik sonuçlar ise yüksek SNR bölgesinde diğer sonuçlar ile mükemmel uyum göstermektedir.



Şekil 2. 4X2 RQAM yöntemi kullanan L -kollu MRC alıcılı sistemlerin Fisher-Snedecor F sönümlü kanallarda kol sayısına göre ASER performansı

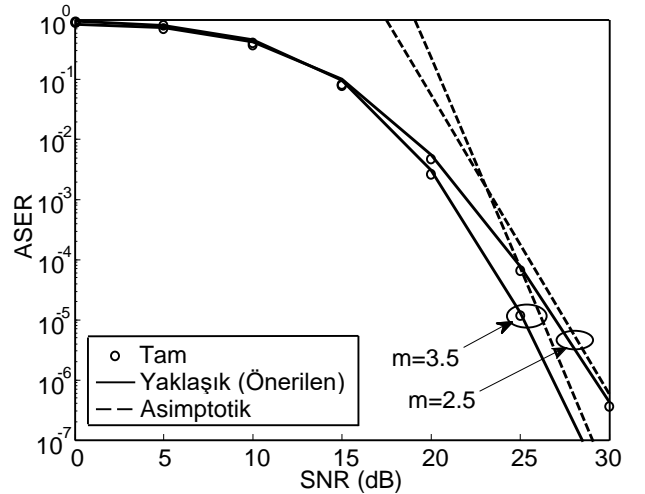
Şekil 3'te, kullanılan modülasyon seviyesindeki değişimin ele alınan sistemin performansına etkisi incelenmiştir. Burada $m=3$, $m_s=20$, $\beta=1$ ve kol sayısı $L=2$ olarak alınmıştır.



Şekil 3. Farklı RQAM modülasyon seviyeleri için L -kollu MRC alıcılı sistemin Fisher-Snedecor F sönümlü kanallardaki ASER performansı

Modülasyon seviyeleri 4X2, 8X4 ve 16X8 olarak ele alınmış ve her bir seviye için sistemin performansı Şekil 3'te sunulmuştur. Bu şekilden görüldüğü üzere, ele alınan sistemin performansı modülasyon seviyesi arttıkça kötüleşmektedir. Modülasyon seviyesi arttıkça iletilen sembol sayısı da arttığından beklenildiği gibi sistemin hata oranı da artmaktadır. Yine bu şekilden de açık bir biçimde yaklaşık ve tam sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu, asimptotik sonuçların da yüksek SNR bölgesinde çok iyi uyum gösterdiği gözlenmektedir. Bu da önerilen ifadenin doğruluğunu ortaya koymaktadır.

Bu sonuçlara ek olarak, sönümlenme parametresinin (m) L -kollu MRC alıcılı sistemin ASER performansına etkisi $m_s=50$, $L=2$ ve $\beta=1$ durumunda 8X4 RQAM yöntemi kullanılarak Şekil 4'te sunulmuştur. Bu şekildeki sonuçlar m parametresinin değeri 2.5 ve 3.5 şeklinde değiştirilerek elde edilmiştir.



Şekil 4. Farklı sönümlenme parametresi değerleri için 8X4 RQAM kullanan L -kollu MRC alıcılı sistemin Fisher-Snedecor F sönümlü kanallardaki ASER performansı

Sönümlenme parametresinin değerinin artması kanal şartlarının iyileşmesi anlamına geldiğinden beklenildiği gibi en iyi performansın $m=3.5$ durumunda oluştuğu görülmektedir. Şekil 2 ve Şekil 3'te olduğu gibi yine bu şekilde de yaklaşık ve tam sonuçların birbirine oldukça yakın uyum gösterdiği, asimptotik sonuçların ise yüksek SNR bölgesinde oldukça uyumlu olduğu gözlenmektedir.

6 Sonuçlar

Bu çalışmada, L -kollu MRC alıcısına sahip bir kablousuz haberleşme sisteminde RQAM yöntemi kullanıldığı durumda Fisher-Snedecor F sönümlü kanallardaki ASER performansı analiz edilmiştir. Gauss Q fonksiyonunun oldukça iyi bir ekspanansiyel yaklaşıklığı kullanılarak ele alınan sistemin ortalama sembol hata oranı için bir üst sınır ifadesi türetilmiştir. Türetilen bu ifade kullanılarak çeşitli sistem parametre değerleri için performans analizleri sunulmuştur. Buna ek olarak ele alınan sistem için asimptotik ASER ifadesi önerilmiştir. Yapılan analiz sonucunda önerilen ifadeden elde edilen sonuçların tam sonuçlara oldukça yakın olduğu ve iyi bir üst sınır elde edildiği ortaya konulmuştur. Ayrıca asimptotik sonuçların ise yüksek SNR bölgesinde diğer sonuçlar ile çok iyi uyum içinde olduğu gösterilmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %13

Kaynaklar

- [1] M. K. Simon and M-S. Alouini, Digital communication over fading channels, 2nd ed. Hoboken, New Jersey, USA: IEEE: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [2] C. R. C. M. da Silva and M. D. Yacoub, A generalized solution for diversity combining techniques in fading channels, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 50, 46-50, 2002. <https://doi.org/10.1109/22.981244>
- [3] J. Beiranvand and H. Meghdadi, Analytical performance evaluation of MRC receivers in massive MIMO systems, IEEE Access, 6, 53226-53234, 2018. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2866795>
- [4] N. Kapucu, M. Bilim and I. Develi, A comprehensive performance analysis of relay-aided CDMA communications over dissimilar fading channels, AEÜ -International Journal of Electronics and Communications, 83, 339-347, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2017.09.017>
- [5] D. Dixit and P. R. Sahu, Performance of L -branch MRC receiver in η - μ and κ - μ fading channels for QAM signals, IEEE Wireless Communications Letters, 1, 316-319, 2012. <https://doi.org/10.1109/WCL.2012.042512.120240>
- [6] P. Kumar and P. R. Sahu, Analysis of M -PSK with MRC receiver over κ - μ fading channels with outdated CSI, IEEE Wireless Communications Letters, 3, 557-560, 2014. <https://doi.org/10.1109/LWC.2014.2355849>
- [7] A. D. Singh and R. Subadar, Capacity analysis of MRC receiver with adaptive transmitters over TWDP fading channels, 2015 International Symposium on Advanced Computing and Communication (ISACC), pp. 1-5, Silchar, India, Sept. 2015. <https://doi.org/10.1109/ISACC.2015.7377357>
- [8] T. Liu, J. Tong, Q. Guo, J. Xi, Y. Yu and Z. Xiao, On the performance of massive MIMO systems with low-resolution ADCs and MRC receivers over Rician fading channels, IEEE Systems Journal, 2020. (Accepted for publication) <https://doi.org/10.1109/JSYST.2020.3014647>
- [9] S. K. Yoo, S. L. Cotton, P. C. Sofotasios, M. Matthaiou, M. Valkama and G. K. Karagiannidis, The Fisher-Snedecor F distribution: a simple and accurate composite fading model, IEEE Communications Letters, 21, 1661-1664, 2017. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2017.2687438>
- [10] H. Du, J. Zhang, K. P. Peppas, H. Zhao, B. Ai and X. Zhang, On the distribution of the ratio of products of Fisher-Snedecor F random variables and its applications, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 69, 1855-1866, 2020. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2961427>
- [11] N. Kapucu, Error performance of digital modulations over Fisher-Snedecor F fading channels, AEÜ - International Journal of Electronics and Communications, 108, 73-78, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2019.06.005>
- [12] N. Kapucu and M. Bilim, Analysis of analytical capacity for Fisher-Snedecor F fading channels with different transmission schemes, Electronics Letters, 55, 283-285, 2019. <https://doi.org/10.1049/el.2018.7813>
- [13] F. S. Almeahmadi and O. S. Badarneh, On the effective capacity of Fisher-Snedecor F fading channels, Electronics Letters, 54, 1068-1070, 2018. <https://doi.org/10.1049/el.2018.5479>
- [14] S. Chen, J. Zhang, G. K. Karagiannidis and B. Ai, Effective rate of MISO systems over Fisher-Snedecor F fading channels, IEEE Communications Letters, 22, 2619-2622, 2018. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2018.2876426>
- [15] O. S. Badarneh, P. C. Sofotasios, S. Muhaidat, S. L. Cotton and D. B. da Costa, Product and ratio of product of Fisher-Snedecor F variates and their applications to performance evaluations of wireless communication systems. IEEE Access, 8, 215267-215286, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3039680>
- [16] H. Al-Hmood and H. S. Al-Raweshidy, Selection combining scheme over non-identically distributed Fisher-Snedecor F fading channels, IEEE Wireless Communications Letters, 10, 840-843, 2020. <https://doi.org/10.1109/LWC.2020.3046519>
- [17] H. Shankar and A. Kansal, Performance analysis of MRC receiver over Fisher-Snedecor (F) composite fading channels, Wireless Personal Communications, 117, 1337-1359, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11277-020-07925-8>

- [18] O. S. Badarneh, D. B. da Costa, P. C. Sofotasios, S. Muhaidat and S. L. Cotton, On the sum of Fisher-Snedecor F variates and its application to maximal-ratio combining, *IEEE Wireless Communications Letters*, 7, 966-969, 2018. <https://doi.org/10.1109/LWC.2018.2836453>
- [19] R. Singh and M. Rawat, Physical layer security of MRC in Fisher-Snedecor F fading channels, 2019 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS), pp. 1-5, Goa, India, Dec. 2019. <https://doi.org/10.1109/ANTS47819.2019.9118155>
- [20] S. K. Yoo, S. L. Cotton, P. C. Sofotasios, S. Muhaidat and G. K. Karagiannidis, Level crossing rate and average fade duration in F composite fading channels, *IEEE Wireless Communications Letters*, 9, 281-284, 2020. <https://doi.org/10.1109/LWC.2019.2952343>
- [21] P. Zhang, J. Zhang, K. P. Peppas, D. W. K. Ng and B. Ai, Dual-hop relaying communications over Fisher-Snedecor F -fading channels, *IEEE Transactions on Communications*, 68, 2695-2710, 2020. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.2973263>
- [22] H. Du, J. Zhang, J. Cheng and B. Ai, Sum of Fisher-Snedecor F random variables and its applications, *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 1, 342-356, 2020. <https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2020.2982770>
- [23] M. Bilim and N. Kapucu, Average symbol error rate analysis of QAM schemes over millimeter wave fluctuating two-ray fading channels, *IEEE Access*, 7, 105746-105754, 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932147>
- [24] M. Chiani, D. Dardari and M. K. Simon, New exponential bounds and approximations for the computation of error probability in fading channels, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2, 840-845, 2003. <https://doi.org/10.1109/TWC.2003.814350>
- [25] A. P. Prudnikov, Y. A. Brychkov and O. I. Marichev, *Integrals and Series: More Special Functions*, vol. 3. Gordon&Breach Sci. Publ, NY, 1990.
- [26] The Mathematical Functions Site. <http://functions.wolfram.com>, Accessed 27 May 2021.
- [27] I. Gradshteyn and I. Ryzhik, *Table of Integrals, Series and Products*. 6th ed. New York, NY, USA: Academic, 2000.





Process improvement applications for a cargo company

Bir kargo şirketi için süreç iyileştirme çalışmaları

Sevgi Yılmaz¹ , Nazlıcan Arslan² , Murat Oturakcı^{3,*} 

^{1,2,3} Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Industrial Engineering Department, Adana, Turkey

Abstract

In this study, system analysis and improvement applications in a cargo company have been considered and some problems have been detected in the company's current system. In the content of this study, multi-criteria decision-making methods have been implemented to select a vehicle and intra-vehicle shelf type to solve problems about space usage, time losses and package damage due to incorrect vehicle type and absence of intra-vehicle shelf. Besides, to minimize transportation costs which impose significant expenses to the company, the vehicle routing problem is considered with the help of the GAMS (General Algebraic Modelling System) program. In vehicle routing problem, it is aimed at one transfer center to eighteen branches, under the demand, amount of vehicle and capacity of vehicle constraints. While concerning the set of problems that exist in the company's current system, it's attempted to provide a more effective system.

Keywords: System analysis and improvement, Vehicle route problem, GAMS, Multi-criteria decision making

1 Introduction

A System is a general set of parts, components or steps which are connected to form a complex whole. For instance, a business is a system that is made up of methods, routines, procedures; or a computer system that contains processors, memory, power of supply, etc [1].

System Analysis is the process of collecting and evaluating the facts, determining the problems, decomposition to parts of the system to see the parts which cause problems. Another perspective of system analysis is the evaluation of a current system to determine the areas which need improvements. Systems analysis is to understand how the system runs [2].

There are several benefits of system analysis for companies. It helps companies to achieve organizational success for their particular goals; oversee their weaknesses and problems to manage them easily. Also, system analysis help companies to focus their strengths in the process of improvement with an improved quality of products or services [3].

In this study, process improvement applications have been considered and implemented for a specific cargo company. First, the cargo company's current system has been analysed as main and sub-processes. Second, steps that cause inefficiencies and problems were identified and possible improvements were considered. The first problem which

Özet

Bu çalışmada, bir kargo şirketinde sistem analizi ve iyileştirme uygulamaları dikkate alınmış ve şirketin mevcut sisteminde bazı sorunlar tespit edilmiştir. Bu çalışma kapsamında, niteliksiz araç tipi kullanımı ve araç içi raf bulunmamasından kaynaklanan verimsiz alan kullanımı, paketleri araca yükleme ve indirme işlemi sırasında oluşan zaman kayıpları ve paket hasarı gibi problemleri çözmek amacıyla çok kriterli karar verme yöntemleri uygulanarak şirket için en uygun araç ve seçilen araca uygun araç içi raf tipi seçimi hedeflenmiştir. Ayrıca, GAMS programı yardımıyla şirket için büyük maliyet oluşturan dağıtım maliyetini en aza indirmek için araç rotalama problemi ele alınmıştır. Talep, taşıt miktarı ve taşıt kapasite kısıtlarına göre bir transfer merkezinden on sekiz şubeye rotalar yeniden oluşturulmuştur. Şirketin sisteminde mevcut olan sorunlar kümesi ile ilgilenerek, daha etkili bir sistem sağlamaya çalışılmıştır

Anahtar Kelimeler: Sistem analizi ve iyileştirme, Araç rotalama problemi, GAMS, Çok kriterli karar verme

examined in the company's current system is shuttle buses' costs, during transportation from the transfer center to the eighteen branches. The second problem observed in the current system is an absence of an intra-vehicle design which causes significant time loss and damage during the packages to be loaded into the vehicles, stacked in the vehicle and unloaded from the vehicle. Various methods such as Vehicle Routing Problem (VRP), Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods (Analytical Hierarchy Process (AHP), and Technique Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)) have been performed to minimize or eliminate to overcome determined problems to create a more efficient system.

To overcome the shuttle buses' costs problem, the VRP approach was used by General Algebraic Modeling System (GAMS). Also, AHP and TOPSIS methods have been used to solve the absence of intra-vehicle design problems. There have been many studies in the literature on these concepts.

Min (1992) presented various benefits of using the AHP for the software selection decision. It has been attempted to select proper logistics software among four different alternatives with detailed criteria of cost, service and vendor by using the Expert Choice program [4].

To show the performance development of a Business Process Reengineering (BPR) technique in the airline's cargo handling process by quality service and speed, Khan

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: moturakci@atu.edu.tr

Geliş / Received: 09.03.2020 Kabul / Accepted: 05.04.2021 Yayımlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.700962

(2000) studied with an international airport. As a result of redesigning of the cargo handling process with elimination as well as minimization of process wastes (delay, transportation, inspection, rework and storage, etc.), significant developments have been achieved [5].

Al-Harbi et. al. (2001) presents group decision-making using the AHP. The paper has presented the AHP as a decision-making method that allows the consideration of multiple criteria. By applying the AHP, the prequalification criteria can be prioritized, and a list of contractors can be made. So, the best contractors to perform the project selected [6].

Demireli (2010) determined the performance of state-owned commercial banks that operates extensively nationwide by using the TOPSIS method which is one of the multi-criteria decision-making methods. The result of the study was determined that the state-owned commercial banks that operate nationwide are being affected by the local and global financial crisis, the performance scores are continuously fluctuated based on foreign data and there are no superior improvements in this sector [7].

Bhutia and Phipon (2012) performed integrated AHP and TOPSIS approaches to select suppliers by considering the criteria of product quality, service quality, delivery time and price. They analyzed each criterion with AHP and use the obtained weights to the TOPSIS method to prioritize the suppliers [8].

To identify the systemic agents of individual bankruptcies a system analysis was used by Shi et al. (2018). Both macroeconomic factors and micro characteristics are covered. According to this study, macroeconomic factors and micro characteristics are both significant agents of individual bankruptcies. In addition to these agents, uncontrollable factors such as economic, political and social factors are very important as well [9].

Mavhura (2018) used a systems analysis approach to explore ways in which communities in the northern semiarid tropics of Zimbabwe are vulnerable to hydrometeorological threats. The results show that the communities are vulnerable to multiple hydrometeorological threats due to multiple interacting factors [10].

Göçken et.al. (2018), presented Time Window Vehicle Routing Problem (TWVRP). TWVRP is a type of the classic Vehicle Routing Problem (ARP) in which the customers with known demands, a known warehouse and a certain number of identical vehicles having identical capacity and characteristics. To provide service to customers within a certain period, TWVRP aims to minimize the total number of vehicles and vehicles. In addition to a type of genetic algorithm, which is a meta-heuristic method, has been proposed. It was tested whether the use of different heuristic methods to create initial populations in the genetic algorithm affected the desired outcome. The genetic algorithm using the sweeping algorithm gives more effective results [11].

Pisinger and Ropke (2018) presented heuristics based on a large neighborhood search. They used the local search method they term Large Neighbourhood Search (LNS) to solve the Vehicle Routing Problem [12].

Based on the literature, a process improvement is aimed for a cargo company within the scope of this study. In line with this goal, vehicle routing problem application and multi-criteria decision-making techniques were applied on various process steps. A holistic solution approach has been applied to the cargo company's process. Based on business problems, addressing more than one problem with more than one solution technique constitutes the original contribution of this study to both literature and practice.

2 Material and methodology

Under the information and observations from a mid-size cargo company; problems and appropriate improvements in the current system were performed

2.1 Vehicle Routing Problem (VRP)

Route optimization is considered as determining the most cost-effective route for transportation vehicles which attempts to means find the shortest path between two points. In route optimization, the number and location of all stops, departure/arrival time difference and effective loading are included in models.

VRP attempts to design optimal routes from a starting point (depot) to a group of destinations with individual business-specific limitations, such as a limited number of vehicles, cost constraints, time windows, limitations of resources dealing with the loading process at the starting point. The first classic VRP is known as the traveling salesman problem (TSP) and in time it became more complicated [13].

GAMS is a helpful tool for mathematical programming and optimization that is the most productive way of implementing optimization models and decomposition methods for optimization problems [14]. Hence, GAMS is used to attempt to solve the VRP of this study.

Different approaches to VRP have created variations of VRP. The detailed classification of VRP has been illustrated in Table 1.

The objectives for VRP are defined as the minimization of the total path, total travel time, and the number of vehicles. Problem constraints may be as starting the routes from the warehouse and ending at the warehouse, serving each store with one vehicle at a time, or not exceeding the vehicle capacity with the total demand for customers on the same route.

Vehicle Routing Problems Mathematical Model:

The general mathematical expression of vehicle routing problems is specified below:

“Notations:

K = number of vehicles

n = number of customers to which delivery must be made. Customers are indexed from 1 to n and index 0 denotes the central depot.

bk = capacity (weight or volume) of vehicle k .

ai = size of the delivery to customer i .

cij = cost of direct travel from i to customer j .”

Table 1. VRP Classification [15].

“VRP according to number of vehicles”	<ul style="list-style-type: none"> • “Single Vehicle Routing Problem” • “Multiple Vehicle Routing Problem”
“VRP according to number of environments”	<ul style="list-style-type: none"> • “Static Vehicle Routing Problem” • “Dynamic Vehicle Routing Problem”
“VRP according to routes”	<ul style="list-style-type: none"> • “Open-ended Vehicle Routing Problem” • “Close-ended Vehicle Routing Problem”
“VRP according to routing times”	<ul style="list-style-type: none"> • “VRP with unlimited route” • “VRP with limited route”
“VRP according to constraints”	<ul style="list-style-type: none"> • “Capacitated Vehicle Routing Problems” • “VRP with distance constrained” • “VRP with time windows” • “VRP with a different type of customers” • “VRP with the mixed installation”

Variables;

$$y_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{if the order from customer } i \text{ is delivered by vehicle } k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{if vehicle } k \text{ travels directly from branch } i \text{ to branch } j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Min } \sum_{ijk} c_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

$$\sum_i a_i y_{ik} \leq b_k \quad k = 1, K \quad (2)$$

$$\sum_k y_{ik} = \begin{cases} K, & i = 0 \\ 1, & i = 1, \dots, n \end{cases} \quad (3)$$

$$y_{ik} = 0 \text{ or } 1, \quad i = 0, \dots, n \quad k = 1, K \quad (4)$$

$$\sum_i x_{ijk} = y_{jk}, \quad i = 0, \dots, n \quad (5)$$

$$\sum_j x_{ijk} = y_{ik}, \quad i = 0, \dots, n \quad (6)$$

$$\sum_{ij \in S \times S} x_{ijk} \leq |S| - 1 \begin{cases} s \subseteq 1, \dots, n \\ 2 \leq |S| \leq n - 1 \end{cases} \quad (7)$$

$$x_{ijk} = 0 \text{ or } 1, \quad \begin{cases} i = 0, \dots, n \\ j = 0, \dots, n \end{cases} \quad (8)$$

The objective function is defined in Equation (1). Constraints (2) - (4) presents that each route begins and ends at the starting point (customer 0 or depot), that every customer is escorted by a vehicle and the load assigned to a capacitated vehicle. If the y_{ik} is set to satisfy (2) - (4), then for given k , constraints (5) - (8) state a TSP over the customers assigned to vehicle k . In literature, there are several mathematical models based on this generalized model and various constraints are added to solve more complex problems. [16]

2.2 TOPSIS (Technique Order Preference by Similarity to Ideal Solution)

TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) was developed by Yoon and Hwang in 1980 and uses the basic approaches of the ELECTRE method. As a Multi-criteria decision-making method, TOPSIS aims that the chosen alternative is supposed to have the shortest distance from the ideal solution and the furthest distance from the negative ideal solution. [17]

In general, the TOPSIS algorithm starts with forming the decision matrix which represents the satisfaction value of each criterion of individual alternatives. Then, the prepared matrix is normalized and values in the matrix are multiplied with the weight of criteria. The next step includes the calculations of the positive-ideal and negative-ideal solutions with a distance measure. Lastly, the alternatives are prioritized based on their relative closeness to the ideal solution. [18]

2.3 Analytical Hierarchy Process (AHP)

The Analytic Hierarchy Process (AHP) is introduced by Thomas Saaty (1980), is one of the popular MCDM methods to select the best alternatives among the options under certain decision parameters. In the AHP method, the problem and the main aim are defined first. In the second step, main and sub-criteria are formed with alternatives. TO compare alternatives under determined parameters are performed by using a comparison table which is presented in Table 2 [19]. Following the binary comparisons by a responsible, consistency ratio is calculated with the help of consistency index and random index. The consistency ratio is calculated with the help of consistency index and random index by division while the random index is prepared based on the number of criteria (n). The consistency index (CI) is calculated by deducting a number of criteria (n) from the largest eigenvalue of the considered matrix (λ_{max}) and dividing it to $n-1$. The consistency ratio has to be less or equal to ten percent, if contrary, the comparison matrix has to be renewed [19].

Table 2. Pairwise comparison table [19]

Rating	Description
1	“Equal importance”
3	“Moderate importance of one over another”
5	“Strong importance of one over another”
7	“Very strong importance of one over another”
9	“Extreme importance of one over another”
2, 4, 6, 8	“Intermediate values”
Reciprocals	“Reciprocals for inverse comparison”

3 Results and discussions

This part consists of two sections as vehicle route improvement and intra-vehicle storage improvement. The vehicle route problem has been implemented from GAMS to find the optimal route, decrease costs and improve the current system. AHP and TOPSIS have implemented to choose better vehicle types for the company. Also, AHP has implemented to choose an intra-shelf type for the vehicle. This implementation can reduce time loss and damage to packages during the loading, stacking and unloading to vehicles.

3.1 Vehicle route problem

In this study, Vehicle Routing Problem applied to a cargo company for unsatisfying and expensive shuttle bus routing. These buses create expenses for the company. These expenses are aimed to be reduced in this study by decreasing the number of vehicles and creating the shortest and the most effective route for the vehicles with some constraints. The mathematical model used for transportation activity has convenient data for eighteen branches and one transfer centre, shown below.

Parameters:

K : Total vehicle number

N : Total branch number

C_{ij} : Transportation cost from source i to destination j

$M(i)$: Branch demand on i

Indexes:

i : branch point i

j : branch point j

k : vehicle point k

Positive Variable:

T_{ki} : satisfied branch demand on point i

0-1 Variable:

x_{ijk} : if transport k travels from point i to print j , then 1, else 0,

Constraints:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=0}^{18} \sum_{j=0}^{18} \sum_{k=1}^4 C_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{18} T_{ki} \leq 18000 \quad k = \{1,2,3,4\} \quad (2)$$

$$\sum_{i=0, i \neq s}^{18} \sum_{k=1}^4 x_{isk} = \sum_{j=1}^{18} \sum_{k=1}^4 x_{sjk} \quad s = \{1,2, \dots, 18\} \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^{18} x_{0jk} \geq \sum_{i=0}^{18} \sum_{j=1, j \neq i}^{18} x_{ijk} \quad k = \{1,2,3,4\} \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{18} x_{i0k} \geq \sum_{i=0}^{18} \sum_{j=1, j \neq i}^{18} x_{ijk} \quad k = \{1,2,3,4\} \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^4 T_k = M_i \quad i = \{1,2, \dots, 18\} \quad (6)$$

$$\sum_{i=0}^{18} \sum_{j=1, i \neq j}^{18} x_{ijk} \cdot M \geq \sum_{i=1}^{18} T_{ki} \quad k = \{1,2,3,4\} \quad (7)$$

$$x_{ijk} + x_{jik} = 1 \quad (8)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad (9)$$

These formulas indicate that (1) the objective function of this vehicle routing problem is to reach the minimum routing cost. Due to constraint (2), the total capacity of the vehicles should not exceed 17000. Constraint (3) means that the incoming branches should be equal to the outgoing branches since the vehicle does not stay at the stores. According to constraints (4) and (5), the vehicles should start the routes from the transfer center and end the route at the transfer center. Constraint (6) declares that the vehicle fleet should complete the demands of the branches on each route and also the routes should be enough to satisfy the demands as shown in constraint (7). Due to constraint (8), vehicles cannot visit the same branch twice. The last constraint, (9), demonstrates that variable X_{ijk} can take just the 0 or 1 values.

To achieve the optimal solution for the objective function, the GAMS program has been used. In the current system, Ford Master is used in the vehicle fleet and fuel cost is 0.70 ₺ per kilometer. So, the daily fuel cost is 162.8 ₺. According to the GAMS solutions, the daily fuel cost of the suggested vehicle fleet is reduced to 136.76 ₺, which is almost 16% lower than the current fuel cost. The suggested model indicates more efficient vehicle capacity usage, less vehicle amount and effective routes than the current situation.

3.2 Intra vehicle storage

The vehicles which are used for the logistics industry may be in different dimensions and widths. The logistic firms choose the appropriate vehicle for their business according to the differences in vehicles. Especially minibusses and panel vans are used for intercity transportation, but the internal cab width of the vehicles may not be enough all the time according to dimensions or types of load. In case of insufficiency, some firms use in-vehicle shelving systems.

Intra vehicle shelving systems extend the usage of internal cab width by extra shelves, so the load volume may increase. There are many different choices of shelf materials according to the purpose of the load, such as metal, plastic, glass, etc. Also, locked cabinets are used in an in-vehicle shelving system for high-security loads.

Intra vehicle shelving system design depends on the need of area and purpose. Shelves may be small and many for tiny

pieces; big and strong for electronic devices; or if the purpose of the vehicle is transporting pets, the shelves must be strong and also hygienic.

When the company's current system is examined, it is observed that the capacity of the vehicle is not used efficiently during the loading, sorting, and unloading of the packages and this situation causes a lot of time loss. In addition, because there are no shelves inside the vehicle, the packages are randomly put on the floor of the vehicle. Therefore, the packets may damage.

To improve this situation in the system, first of all, AHP and TOPSIS methods were used with four alternatives and four criteria to select a vehicle type.

3.2.1 Selecting the best vehicle using AHP and TOPSIS

According to four alternatives (Ford Transit Van, Renault Master, Vw Crafter Panelvan, Mercedes Sprinter Panelvan) and four criteria (Capacity, Price, Suspension Softness and Fuel Usage) which are important and suitable for cargo vehicle types, AHP and TOPSIS methods are applied and select the best alternative for the company with two different methods. According to the scores and consistency analysis, the consistency ratio is calculated 0.0879 in AHP which reveals that results are consistent. The results are presented in Table 3.

Table 3. AHP and TOPSIS Results for selecting best vehicle

Alternatives	AHP Results	TOPSIS Results
Ford Transit Van	0.310	0.7569
Renault Master	0.151	0.2911
Vw Crafter Panelvan	0.152	0.4666
Mercedes Sprinter Panelvan	0.387	1.0000

According to the application of AHP and TOPSIS results, the result shows Mercedes Sprinter Panelvan is the best alternative for the company since it has the highest weight according to the AHP results. When all alternatives are compared with AHP and TOPSIS approaches, the second-best selection becomes the Ford Transit Van under the criteria of capacity, price, suspension softness and fuel usage. Vw Crafter Panelvan and Renault Master have the lowest weights according to the results.

3.2.2 Selecting the suitable shelf type with AHP

After selecting the best vehicle type for the cargo company, it was decided to choose the shelf type for the selected vehicle type for using more effective the vehicles' storage capacity, reduce the time loss during loading and unloading.

AHP has implemented three alternatives and three criteria for select the most suitable shelf type for the vehicle. The results are presented in Table 4.

According to AHP results, Steel Shelving for Higher Roof Van is the best alternative shelf type for the selected vehicle. Aluminum Shelving for Higher Roof Vans has the second-best weight and Pull Out Shelving for Higher Roof Vans has the last suitable shelf type according to the results. With this

selected shelf type, vehicles' storage capacity can be used more efficiently while reducing the damage and time.

Table 4. AHP Results for selecting suitable shelf type

Alternatives	Scores
Steel Shelving for Higher Roof Vans	0.5425
Aluminum Shelving for Higher Roof Vans	0.3501
Pull Out Shelving for Higher Roof Vans	0.1048

4 Conclusion

In this study, it's aimed to find alternative solutions for the distribution problems of one of the cargo companies in Turkey. The observations are done in Adana branches of the company and two main problems are detected. These are the absence of an intra-vehicle design, and unsatisfying and expensive shuttle bus routing.

One of the problems is that the company does not have a certain intra-vehicle storage design. The absence of intra-vehicle design causes employees' time losses and package damages which is also reflects as customer dissatisfaction. To solve this problem, firstly appropriate vehicle is chosen from four alternatives by AHP and TOPSIS methods. According to capacity, price, suspension softness and fuel usage criteria, the Mercedes Sprinter Panelvan is selected as the most appropriate vehicle for the company. Then, the appropriate intra-vehicle shelving system for the chosen vehicle is selected from three alternatives by using the AHP method. According to price, space usage and durability criteria, it is indicated that the steel shelving system is the most convenient intra-vehicle design for the company.

The company's other problem is determined as the shuttle busses which are sent from the transfer center to branches to collect the packages, which will be transported, create significant expenses to the company. These expenses are aimed to be reduced in this study by decreasing the number of vehicles and creating the shortest and the most effective route for the vehicles. This problem is named as vehicle routing problem (VRP) which is one of the most important topics in the logistics industry.

VRP is used to find an optimal solution for the routes of the vehicle fleets which are transporting goods from a depot to branches with predetermined demands. Various constraints are formed to solve the problem; such as vehicle capacity, starting/ending nodes, and several vehicles. The goal is determined to find the minimum cost for an alternative route of four shuttle buses. The General Algebraic Modeling System (GAMS), which is a high-level modeling system, is used to find an optimal solution for this mathematical problem.

According to the GAMS solutions, the daily fuel cost of the suggested vehicle fleet is reduced to 136.76 ₺ from 162.8 ₺, which is 16% lower from the current fuel cost. The suggested model indicates more efficient vehicle capacity usage, less vehicle amount and effective routes than the current situation. Also, by reducing the number of shuttle busses, the company may cut some additional costs such as maintenance of vehicles, salaries of employees, etc

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 14%

The similarity rate of the article should be declared here.

References

- [1] System, "What is system", <https://searchwindowsserver.techtarget.com/definition/system>, Accessed: 5 March 2020.
- [2] System Analysis and Design, "System Analysis", <https://searchwindowsserver.techtarget.com/definition/system> Accessed: 5 March 2020.
- [3] Benefits of System Analysis, <http://benefitof.net/benefits-of-systems-analysis/>, Accessed: 5 March 2020,
- [4] H. Min, Selection of software: The analytic hierarchy process. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 22(1), 42–52, 1992. <https://doi.org/10.1108/09600039210010388>
- [5] M. R. Khan, Business process reengineering of an air cargo handling process. *International Journal of Production Economics*, 63(1), 99-108, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(99\)00003-1](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(99)00003-1)
- [6] K. M. A.-S. Al-Harbi, Application of the AHP in project management. *International Journal of Project Management*, 19(1), 19–27, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(99\)00038-1](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(99)00038-1)
- [7] E. Demireli, TOPSIS multi-criteria decision-making method: An examination on state owned commercial banks in Turkey. *Journal of Entrepreneurship and Development*, 5(1), 101-112, 2010.
- [8] Bhutia, P. W., & Phipon, R. (2012). Application of AHP and TOPSIS method for supplier selection problem. *IOSR Journal of Engineering*, 2(10), 43-50.
- [9] L. Shi, J. Evans, and Y. Li, A systems analysis of drivers of individual bankruptcies. *Economic Papers: A Journal of Applied Economics and Policy*, 37(4), 390-398, 2018. <https://doi.org/10.1111/1759-3441.12229>
- [10] E. Mavhura, Analysing drivers of vulnerability to flooding: A systems approach. *South African Geographical Journal*, 101(1), 72-90, 2019. <https://doi.org/10.1080/03736245.2018.1541020>
- [11] T. Göçken, M. Yaktubay ve F. Kılıç, Zaman pencereli araç rotalama problemi çözümü için çok amaçlı genetik algoritma yaklaşımı. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6(4), 774-786, 2018. <https://doi.org/10.29109/gujsc.397543>
- [12] D. Pisinger, and S. Ropke, Large neighborhood search. In *Handbook of metaheuristics*. Springer, pp. 399-419 Boston, MA. 2010
- [13] G. Desaulniers, F. Errico, S. Irnich, and M. Schneider, Exact algorithms for electric vehicle-routing problems with time windows. *Operations Research*, 64(6), 1388-1405, 2016. <https://doi.org/10.1287/opre.2016.1535>
- [14] General Algebraic Modeling (GAMS), "Introduction to GAMS", www.gams.com, Accessed: 5 March 2020,
- [15] M. Oturakçı ve I. Uyan, Optimization of a vehicle routing problem in a logistics company in turkey. *Alphanumeric Journal*, 2(2), 13-24, 2014. <https://doi.org/10.17093/aj.2014.2.2.5000084653>
- [16] D. Xu, and R. Xiao, Modelling and intelligent solving of foodstuff distribution VRP based on disruption management. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 44(2), 80, 2012. <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2012.048676>
- [17] G. R. Jahanshahloo, F. Hosseinzadeh Lotfi, and A. R. Davoodi, Extension of TOPSIS for decision-making problems with interval data: Interval efficiency. *Mathematical and Computer Modelling*, 49(5-6), 1137–1142, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2008.07.009>
- [18] R. Ewa, Multi-criteria decision-making models by applying the TOPSIS method to crisp and interval data. *Multiple Criteria Decision Making*, (6), 200-230, 2011. <https://mcdm.ue.katowice.pl/files/mcdm11.pdf#page=200>
- [19] T. L. Saaty, *The analytical hierarchy process, planning, priority. Resource allocation*. RWS publications, USA, 1980.





Analitik hiyerarşi prosesi (AHP) yöntemi ile çalışan performansının değerlendirilmesi

Evaluation of employee performance by the analytical hierarchy process (AHP) method

Emine Elif Nebati^{1*} , Gülser Narin Sağanda² , Hayriye Erol³ , Sümeyye Reyvan Subaşı⁴ ,
Tuğçe Esma Göz⁵ 

^{1,2,3,4,5} İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 34303, İstanbul Türkiye

Özet

Performans değerlendirme, nitel ve nicel kriterleri bir arada değerlendirebilen, işletmelerin daha etkin ve verimli karar vermesine katkı sağlayan önemli bir süreçtir. Aynı zamanda, işletmelerin rekabette güçlü kalabilmeleri açısından önem arz etmekle birlikte hedeflerine ulaşma doğrultusunda çalışanların değerlendirilmesi ve performanslarını artıracak çalışmalarda bulunmasına yardımcı olmaktadır. Bu çalışmada amacımız, İstanbul ilinde toplu ulaşım sisteminde önemli yere sahip olan bir kurumdaki, İnsan Kaynakları departmanına bağlı olan Strateji İzleme birimi ve Eğitim Müdürlüğü biriminde ortak olarak belirlenen 3 görevli memurun performanslarını değerlendirmek ve gösterdikleri performansa neden olan kriterleri belirlemektir. Çalışmamızda Çok Kriterli Karar Verme yöntemlerinden AHP yöntemi kullanılmıştır. Belirlenen kriterler ve analiz ile basit, anlaşılır bir yol göstererek, uygulamalı bir yazılım programı kullanılması ile birlikte bu alanda çalışmalara bir yol gösterici niteliğindedir.

Anahtar kelimeler: Performans değerlendirme, Personel seçimi, Çok kriterli karar verme yöntemleri, AHP

1 Giriş

İşletmeler çalışan performansının değerlendirilmesinde daha etkin ve verimli karar verme süreçleri geliştirmesinde ve rekabette güçlü kalabilmeleri açısından önemi ile birlikte hedeflerine ulaşmak için çalışanların değerlendirilmesi ve performanslarının artırılmasına yönelik çalışmalar yapmaktadırlar. Çalışan performansının değerlendirilmesinde birçok nicel ve nitel faktör olduğu için bu çalışmada Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinden performans değerlendirme yöntemleri içerisinde birçok kurumda tercih edilen Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemi kullanılmıştır. Kriterler ve alternatifler belirlenerek hiyerarşik yapı oluşmuştur. Çalışmada, İstanbul ilinde toplu ulaşım sisteminde önemli yere sahip olan bir kurumdaki, İnsan Kaynakları departmanına bağlı olan Strateji İzleme ve Eğitim

Abstract

Performance evaluation is an important process that can evaluate qualitative and quantitative criteria together and contribute to more effective and efficient decision-making of enterprises. At the same time, although it is important for businesses to remain strong in competition, it helps employees to evaluate and increase their performance in order to achieve their goals. Our aim in this study is to evaluate the performances of 3 civil servants who are determined jointly by the Strategy Monitoring Unit and Training Directorate, which are affiliated to the Human Resources department in an institution that has an important place in the public transportation system in Istanbul, and to determine the criteria that cause their performance. AHP method, one of the Multi Criteria Decision Making methods, was used in our study. It is a guide to the studies in this field by showing a simple, understandable way with the determined criteria and analysis, using an applied software program.

Keywords: Performance management, Personnel selection, Multi-Criteria decision making, Analytical hierarchy process

Müdürlüğü birimleri için, çalışan performansını etkileyen 5 ana kriter ve her bir ana kritere ait 3'er alt kriterle birlikte 15 alt kriter olmak üzere toplamda 20 kriter ve alternatifler olarak da her iki birim için ortak olarak belirlenen 3 görevli memur belirlenmiştir.

Çalışan performansını değerlendirirken kriterlerin ne derece öneme sahip olduğunu ve alternatif 3 çalışanın performansının kriterler açısından değerlendirmek için iki birimde yer alan 6 kişiye yapılan anketlerden elde edilen değerler, çok kriterli karar verme yöntemine dayalı olarak çalışan bir karar verme yazılımı olan Superdecision programına aktarılmıştır. Yapılan çalışmayla birlikte, ortak olarak belirlenen bu 3 çalışanın mevcut durumlarının değerlendirilmesi ve bu değerlendirmeler sonucu göstermiş oldukları performansa sebebiyet veren kriterlerin önem

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: emine.nebati@izu.edu.tr (E. E. Nebati)

Geliş / Received: 04.09.2020 Kabul / Accepted: 09.04.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.790551

ağırlıklarının belirlenmesinden sonra çalışanlar için iyileştirici çözüm önerilerinin sunulması hedeflenmektedir

2 Literatür özeti

Kamu sektöründe ve çeşitli sektörlerde Performans Ölçümü çalışmaları bulunmaktadır. Ulusal ve uluslararası yazında, AHP yöntemi ile ilgili birçok çalışma incelenmiş ve bu bölümde söz konusu literatür çalışmasının bir özetine yer verilmiştir.

Yaraloğlu, 2001 yılında tahminleme ve karar verme amacıyla kullanılan AHP tekniğini, performans değerlendirme amacıyla yeniden gözden geçirmiş ve model bir örnek üzerine çalışmıştır [1].

Eraslan ve ark. 2005 yılında insan kaynakları uygulamalarından olan performans değerlendirme sistemine katkıda bulunmak amacıyla değerlendirme yöntemlerinde değişikliğe gitmek için AHP yöntemini önermiştir [2].

Güney ve ark. 2010 yılında insan performansı değerlendirmede yapılan hataları azaltmak amacıyla AHP kullanımını önermiştir. Büyük organizasyonlarda performans değerlendirme aşamalarında bazı zamanlar olumsuzluklar yaşanabilmekte bu olumsuzlukları en azaltmak amacıyla AHP kullanımını önerilmiştir [3].

Akkaya, 2010 yılında hazırladığı çalışmada personel seçimi aşamasında AHP kullanımını hakkında bilgi vermiştir. Personel seçiminde, karar vericilerin öznel yargılarını en azaltmak amacıyla karşılaştırmalı matrisler oluşturmayı ve seçeneklerin ağırlıklarını belirlemeyi hedeflemiştir [4].

Uçkun ve ark. 2011 yılında ülkemizde bulunan kamu ve özel bankaların finansal performanslarını gri ilişki analizi ile inceleyerek finansal oranları gruplar içinde sıralamıştır [5].

Kır ve ark. 2012 yılında 360 derece performans değerlendirme sistemini AHP tekniği ile birleştirerek bir performans değerlendirme sistemi oluşturmuş ve bunu özel bir dershanede öğretmenler üzerinde uygulamıştır [6].

Çelikkın ve ark. 2013 yılında performans ölçütlerini öncelendirmek amacıyla bir işletmede orta ve üst kademe yöneticiler üzerinde likert ölçeği kullanılan bir soru formu vasıtasıyla Balanced Scorecard yöntemini AHP ile önceliklendirerek kriterleri değerlendirmişlerdir [7].

Özgür ve ark. 2014 yılında Ankara'da faaliyet gösteren 26 kamu hastanesinin göreceli etkinliklerini ölçerek etkin olup olmama konularını araştırmışlardır ve yöntem olarak VZA ve AHP'den faydalanmışlardır. 26 hastanenin değerlendirildiği bu çalışmada, hastanelerin sağlık hizmeti ortaya çıkarmak amacıyla kullandığı 4 girdi ile ürettiği 5 çıktı belirlemiş ve bunlarla iki farklı VZA modeli ile çalışılmıştır [8].

Karaatlı ve ark. 2014 yılında hazırladıkları bir başka çalışmalarında ise ülkemizde 2012 -2013 sezonu Süper Lig'de futbolcuların performanslarını değerlendirmişlerdir. Bunu yaparken ÇKKV yöntemlerinden AHP ile kriterlerin ağırlıklarını belirlemiş ve elde edilen ağırlıkları önce TOPSIS ve daha sonra VIKOR yönteminde kullanarak futbolcuların performansları değerlendirilmiştir [9].

Özyörük ve ark. 2014 yılında üç farklı lojistik firması performanslarını değerlendirmeleri için dengelenmiş skor kart yöntemi ve AHP'den faydalanılmıştır. Hazırlanan çalışma ile hem şirketlerin kendi bünyesinde performans

ölçümü yapılabilmesi hem de şirketler arası karşılaştırma hedeflenmiştir [10].

Karaatlı 2015 yılında savunma sanayinde bulunan bir kurum için ÇKKV yöntemlerinden AHP ve COPRAS yöntemlerini karşılaştırmalı olarak uygulamış ve yıllık performanslarını hesaplamışlardır. 2008 ve 2012 yıllarına ait veriler arasından; satış miktarı, üretim miktarı ve stok miktarı gibi verileri değerlendirme kriteri olarak belirlemiştir. Çalışma sonunda ise şirketin en iyi performansa 2012 yılında ulaştığı görülmüştür [11].

Uludağ ve ark. 2016 yılında 4 farklı cep telefonu markasının tercih edilme sebeplerini araştırmak amacıyla ÇKKV yöntemlerine başvurmuş ve hizmet kalitelerini karşılaştırırken AHP'ye ek olarak TOPSIS ve VIKOR'dan faydalanılmıştır. Birçok yöntemin bir arada kullanıldığı bu çalışmada amaç Bulanık AHP yönteminin AHP yöntemine oranla nispeten çözüm sürecini kolaylaştırdığını gösterilebilir [12].

Çalışkan ve ark. 2016 yılında bankacılık sektöründe kaynakların kullanımı hakkında bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. AHP ve PROMETHEE yöntemlerinden faydalanarak 2010- 2014 yıllarına ait finansal performanslarını kıyaslamışlardır. 2 uygulamadan oluşan çalışmanın ilk kısmında kriterlerin ağırlıkları eşit kabul edilmiş ve ikinci uygulamada ise AHP yöntemi ile bulunmuş ve bankaların performansı PROMETHEE yöntemi ile değerlendirilmiştir [13].

Deveci ve ark. 2016 yılında İETT ile toplu taşıma ücretlerinin belirlenmesi ve kullanıcı memnuniyetinin sağlanması için AHP yöntemi ile optimum transit ücreti analiz etmeyi amaçlamıştır [14].

Kaynarca ve ark. 2017 yılında İETT'nin hizmet verdiği temas noktalarında hizmet kalitesini ölçmek ve müşteri memnuniyetini denetlemek amacıyla AHP yönteminden faydalanılmıştır. 2012 yılında İETT tarafından oluşturulan Hizmet Kalitesi Ölçüm Modeli müşteriyi sekiz temas noktasını inceler. AHP bu temas noktalarındaki ana kriterlerin ve alt kriterlerin ağırlığını belirler [15].

Aydın ve ark. 2017 yılında savunma sanayiinde AHP ve TOPSIS ile önemli bir parça olan gövde parçası alımında en iyi tedarikçi seçimi yapmıştır [16].

Gümüş ve ark. 2018 yılında AHP ile Coğrafi Bilgi Sistemlerinden faydalanıp Niğde'de en uygun AVM yerinin belirlenmesi için çalışma yapmışlardır. [17]

Kuşakçı ve ark. 2018 yılında personel seçiminin objektif bir şekilde yapılması için bulanık MULTIMOORA yöntemini kullanmışlardır. Havacılık sektörünün önde gelen bir firmasında, çeşitli departmanlar için çalışanlarda aranılan yetkinliklerin dikkate alınmasıyla birlikte çalışan seçimi çalışması yapılmıştır. [18]

Literatür çalışmalarının tamamı incelendiğinde ÇKKV yöntemlerinden AHP yönteminin en yaygın kullanıma sahip yöntemlerden biri olduğu görülmektedir. Bununla birlikte performans ölçümünde öznelliği azaltmak için kimi zaman AHP yöntemine başvurulduğu gözlemlenmektedir. Bu çalışmanın özelliği ise uygulamanın yapılacağı kurumda yapılan performans ölçümlerinde ilk defa AHP yönteminden faydalanılmış olmasıdır.

3 Performans analizi

Organizasyonlar günümüzde önemli yerlere gelebilmek ve devamlılıklarını sürdürebilmek için doğru bir şekilde yönetilmeleri gerekir. Organizasyonların büyük rekabet oluşları içerisinde olmalarını sürdürebilmeleri çalışanlarının performanslarıyla ilişkilidir. Buradan performans kavramının tanımından yola çıkarak, performans başarısının göstergesi, bir eylem için gösterilen uğraş olarak tanımlanmaktadır. Şartların belirlenmesiyle bir görevin yapılma seviyesi veya çalışanın işe karşı göstermiş olduğu davranış biçimine performans denir [19].

Performans belirlenen amaca ulaşmanın seviyesidir. Performans seviyesini belirleyebilmede yapılan çalışmanın sonucunun değerlendirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Performans değerlendirme, bir şirketin insan kaynakları departmanının en gerekli görevleri arasında yer alır. Performans değerlendirme, yönetici tarafından önceden belirlenmiş olan standartlarla kıyaslama ve ölçme gibi yöntemlerle çalışanların içindeki performansının değerlendirilmesi sürecidir [19].

Performans değerlendirmede, teknolojiye, piyasa ve yönetimlerdeki değişimlerle birlikte performans ölçümünde kullanılan metotlarda değişime uğramıştır. Günümüzde bireysel performansın değerlendirilmesinden kurumsal performansın değerlendirilmesine geçerken çeşitli performans değerlendirme metotları bulunmaktadır. Belirlenen hedeflere göre şirketler bu metotlardan birini veya birkaçını birlikte kullanmaktadırlar. Performans değerlendirme yöntemlerinden bazıları: [19]

- Kurumsal Performans Karnesi
- Kişiler Arası Karşılaştırmalara Dayalı Yaklaşım
- İkili Karşılaştırma Yöntemi
- Bireysel Performans Standartlarına Dayalı Yaklaşım
- Geleneksel Değerlendirme Skalaları
- 360 Derece Performans Değerlendirme Yöntemi

4 Yöntem

Analitik Hiyerarşi Prosesi, Çok Kriterli Karar Verme Problemlerinde çokça rastlanan karar verme yöntemlerden biri olarak yaygın bir kullanıma sahiptir. Çok sayıda alternatif içerisinde seçim yapılmasında faydalanılan ve birçok karar vericinin süreç içerisinde yer alabildiği nitel ve nicel kriterlerin bir bütün olarak hiyerarşik bir yapı üzerinden işlenmesi ile hedefe varabilme yeteneğine sahip karar verme yöntemidir [20].

AHP uygulamalarında ilk adım karar vericinin amacı doğrultusunda bir karar problemi belirlemesidir. Bu probleme ait ana kriterler, alt kriterler ve karar alternatifleri belirlenerek hiyerarşik bir yapı oluşturulmaktadır. Öğeler içerisinde ikili karşılaştırmalar yapılarak karşılaştırma matrisleri elde edilir bu karşılaştırma matrisleri iki faktörün kıyaslanması demektir ve karar vericinin kişisel görüşüne bağlıdır. Daha sonra her bir kriterin önem dereceleri tespit edilmektedir. Uygulamanın son aşamasında ise tüm kriterler

değerlendirilir ve en uygun karar alternatifi tespit edilmiş olur [20].

4.1 AHP uygulama adımları

Aşama 1: Modelin Oluşturulması:

AHP yöntemiyle karar verme sürecinde ilk olarak tüm nicel ve nitel faktörler anket çalışmalarıyla veya ilgili konuda uzman kişilerin görüşlerine başvurularak belirlenmektedir. Daha sonra elde edilen veriler ile amaç, kriterler, alt kriterler ve son olarak alternatifler belirlenerek hiyerarşik bir yapı oluşturulmaktadır.

Aşama 2: İkili Kıyaslama Matrisinin Oluşturulması:

Hiyerarşik yapı hazırlandıktan sonra Tablo 1'deki ikili karşılaştırmalar ölçeği kullanılarak bilgiler toplanmakta ve ikili karşılaştırmalar matrisi elde edilmektedir.

Tablo 1. İkili kıyaslamalarda kullanılan önem dereceleri tablosu [21]

Derecesi	Değer Tanımları	Açıklama
1	Eşit Önemli	Her iki faaliyet amaca eşit katkıda bulunur.
3	Orta Önemli (Az Üstünlük)	Tecrübe ve değerlendirmeler sonucunda bir faaliyet diğerine göre biraz daha tercih edilir.
5	Güçlü Önemde (Fazla Üstünlük)	Tecrübe ve değerlendirmeler sonucunda diğerine göre çok daha tercih edilir.
6	Çok Güçlü Önemde (Çok Üstünlük)	Bir faaliyet diğerine göre çok güçlü şekilde tercih edilir.
9	Son Derece Önemli (Kesin Üstünlük)	Bir faaliyet diğerine göre mümkün olan en yüksek derecede tercih edilir.
2,4,6,8	Ara Değerler (Uzlaşma Değerleri)	Bir değerlendirmeyi yapmakta sözcük yetersiz kalıyorsa, sayısal değerlerin ortasındaki bir değer verilir.

Aşama 3: Kriterlerin Ağırlıkları ve Alternatiflerin Puanlarının Belirlenmesi:

İkili karşılaştırma matrislerinden faydalanarak her karar alternatifinin ağırlığı hesaplanmaktadır. Bu doğrultuda, ikili karşılaştırma matrisindeki her bir sütun değeri, bulunduğu sütun toplamına bölünerek matris normalleştirilmektedir. Normalleştirilmiş matristeki her sütunun toplam değeri 1 olmaktadır. Son olarak satırda yer alan değerlerin ortalamaları bulunarak öz vektörler elde edilmektedir.

Aşama 4: Tutarlılık Oranının Hesaplanması:

Tutarlılık oranını (CI) hesaplamak için aşağıdaki formüller kullanılabilir.

$$\begin{aligned} \text{Tutarlılık İndeksi (Consistency Index - CI)} \\ &= (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)y \quad (1) \\ &= mx + n \end{aligned}$$

Formülde CI, Tutarlılık İndeksini, λ_{max} matristeki en büyük öz değeri, n ise her bir matrisin eleman sayısını göstermektedir.

Tutarlılık oranı (CR) ise tutarlılık indeksinin aynı boyuttaki matrise karşılık gelen rastgele indekse (RI) oranlanmasıyla elde edilir;

$$CR=CI/RI \quad (2)$$

Tablo 2. Rassal indeks serisi [22]

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

Tutarlılık oranı 0.10'den küçük ise matrisin tutarlı yani karar vericilerin yargılarının tutarlı olduğu kabul edilir. [23]

5 Uygulama

Yapılan performans değerlendirme çalışması çoklu karar verme problemi olduğu için çok kriterli karar verme yöntemlerinden AHP yöntemi tercih edilmiştir. Çalışan performansının değerlendirilmesi için 5 ana kriter ve 15 alt kriterin tanımlanmasıyla birlikte toplamda 20 kriter belirlenmiştir. Kriterler için kurumun çalışanlar için belirlenmiş olan yetkinlikler de göz önünde bulundurularak kriterler oluşturulmuştur. Belirlenen ana ve alt kriterlerden sonra Strateji İzleme birimi ve Eğitim Müdürlüğü biriminde görevli 3 çalışan alternatif olarak belirlenmiştir. Yapılan değerlendirmeler öncesinde iki birim içinde kriterlerin ve alt kriterlerin önem derecesini belirlemek adına her iki birimden 6 kişiye uygulanmıştır. Yapılan anketlerde, ana ve alt kriterlerin değerlendirilmesi sonucunda, geometrik ortalamalar alınmış ve tek bir sonuç Super Decision programına girilerek veriler elde edilmiştir.

1. Amaç Belirleme: Ele alınan amaç, kurumun Strateji İzleme ve Eğitim Müdürlüğü birimlerinde çalışanların performansına etki eden faktörleri belirlemek ve mevcut alternatif olarak belirlenen 3 çalışan arasından en iyi performansı göstereni belirlemektir.

2 Ana ve Alt Kriterlerin Belirlenmesi: Çalışan performansının değerlendirilmesinde ana ve alt kriterlerin araştırırken birimlerden alınan bilgilerle ve ilgili literatür araştırmalarından faydalanılarak ana ve alt kriterler belirlenmiştir.

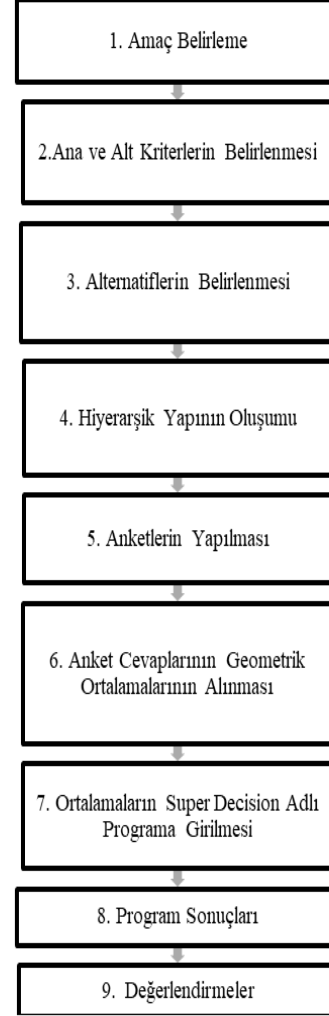
3. Alternatiflerin Belirlenmesi: Değerlendirilecek alternatifler, Strateji İzleme birimi ve Eğitim Müdürlüğü'nün ortak olarak belirlediği 3 çalışandır.

4. Hiyerarşik Yapının Oluşumu: Belirlemiş olduğumuz 5 ana kriter ve 15 alt kriter ile birlikte toplamda 20 kriter belirlenmiştir. Oluşan hiyerarşik yapı Şekil 2'dedir.

5. Anketlerin Yapılması: Anket yapılmasındaki amaç, her bir ana ve alt kriterin ikili kıyaslamalarını yapmak ve önem derecelerini belirlemektir. Anketler Strateji İzleme ve Eğitim Müdürlüğü'nde yer alan müdür, şef ve bir çalışan olmak üzere 6 kişiye sunulmuştur.

6. Anket Cevaplarının Geometrik Ortalamalarının Alınması: Yapılan anketler sonucu, iki birimde de her bir ikili kıyaslama için müdür, şef ve çalışan verdiği cevapların geometrik ortalaması alınmıştır.

7. Geometrik Ortalamaların Superdecision Adlı Programa Girilmesi: Anketlerde verilen cevaplar 1-9 arası puanlama olarak, AHP metodunda yer alan kriter önem dereceleridir ve her bir kriter için tüm uzmanların verdiği puanların, geometrik ortalamaları alınarak, Superdecision adlı programda girilmiştir.



Şekil 1. Performans değerlendirmesinde izlenen adımlar

8. Program Sonuçları: Ortalamaların programa girilmesiyle birlikte her bir kriter için tutarlılık oranına bakılır. Tutarlılık oranı 0.1'den küçük olmalıdır.

9. Değerlendirme: Çıkan sonuçlara göre hangi ana kriterin, alt kriterin en önemli kriter olduğu, hangi alternatifin en iyi performans gösterdiği belirlenmektedir.

5.1 Seçim kriterlerinin belirlenmesi

Seçim kriterlerinin belirlenmesi için, kurumun daha önceden personeller için yapmış olduğu performans değerlendirme çalışmalarından faydalanılarak, çalışanlarının sahip olması gerekli temel yetkinliklerin neler olduğuna dair bazı ön bilgiler elde edilmiştir. Temel yetkinliklerden bazıları aşağıda belirtilmiştir:

- Stratejik Bakış Açısı
- Müşteri Odaklılık

- Mesleki Uzmanlık
- Takım Ruhu ve Dayanışma
- Analitik Düşünme

Yukarıda belirtilen bazı temel yetkinlikler hakkında araştırmalar yapılmıştır. Çalışan performansını değerlendirirken ne gibi faktörlerin, yetkinliklerin ve etkenlerin yardımcı olacağına dair araştırmalar dışında beyin fırtınası eşliğinde çalışmamız için seçim kriterleri belirlenmiştir. Belirlenen kriterler tanımlarıyla birlikte yer almaktadır (Tablo 3).

Tablo 3. Belirlenen ana kriterler, alt kriterleri ve tanımları

Ana ve Alt Kriterler	
Güvenilirlik	Verilen görevleri yerine getirirken iş ahlak ve ilkelerine uygun hareket edilmesi.
Dürüst ve Samimi Olabilme	Doğruların ifade edilip gerçekçi davranış sergilenmesi.
Dikkatli ve Hatasız Çalışabilme	Bir görev yerine getirirken bulunulan bölümün her detayının görülüp, incelenmesi, iş ve iş ile ilgili bilgilerin sürekli takip edilerek kaynakların ve zamanın etkili kullanılabilmesi için planlama yapılması.
Etik Kurallara Uyma	Misyon ve vizyona uygun davranılması.
Analitik Düşünme	Problemin önceliklendirilerek ve neden-sonuç ilişkisi kurularak yorumlanması.
Neden-Sonuç İlişkisi Kurabilme	Olaylarda sonuçların bağlantılı olduğu sebeplerin bulunması.
Problemleri Net Yorumlayabilme	Karşılaşılan sorunların kısa ve öz yorumlanması.
Önceliklendirme Yapabilme	Yapılacak işlerin sıralamasının yapılarak öne alınacak işlerin seçilmesi.
Etkili İletişim	Kurum içi ve kurum dışı etkili ilişkiler geliştirilerek karşılarındakilere üstün iletişim becerileri sergilenmesi.
Uygun Ses Tonu ve Vücut Dili	Kişinin ideal ses tonunu ve beden dilini sergilemesi.
Empati Kurabilme	Kendisini karşılarındaki insanın yerine koyması.
Özgüven	Çalışanın kendini ifade ederken kendisinin bulunduğu güven duygusunu karşılarındakine hissettirmesi.
Sonuç Odaklılık	Verilen görev sırasında istenilen sonuçlara ulaşılmasına odaklanılması.
İş Bitiricilik	Ulaşılmak istenen hedefe varılarak işin tamamlanması ve sonuçla ilgilenilmesi.
İnisiyatif Alma	Sorumlu olunan iş yerine getirilirken işin kalitesinin artırılması, kendisinden beklenilmeyen işler için kendi sorumluluk alanını aşmayarak aksiyon alınması.
Takım Ruhu ve Dayanışma	Takım çalışmasında takım arkadaşlarıyla dayanışma içerisinde ortak hedefe yönelmesi.
Yardımsızlık	Takım arkadaşlarına yardım etmekten kaçınmaması.
Sorumluluk Sahibi Olması	Görevlerinin farkında olup yerine getirilmesi.
Uyumluluk	Çalışma arkadaşları ile uyum içerisinde çalışılması.

5.2 Hiyerarşik yapının oluşturulması

Çalışmada 5 ana kriter, 15 alt kriter ve 3 alternatifin belirlenmesiyle oluşan hiyerarşik yapı Şekil 2’de yer almaktadır.

5.3 İkili karşılaştırmaların yapılması

Kriterlerin çalışan performansında etkisini gözlemlemek için kurumun Strateji İzleme birimi ve Eğitim birimine ait müdür, şef ve bir adet çalışan olmak üzere iki birim için toplam altı personele kriterleri ikili olarak kıyaslamak için anket uygulanmıştır. Yapılan bu anketlerden sonra bu iki birimin de ortak olarak seçtiği 3 çalışan alternatif olarak bu kriterler bazında değerlendirilmiştir.

Çalışmada yer alan anket kısmında amacımız her bir ana ve alt kriterin ikili kıyaslamalarını yapmak ve önem derecelerini belirlemektir. Anketlerde yer alan 1-9 arası değerlendirme AHP yönteminde yer alan kriter önem dereceleridir. İkili kıyaslamaların yapılması sırasında hangi kriterin çalışan performansında daha önemli olduğu ve Saaty’nin önem skalası kullanılarak seçilmiştir (Tablo 1). Yapılan değerlendirmeler sonrasında elde edilen değerlerin geometrik ortalaması alınır ve Superdecision adlı programda değerler girilir (Şekil 4). İkinci adımda, “Inconsistency” yani tutarlılık oranının verildiği kısma bakılır. Tutarlılık oranının 0.1’den küçük olması gerekmektedir. Çalışmamızda her biri için tutarlılık oranları 0.1’den küçük çıkmıştır ve tutarlıdır. Karşılaştırmaların tutarlı çıkmasından sonra kriterlerin öncelik değerleri elde edilmiştir.

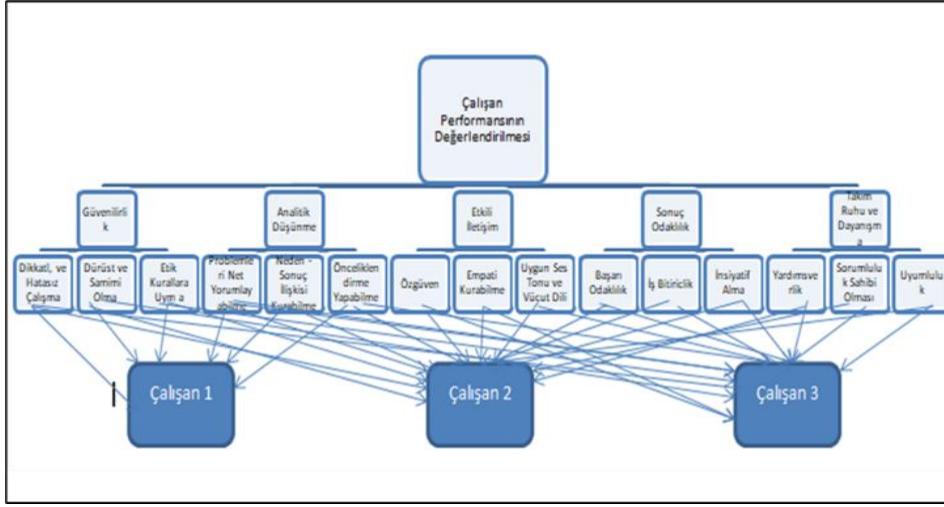
5.4 Strateji izleme birimi sonuçları

Strateji İzleme birimi için kriter öncelik ağırlıklarını değerlendirdiğimizde (Tablo 4 ve 5), ana kriterler için yapılan değerlendirmede (güvenilirlik, analitik düşünme, etkili iletişim, sonuç odaklılık, takım ruhu ve dayanışma) kendi aralarında eşit önem derecesine (% 6.66) sahiptirler. Alt kriterler için bakıldığı zaman %4.6 ile “empati kurabilme” en önemli alt kriter olup, %0.41 ile “etik kurallara uyma” ise en az önemli alt kriter olarak görülmektedir.

Tablo 4. Strateji İzleme birimine ait ana kriterlerin anket sonuçları

Ana Kriter Adları	Öncelik Ağırlıkları
Analitik Düşünme	0.066667
Etkili İletişim	0.066667
Güvenilirlik	0.066667
Sonuç Odaklılık	0.066667
Takım Ruhu ve Dayanışma	0.066667

Tablo 6’da yer alan alternatifler için yapılan değerlendirmede “Çalışan 3” (%18.15) en iyi performansa sahip olarak çıkmıştır. Bunun sebebi “Empati kurabilme” alt kriterine oldukça fazla sahip olmasıdır. “Çalışan 2” (%6.84) en kötü performansa sahip alternatif olarak çıkmıştır. Bunun sebebi ise “Etik kurallara uyma” kriterine az seviyede sahip olmasıdır.



Şekil 2. Problemin hiyerarşik yapısı

9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Şekil 3. Ana kriterlerin ikili kıyaslamasının yapıldığı anket örneği

Şekil 4. Programda yer alan ikili karşılaştırma örneği

Tablo 5. Strateji İzleme birimine ait alt kriterlerin anket sonuçları

Alt Kriter Adları	Öncelik Ağırlıkları
Neden Sonuç İlişkisi Kurabilme	0.008436
Problemleri Net Yorumlayabilme	0.012432
Önceliklendirme Yapabilme	0.045799
Empati Kurabilme	0.046064
Uygun Ses Tonu ve Vücut Dili	0.006093
Özgüven	0.014509
Dikkatli ve Hatasız Çalışabilme	0.019005
Dürüst ve Samimi Olabilme	0.043511
Etik Kurallara Uyma	0.004151
Başarı Odaklılık	0.012267
İnsiyatif Alma	0.015455
İş Bitiricilik	0.038945
Sorumluluk Sahibi Olması	0.018646
Uyumluluk	0.04178
Yardımcı Olma	0.006241

Tablo 6. Strateji izleme birimi alternatiflere ait anket sonuçları

Alternatifler	Öncelik Ağırlıkları
Çalışan1	0.083284
Çalışan2	0.06846
Çalışan3	0.181589

Tablo 6'da yer alan alternatifler için yapılan değerlendirmede "Çalışan 3" (%18.15) en iyi performansa sahip olarak çıkmıştır. Bunun sebebi "Empati kurabilme" alt kriterine oldukça fazla sahip olmasıdır. "Çalışan 2" (%6.84) en kötü performansa sahip alternatif olarak çıkmıştır. Bunun sebebi ise "Etik kurallara uyma" kriterine az seviyede sahip olmasıdır.

5.5 Eğitim müdürlüğü sonuçları

Eğitim Müdürlüğü birimi için kriter öncelik ağırlıklarını değerlendirdiğimizde, Tablo 7 ve 8'de yer alan sonuçlarda ana kriterler için yapılan değerlendirmelerde eşit önem derecelerine (%6.66) sahip oldukları ortaya çıkmıştır. Alt kriterler için yapılan değerlendirmeler sonucunda "Empati kurabilme" ve "Etik kurallara uyabilme" (% 4.178) en önemli alt kriterler olarak çıkarken, "Uygun ses tonu ve vücut dili" ve "Dürüst ve samimi olma" (% 0.6241) alt kriterleri ise en az öneme sahip olarak çıkmışlardır.

Tablo 7. Eğitim Müdürlüğü'ne ait alt kriterlerin anket sonuçları

Ana Kriter Adları	Öncelik Ağırlıkları
Analitik Düşünme	0.66667
Etkili İletişim	0.66667
Güvenilirlik	0.66667
Sonuç Odaklılık	0.66667
Takım Ruhu ve Dayanışma	0.66667

Tablo 8. Eğitim Müdürlüğü'ne ait alt kriterlerin anket sonuçları

Alt Kriter Adları	Öncelik Ağırlıkları
Neden Sonuç İlişkisi Kurabilme	0.017891
Problemleri Net Yorumlayabilme	0.040961
Önceliklendirme Yapabilme	0.007815
Empati Kurabilme	0.04178
Uygun Ses Tonu ve Vücut Dili	0.006241
Özgüven	0.018646
Dikkatli ve Hatasız Çalışabilme	0.018646
Dürüst ve Samimi Olabilme	0.006241
Etik Kurallara Uyma	0.04178
Başarı Odaklılık	0.02297
İnsiyatif Alma	0.007235
İş Bitiricilik	0.036462
Sorumluluk Sahibi Olması	0.040961
Uyumluluk	0.017891
Yardımsızlık	0.007815

Tablo 9. Eğitim Müdürlüğü alternatiflere ait anket sonuçları

Alternatifler	Öncelik Ağırlıkları
Çalışan1	0.135306
Çalışan2	0.108482
Çalışan3	0.089545

Tablo 9'da yer alan sonuçlara bakıldığında zaman en iyi performansa sahip alternatif "Çalışan 1" (%13.53) olup, bu duruma sebep ise "Empati kurabilme" ve "Etik kurallara uyabilme" alt kriterlerine iyi derecede sahip olmasıdır. "Çalışan 3" (%8.954) ise en kötü performansa sahip alternatif olarak çıkmıştır. Bunun sebebi ise "Uygun ses tonu ve vücut dili" ve "Dürüst ve samimi olma" alt kriterlerine az derecede sahip olmasıdır. Eğitim Müdürlüğü için Çalışan1'in performansı en iyidir.

6 Sonuç

Çalışma koşullarının günümüz koşullarında yaşadığı değişikliklerle birlikte rekabetin artması, nitelikli çalışan sayısının artması gibi nedenlerden kaynaklı olarak çalışan performansının değerlendirilmesi kurumlar, işletmeler, örgütler adına büyük önem taşımaktadır. Çalışanın işinde nasıl ve ne derecede başarılı olduğunu belirleyebilmek adına işletmeler ve kurumlar çalışan performansının değerlendirilmesine ihtiyaç duyar. Performans değerlendirme, çalışanın zayıf ve yetersiz özelliklerinin belirlenmesinde, oluşabilecek problemlerin ortaya çıkarılmasında, eğitim ihtiyaçlarının ve gerekli gelişim ve motivasyon tiplerinin belirlenmesinde oldukça büyük katkıya sahiptir. Çalışan performansı değerlendirmenin geri bildirim altında olması sorunu tespit etmekle kalmaz, aynı zamanda olan problemlere çözüm getiren konumda olmasını sağlamıştır.

Çalışmamızda değerlendirdiğimiz kurumun işçi, memur ve sözleşmeli memur çalışanları için 2012 yılından beri

performans değerlendirme ile ilgili araştırmalar yapmakta ve çalışan performans değerlendirme sistemi uygulamaktadır. Uygulanan bu sistemde öncelikle çalışanlarına eğitimler verilir ve verilen eğitimlerle birlikte çalışanlarını bilgilendirmiş olur. 2014 yılında yenilenen performans değerlendirme sistemi Performans Gelişim Sistemi olarak değiştirilmiştir. Bu sistemle birlikte çok yönlü değerlendirme yapabilmek adına 360 derece performans değerlendirme sistemi modeline geçilmiştir. Çalışanların bireysel, üst ve varsa astları olan aynı mertebedeki üç personel tarafından değerlendirilmesiyle birbirlerine verilen puanlar gizli tutularak sonuçlar yöneticilerle paylaşılır. Paylaşılan sonuçlar çalışanlara geri bildirim olarak gönderilir ve çalışanın performans gelişimine ve işin verimliliğine katkı sağlamak adına gerekli eğitim, motivasyonlar belirlenir.

Bu çalışma ile birlikte, belirtilen birimlerde çalışan performansının değerlendirilmesi adına var olan performans değerlendirme sistemi sonuçları ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak, yeni bir değerlendirme yapılmıştır.

Kriterler ve alternatifler belirlenerek hiyerarşik yapı oluşturulmuştur. 5 ana kriter ve her bir ana kriter için 3'er alt kriterle birlikte 15 alt kriter olmak üzere toplam 20 kriter ve 3 alternatif belirlenmiştir. Çalışan performansını değerlendirirken kriterlerin ne derece öneme sahip olduğunu ve alternatif 3 çalışanın performansının kriterler açısından değerlendirmek için iki birimde yer alan 6 kişiye yapılan anketlerden elde edilen değerler Superdecision adlı programa girilmiştir. Elde edilen bulgular sonucunda, Strateji İzleme birimi için ana kriterler eşit önem derecesine sahip olarak çıkarken, en önemli alt kriteri "empati kurabilme" olarak çıkmış ve en az önemli alt kriter ise "etik kurallara uyma" çıkmıştır. Eğitim Müdürlüğü için ise, ana kriterler eşit önem derecesine sahip olarak çıkmıştır. En önemli alt kriterler "Empati kurabilme" ve "Etik kurallara uyabilme" olarak çıkmış, en az önemli kriterler ise "Uygun ses tonu ve vücut dili" ve "Dürüst ve samimi olma" olarak çıkmıştır. Alternatifler için yapılan anket çalışması sonuçlarına bakıldığında Strateji İzleme birimine göre Çalışan 3 en iyi performansa sahip olarak çıkmış, Çalışan 2 ise en kötü performansa sahip alternatif olarak çıkmıştır. Eğitim Müdürlüğü'ne göre yapılan anket çalışması sonucunda Çalışan 1 en iyi performansa sahip alternatif olup, Çalışan 3 ise en kötü performansa sahip alternatif olmuştur.

Çalışmamızda iki birimde ortak olarak belirlenen 3 çalışan için en iyi ve en kötü performans göstermesinde etkili olan kriterler aşağıda yer almaktadır:

Strateji İzleme biriminin değerlendirmesine göre en iyi performans gösteren Çalışan 3 çıkmış ve en iyi performans göstermesine sebep olan kriter ise "Empati kurabilme" alt kriteridir. Yine aynı birime göre en kötü performans gösteren Çalışan 2 olarak çıkmış ve en kötü performans göstermesine sebep olan kriter ise "Etik kurallara uyma" alt kriteridir.

Eğitim Müdürlüğü'nün yapmış olduğu değerlendirmeye göre en iyi performansa sahip olan Çalışan 1 olarak çıkmıştır ve buna sebep olan kriter "Empati kurabilme" ve "Etik kurallara uyma" alt kriterleridir. En kötü performansa sahip olan alternatif ise Çalışan 3 ve buna sebep olan kriter ise "Uygun ses tonu ve vücut dili" ve "Dürüst ve samimi olma"

alt kriterleridir. Çıkan bu sonuçları göre kurum, bu çalışanlar için gerekli eğitim ve motivasyonları vermesi gerekecektir.

Bu çalışmada, çalışan performansının değerlendirilmesinde etkili faktörler ele alınmıştır. Değerlendirmeler için ÇKKV yöntemlerinden AHP tekniği ele alınmıştır. Yapılan çalışmayla birlikte, çalışanların mevcut durumlarının belirlenen kriterler bazında değerlendirilerek etkin sonuç analizleri paylaşılmıştır ve bu analizlerden yola çıkarak çalışma verimliliği ve performans yükseltilmesinde faydalı olacağı düşünülmektedir. Çalışma ile birlikte, farklı kurum ve birimlerdeki çalışan performanslarının değerlendirilmesinde yol göstermesi umulmaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 14

Kaynaklar

- [1] K. Yaralıoğlu, Performans değerlendirmede analitik hiyerarşi prosesi. Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 16 (1), 129-142, 2001. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/deuiibfd/issue/22766/B243002>.
- [2] E. Eraslan ve O. Algün, İdeal performans değerlendirme formu tasarımı analitik hiyerarşi yöntemi yaklaşımı. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, Ankara, 20 (1), 95-106, 2005. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gazimmfd/issue/6663/88882>.
- [3] S. Güney, S. C. Uludağ ve İ. S. Mert, Performans değerlendirmede analitik hiyerarşi prosesi. Anadolu Bil Meslek Yüksekokulu Dergisi, 18, 53-68, 2010. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/abmyoder/issue/46456/583584>.
- [4] G. Akkaya, Analitik hiyerarşi yöntemi ile personel seçimi ve bir uygulama. Verimlilik Dergisi, 4, 0-0, 2010. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/verimlilik/issue/30542/330516>.
- [5] N. Uçkun ve G. Girginer, Türkiye'deki kamu ve özel bankaların performanslarının gri ilişki analizi ile incelenmesi. Akdeniz İİBF Dergisi, 11 (21), 46-66, 2011. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/aiiibfd/issue/32324/359212>.
- [6] İ. Kır ve M. O. Çetlik, 360 derece performans değerlendirme sisteminde AHP kullanımı ve bir uygulama. Ç.Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi 27(2), 153-162, 2012. <https://docplayer.biz.tr/10043448-360-derece-performansdegerlendirme-yontemini-n-ahp-analizi-ile-karsilastirilmasi-ve-bir-uygulama-ozet.html>.
- [7] A. Çelikdin ve H. Karadal, Balanced scorecard ile analitik hiyerarşik proses yönteminin kullanılabilirliği üzerine bir uygulama. Sosyal ve Beşerî Bilimler Dergisi 5 (2), 142-151, 2013. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/sobiadsbd/issue/22122/237597>.
- [8] D. N. Özgür ve S. Gencan, VZA/AHP bütünlük yöntemi ile performans ölçümü: Ankara'daki kamu hastaneleri üzerine bir uygulama. Gazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi 16 (2), 88-112, 2014. https://dergipark.org.tr/en/pub/gazi_uui_bfd/issue/28310/300847.
- [9] M. Karaatlı, N. Ömürbek, ve G. Köse, Analitik hiyerarşi süreci temelli topsis ve vikor yöntemleri ile futbolcu performanslarının değerlendirilmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi 29 (1), 25-61, 2014. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/deuiibfd/issue/22719/242477>.
- [10] B. Özyörük, Performans ölçümünde balanced scorecard ve analitik hiyerarşi prosesi entegrasyonu. TÜBAV Bilim Dergisi 7 (1), 7-28, 2014. <https://dergipark.org.tr/en/pub/tubav/issue/21534/230991>.
- [11] M. Karaatlı, Çok kriterli karar verme teknikleri ile performans değerlendirmesine ilişkin bir uygulama. Sosyal Bilimler Araştırma Dergisi 4 (2), 176-186, 2015. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ssrj/issue/22479/240438>.
- [12] A. S. Uludağ ve H. Doğan, Çok kriterli karar verme yöntemlerinin karşılaştırılmasına odaklı bir hizmet kalitesi uygulaması. Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi 6 (2), 17-47, 2016. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ckuiibfd/issue/32908/365616>.
- [13] E. Çalışkan ve T. Eren, Bankaların performanslarının çok kriterli karar verme yöntemiyle değerlendirilmesi. Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi 6 (2), 85-107, 2016. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ordubtd/issue/27365/287965>.
- [14] Y. Aydın ve T. Eren, Savunma sanayiinde stratejik ürün için çok kriterli karar verme yöntemleri ile tedarikçi seçimi. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 7 (1), 129-148, 2018. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.386379>.
- [15] M. G. Gümüş, M. Ö. Balta ve S. S. Durduran, Coğrafi bilgi sistemlerine dayalı çok kriterli karar verme teknikleri ile alışveriş merkezi kuruluş yeri seçimi: Niğde örneği. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 8 (1), 134-146, 2019. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.495245>.
- [16] A. O. Kuşakcı, B. Ayvaz, F. Öztürk ve F. Sofu, Bulanık multimooora ile personel seçimi: havacılık sektöründe bir uygulama. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 8 (1), 96-110, 2019. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.516835>.
- [17] A. Öner ve F. Ülengin, Silah seçiminde Ahp yaklaşımı. Kara Harp Okulu, I. Sistem Mühendisliği ve Savunma Uygulamaları Sempozyumu, Bildiriler-II, sayfa 1109-1122, Türkiye, 1995.
- [18] M. Deveci, F. Canitez and N. Ç. Demirel, Setting the optimal transit fare in public transportation by using analytical hierarchy process (AHP): The case of ETT. ICENS International Conference on Engineering and Natural Science, Sarajevo, Bosna-Hersek, 24 Mayıs 2016.
- [19] M. Timor, Analitik Hiyerarşi Prosesi, Türkmen Kitabevi, İstanbul, 2011

- [20] T. L. Saaty,, Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarch,: Springer, New York, 2001
- [21] T. L. Saaty, Decision Making for Leaders, Lifetime Learning Publications, CA, 1982
- [22] Ö. A. Kaynarca and İ. Ekmekçi, Service quality measurement model in urban public transportation: The case of İett. Journal of International Trade, Logistics and Law 3 (1), 1-10, 2017. <http://hdl.Handle.net/11467/2871>.
- [23] E. Kaya, Toplam kalite yönetimi çerçevesinde performans değerlendirmesi için bulanık bir model önerisi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2016. [http:// www.idealonline.com.tr/IdealOnline/makale/servicequality-measurementmodel-in-urbanpublic-transportation-the-case-of-iett/51023](http://www.idealonline.com.tr/IdealOnline/makale/servicequality-measurementmodel-in-urbanpublic-transportation-the-case-of-iett/51023).





Gıdalardan biyoaktif bileşiklerin ekstraksiyonunda derin ötektik çözücülerin kullanımı

Utilization of deep eutectic solvents in the extraction of bioactive compounds from food materials

Naciye Kutlu^{1,*}, Merve Silanur Yılmaz², Aşlı İşci³, Özge Şakıyan⁴

¹ Bayburt Üniversitesi, Gıda İşleme Bölümü, 69500, Bayburt, Türkiye
^{2,3,4} Ankara Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, 06830, Ankara, Türkiye

Özet

Çevre bilincinin her geçen gün artmasıyla, son yıllarda yeşil teknoloji kavramı daha da önem kazanmıştır. Bu kapsamda, tehlikeli maddelerin üretiminin ve tüketiminin azaltılması, harcanan enerji miktarının indirgenmesi ve yenilenebilir kaynakların kullanımının artırılması amaçlanmaktadır. Gıda, kimya ve ilaç endüstrisinde yaygın olarak kullanılan geleneksel çözücüler yerine, sağlığa zararı olmayan ve yüksek ekstraksiyon verimine sahip çözücülerin kullanımı önerilmektedir. Yeşil çözücüler, toksik olmayan, geri dönüşümü mümkün olabilen, uçucu olmayan ve sentezi için yüksek maliyet gerektirmeyen çözücülerdir. Su, iyonik sıvılar veya süperkritik akışkanlar en çok kullanılan yeşil çözücülerdendir. Son yıllarda bu çözücülerin yanı sıra, derin ötektik çözücüler bu alanda kendine yer bulmuştur. Derin ötektik çözücülerin fiziksel özellikleri iyonik sıvılara benzer olsa da, kimyasal özellikleri farklıdır. Son yıllarda, derin ötektik çözücüler, gıda materyallerinden biyoaktif bileşiklerin (fenolik bileşik, antosiyanin vb.) ekstraksiyonunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çözücüler ile ekstraksiyon veriminde önemli ölçüde artış tespit edilmiştir. Bu derleme, gıdalardan biyoaktif bileşiklerin derin ötektik çözücülerle ekstraksiyonu hakkında çalışmalarını irdelemektedir.

Anahtar kelimeler: Yeşil teknoloji, Yeşil çözücüler, Derin ötektik çözücüler, Ekstraksiyon, Biyoaktif bileşikler.

1 Yeşil teknoloji ve çözücüler

Yeşil teknolojiler, tehlikeli maddelerin üretimini ve tüketimini azaltmayı, tehlikeli kimyasal üretiminde harcanan enerji miktarını indirgemeyi ve yenilenebilir kaynakların kullanımını arttırmayı amaçlamaktadırlar. Yeşil teknolojiler, Anastas ve Werner tarafından [1] 1998 yılında yayınlanan 12 temel ilkeye dayanmaktadır;

1. Atık önleme: Atık oluşumu, üretimin başlangıcında öngörülüp önlenmelidir.
2. Güvenlik: Kullanılan teknoloji ile hiçbir toksik madde oluşmamalıdır.
3. Tehlike önleme: Çevre ve insan sağlığı için tehlikesiz ürünlerin üretimi ve kullanımı tasarlanmalıdır.
4. Yenilenebilir hammadde: Kullanılan hammaddeler yenilenebilir özellikte olmalıdır.

Abstract

As the environmental awareness increases, the concept of green technology has gained more importance in recent years. It aims to reduce the production and consumption of hazardous materials, reduce the amount of energy spent and increase the use of renewable resources. It is recommended to use solvents that have non-toxic and high extraction efficiency instead of traditional solvents that are commonly used in the food, chemical and pharmaceutical industries. Green solvents are non-toxic, recyclable, non-volatile and have minimal cost of synthesis. Water, ionic liquids or supercritical fluids are among the most commonly preferred green solvents. In addition to these solvents, deep eutectic solvents took a part in this field in recent years. Although the physical properties of deep eutectic solvents are similar to ionic liquids, their chemical properties are different. In recent years, deep eutectic solvents have been widely used in the extraction of bioactive compounds (phenolic compound, anthocyanin etc.) from food materials. It has been detected a significant increase in extraction efficiency with these solvents. This article reviews the extraction of bioactive compounds from food materials using deep eutectic solvents.

Keywords: Green chemistry, Green solvents, Deep eutectic solvents, Extraction, Bioactive compound.

5. Katalizör kullanımı: Üretimde israfın önlenip, verimin artırılabilmesi için katalizör kullanılmalıdır.

6. Türevlerin azaltılması: Gereksiz işlemler daha fazla atık oluşumuna neden olduğu için, mümkün olduğunca azaltılmalıdır

7. Atom ekonomisi: Üretimde kullanılacak olan her madde, ürün içinde maksimum seviyede yer almalı, boşa harcanmış atomlardan kaçınılmalıdır.

8. Güvenli çözücü kullanımı: Üretim esnasında minimum miktarda ve en tehlikesiz olan çözücü seçilmelidir.

9. Enerji verimliliği: Üretim, mümkün olduğunca ortam sıcaklığında ve atmosferik basınçta olacak şekilde tasarlanmalıdır.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: naciye kutlu@bayburt.edu.tr (N. Kutlu)

Geliş / Received: 22.05.2020 Kabul / Accepted: 18.01.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.740817

10. Bozunma tasarımı: Kullanımı biten kimyasallar ortamda birikmemeli, tehlikesiz maddelere bozunabilecek şekilde tasarlanmalıdır.

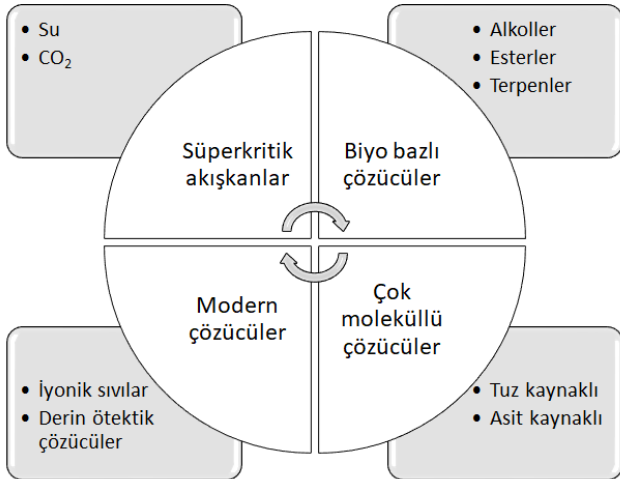
11. Gerçek zamanlı kontrol: İstenmeyen ürünlerin oluşmaması ya da ortadan kaldırılması için reaksiyonlar gerçek zamanlı gözlenmelidir.

12. Minimum kaza olasılığı: Üretimde kullanılan kimyasallar kaza risklerini en aza indirecek şekilde seçilmelidir.

Yeni geliştirilen teknolojiler, her zaman bu 12 ilkenin tamamını içermese de, bu ilkeler temel alınarak teknolojilerin çevresel etkileri konusunda fikir sahibi olunabilmektedir. Örneğin, ilkelerden biri olan atık önleme, sıklıkla teknolojilerin ne kadar “yeşil” olduğunun ölçüsü olarak kullanılmakta ve üretilen atık miktarı ölçülebilmektedir. Atık kütlelerinin, ürünün kütlesine oranı “E-faktör” (environmental factor) olarak tanımlanmakta ve mümkün olan minimum değer alması hedeflenmektedir. Tamamen yeşil teknolojilerde E-faktör değeri sıfırdır [2].

Çözücüler, özellikle kimya sanayii başta olmak üzere, tekstil, kağıt, gıda, biyokütle, farmakoloji gibi bir çok endüstri kolunda, sıklıkla kullanılmaktadır. Laboratuvar ölçekli çalışmalara bakıldığında ise, sentez, purifikasyon, ekstraksiyon gibi proseslerde kullanım alanı bulmaktadırlar. Sıvıların çözücü olarak kullanımı için, bazı özellikleri sağlamaları gerekmektedir. Örneğin, çalışılan ortam sıcaklıklarında ve basınçlarında, sıvı fazda olabilmeli, ticari saflıkta bulunabilmeli ya da saflaştırılabilmesi kolay ve ucuz olmalıdır [3].

Yeşil çözücüler, toksik olmayan, geri dönüşümü mümkün olabilen, uçucu olmayan ve sentezi için yüksek maliyet gerektirmeyen çözücülerdir. Sürdürülebilir döngü için, kullanılan zararlı çözücülerin yerine, yeşil çözücü kullanımı desteklenmelidir. Sıklıkla kullanılan yeşil çözücülerin sınıflandırılması Şekil 1’de gösterilmiştir [4].



Şekil 1. Sıklıkla kullanılan yeşil çözücüler [4]

Su, saflaştırılması kolay, ucuz, geri dönüşümlü, toksik ve yanıcı olmayan, çevre dostu olduğundan dolayı, birçok alanda yaygın olarak kullanılan bir çözücüdür. Fakat bunun yanı sıra su, birçok gaz ve endüstriyel polimer gibi katılar için zayıf çözücü özelliktedir. Bazı asitler ile reaktif özellik

gösterebilmekte, bu durumlarda ise farklı çözücü arayışlarına gidilmektedir [3]. Alternatif olarak kullanılabilen organik çözücülerin çözme kabiliyetleri oldukça yüksek olsa da, bu bileşiklerin pahalı, nispeten daha toksik, yanıcı ve çevreye zararlı oluşları kullanımlarını kısıtlamaktadır [5]. Süperkritik çözücüler (özellikle süperkritik su), laboratuvar ölçekli çalışmalarda uygun olmak ile birlikte, büyük ölçekli çalışmalarda enerji maliyetinden (yüksek basınç ve sıcaklık) dolayı tercih edilmemektedir [3, 6, 7]. İyonik çözücüler, oda sıcaklığında sıvı fazda olan organik tuzlardır. İyonik sıvılar arasında, 1-alkil-3-metilimidazolium bazlı olanlar çok kullanılmakta ve genellikle klor (Cl) ve brom (Br) iyonları ile birleştirilmektedirler [8]. Fakat iyonik sıvıların, yüksek maliyetleri ve toksisite çalışmalarının yetersiz olması nedeniyle kullanımları sınırlandırılmıştır [9, 10]. Derin ötektik çözücüler bu sorunları en aza indirebilmek için geliştirilmiş yeni nesil yeşil çözücülerdendir [9].

Bu derlemenin amacı, gıda materyallerinden biyoaktif bileşiklerin (fenolik bileşik, antosiyanin vb.) ekstraksiyonunda derin ötektik çözücülerini kullanan araştırmaları özetlemektir. Bu bağlamda, bu makale ile derin ötektik çözücüler hakkında temel bilginin yanı sıra, derin ötektik çözücü ekstraksiyon prensibi, derin ötektik çözücülerin ekstraksiyona etkisi ve yaşanan zorluklar hakkında bilgi verilmektedir.

2 Derin ötektik çözücüler

Faz diyagramında, iki ya da daha fazla bileşiğin karışması sırasında, bu karışımı oluşturan bileşiklerin erime noktalarından daha düşük değere sahip olan bir karışım oluşabilmektedir. Bu karışımın oluştuğu nokta, ötektik nokta ve oluşan karışım da derin ötektik çözücü olarak adlandırılmaktadır. Derin ötektik çözücü formülasyonu genel olarak ikili karışımlardan oluşmaktadır. Bileşenlerden biri hidrojen bağı alıcısı (HBA), diğeri ise bir hidrojen bağı donörüdür (HBD). Derin ötektik çözücü oluşumunda, bileşikler arasında kovalent bağ değil, hidrojen bağı meydana gelmektedir. Ötektiği oluşturan hidrojen bağı alıcısı ve hidrojen bağı donörü arasındaki oran, bileşenlerin karşılıklı hidrojen bağlama yeteneklerine bağlıdır [3]. Derin ötektik çözücülerin fiziksel özellikleri iyonik sıvılara benzer olsa da, kimyasal özellikleri farklıdır [9].

Derin ötektik çözücüler, yapılarını oluşturan bileşikler baz alındığında 4 kategori altında toplanmaktadırlar. Bir kuartern amonyum tuzu ve bir metal klorür (kategori 1), bir kuartern amonyum tuzu ve bir metal klorür hidrat (kategori 2), bir kuartern amonyum tuzu ve bir hidrojen bağı donörü (HBD) (kategori 3), son olarak da bir hidrojen bağı donörü ve bir metal klorürden (kategori 4) oluşabilmektedir. Hızlı ve kolay hazırlanabilmesi, su ile reaktivlik göstermemesinden dolayı, derin ötektik çözücü oluştururken en çok kategori 3 kullanılmaktadır. En çok kullanılan derin ötektik çözücü türü ise, hidrojen bağı donörü olarak işlev gören amin, alkol, asit ve şeker gibi farklı kimyasal fonksiyonel gruplarla karıştırılan, hidrojen bağı alıcısı (HBA) kolin klorürden (ChCl) oluşmaktadır. Kolin klorür hem kuartern amonyum tuzu hem de alkol içeren iki işlevli organik bir bileşiktir. Suda çözünebilen ve B grubu

vitaminler sınıfında tanımlanan Kolin, ayrıca göreceli olarak düşük maliyetlidir [11].

Derin ötektik çözücülerin avantajlarından bazıları, sentezinin daha kolay, daha kararlı, biyobozunur ve düşük toksisite değerlerine sahip olmalarıdır. Bu özellikler sebebiyle, ekstraksiyon proseslerinde sıklıkla tercih edilmeye başlanmıştır [12, 13]. Derin ötektik çözücülerin diğer bir özelliği de, erime noktasının, kendini oluşturan her bir bileşiğin erime noktasından daha düşük olmasıdır. Örneğin, hidrojen bağ alıcı özellikte olan CHCl_3 bileşiğinin erime noktası 302°C ve hidrojen bağ donörü özellikte olan ürenin erime noktası 133°C iken, bu bileşikler ile oluşturulan ötektik çözücünün (CHCl_3 :üre, mol oranı 1:2) erime noktası 12°C 'dir [14]. Bazı derin ötektik çözücülerin erime noktaları Tablo 1'de verilmiştir. Genel olarak, çoğu ötektik çözücü oda sıcaklığında sıvı formdadır [3]. Bu özelliği, oda sıcaklığında farklı proseslerde rahatlıkla kullanımına olanak sağlamaktadır.

Tablo 1. Bazı derin ötektik çözücülerin erime noktaları

HBA	HBD	Mol oranı	Erime noktası ($^\circ\text{C}$)	Kaynak
Kolin klorür	Laktik asit	1:2	-78	[15]
	Okzalit asit	1:1	-40	[16]
	Malik asit	1:1	-56	[15]
	Gliserol	1:2	-40	[17]
	Fruktoz	2:1	10	[16]
Kolin asetat	Üre	1:2	18	[18]
	Gliserol	1:1,5	13	[19]
Kolin bromür	Levülinik asit	1:4	10,7	[18]
Kolin flortür	Üre	1:2	1	[18]
Kolin nitrat	Üre	1:2	4	[18]
	Üre	1:2	-14	[18]
	Ksiloz	1:1	-30	[20]
	Glikoz	1:1	-7	[20]
	Mannoz	1:1	-16	[20]
Asetilkolin klorür	Fruktoz	1:1	-47	[20]

3 Derin ötektik çözücülerin ekstraksiyonda kullanımı

Bitkilerde bulunan fenolik bileşikler, insan sağlığına olan pozitif etkilerinden (anoksiyan, antimutajenik, antimikrobiyal ve anti-kanserojen) dolayı önem arz etmektedir [21, 22]. Gıda materyallerinden biyoaktif bileşik ekstraksiyonu için, yüksek miktarlarda organik çözücü kullanımı ve uzun ekstraksiyon süreleri gerekmektedir [23]. Günümüzde ekstraksiyon işlemi için yaygın olarak kullanılan geleneksel organik çözücülere örnek olarak metanol, kloroform, heksan ve etil asetat verilebilir. Ancak, bu uçucu ve tehlikeli organik çözücülerin fazla tüketimi, çevreye zarar vermekte ve ekstraktlarda kalıntı bırakarak toksik etki gösterebilmektedir [24]. Bu sebeple, son yıllarda yeni nesil çözücüler sıklıkla tercih edilmektedir. Son dönemdeki çalışmalar, derin ötektik çözücüler kullanılarak

yapılan ekstraksiyon işleminde, kuersetin, antisiyoninler ve kateşinler gibi bazı biyoaktif bileşiklerin yüksek verim ile elde edilebildiğini göstermiştir [25].

Ekstraksiyon işleminde derin ötektik çözücülerin kullanılmasının başlıca nedeni olarak, yüksek çözme kabiliyetleri, yani moleküller arasında hidrojen bağ oluşumunu kolaylaştıran proton ve elektron alma/verme kabiliyetleri gösterilebilmektedir. Bunun yanında, derin ötektik çözücülerin viskozite ve polariteleri gibi ayarlanabilir fizikokimyasal özellikleri de ekstraksiyon sürecinde önem arz etmektedir. Örneğin, derin ötektik çözücülerin polaritesi polar veya polar olmayan olarak ayarlanabilir, bu da onların çeşitli doğal bileşik gruplarının ekstraksiyonu için etkili bir çözücü yapmaktadır [26, 27].

Son yıllarda derin ötektik çözücülerin biyoaktif bileşik ekstraksiyonları ile ilgili yapılan çalışmalar incelenmiş ve Tablo 2'de özetlenmiştir. Tablo incelendiğinde, HBA olarak genellikle kolin klorürün kullanıldığı, ancak bunun yanında sitrik asit, betain, glikoz ve L-prolin gibi farklı HBA'ların da kullanıldığı görülmektedir. HBD olarak ise genellikle alkol ve organik asitler tercih edilmektedir. Toksik ve aşındırıcı olmayan, polar yapıdaki alkol bazlı derin ötektik çözücülerin birçok organik ve inorganik bileşik ekstraksiyonunda başarıyla uygulandığı bildirilmiştir [28].

Ekstraksiyon verimi, çözünen ve çözücü arasında bağlanma (esas olarak hidrojen bağ) oluşumu ile belirlenmektedir. Örneğin, bitkilerin hücre duvarında bulunan bazı selüloz veya ligninler, biyoaktif bileşiklerin çözücülere salınmasını hızlandıran hidrojen bağlanma etkileşimleri nedeniyle derin ötektik çözücülerde çözülebilir [39, 40]. Derin ötektik çözücüler ile ilgili yapılan çalışmalar, bu çözücülerin yüksek ısıl stabilitesi, düşük ısıl iletkenlik ve düşük uçuculuk gibi özelliklere sahip olduğunu göstermiştir. Bunun yanında son yapılan çalışmalarda, hidrofobik özelliğe sahip derin ötektik çözücüler oluşturulmuştur. Bu derin ötektik çözücüler, sulu çözeltilerden apolar molekülleri ekstrakte etme kabiliyetleri sayesinde ekstraksiyon verimliliğini arttırmaktadır [12, 41]. Meng vd. [25], *Pollen Typhae* bitkisinden flavonoidlerin ekstraksiyonunu, geleneksel çözücüler (etanol, su, metanol ve %75'lik etanol çözeltisi) ile kolin klorür:1,2 propandiol (1:4) bileşiklerinden oluşan derin ötektik çözücü kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Derin ötektik çözücü ile yapılan ekstraksiyon işleminin daha avantajlı olduğunu bildirmişlerdir. Bosilijkov vd. [42], şarap tortusundan toplam antisiyonin ekstraksiyonu yapmışlardır. Derin ötektik çözücü olarak, kolin klorür:malik asit çözeltisi kullanılırken, geleneksel çözücü olarak etanolün asitlendirilmiş sulu çözeltisini kullanmışlardır. Çalışma sonucunda, derin ötektik çözücü ile yapılan ekstraksiyon veriminin daha yüksek olduğu görülmüştür. Literatür incelendiğinde, derin ötektik çözücü ile yapılan ekstraksiyon çalışmalarında çözünürlük, difüzyon ve viskozite üzerine etkilerinden dolayı sıcaklık önemli bir parametre olarak görülmüştür [33, 35, 43]. Zhou vd. [44], yapmış oldukları çalışmada, beyaz dut yapraklarından ultrason destekli ekstraksiyon ile fenolik maddeleri ekstrakte etmiştir. Derin ötektik çözücü olarak, kolin klorür ve sitrik asit karışımının kullanıldığı ekstraksiyon işlemi farklı sıcaklıklarda (30°C , 40°C , 50°C ve 60°C) yapılmıştır. Ekstraksiyon veriminin, sıcaklığın

Tablo 2. Derin ötektik çözücüler ile yapılmış ekstraksiyon alanındaki çalışmalar

Örnek	HBA	HBD	Mol oranı	Ekstraksiyon yöntemi	Ekstrakte edilen bileşik	Kaynak
Karabuğday Lahanası		Trietilen glikol	1:4	UDE* (40 °C, 40 dk., 40 kHz, 700 W)	Flavonoidler	[29]
Karabuğday Lahanası		1,2 Propandiol	1:1	UDE (40 °C, 40 dk., 40 kHz, 700 W)	Flavonoidler	[29]
Karabuğday Lahanası		1,4 Bütandiol	1:3	UDE (40 °C, 40 dk., 40 kHz, 700 W)	Flavonoidler	[29]
Karabuğday Lahanası		Etilen glikol	1:2	UDE (40 °C, 40 dk., 40 kHz, 700 W)	Flavonoidler	[29]
Sızma zeytinyağı		Ksilitol	2:1	GE* (40 °C, 1 sa.)	Fenolik Bileşik	[30]
Üzüm kabuğu		Oksalik asit	1:1	MDE* (50-90 °C, 15-90 dk., 100 W); UDE (30-90 °C, 15-90 dk., 35 kHz)	Fenolik Bileşik	[27]
Japon hanımeli		1,3 bütandiol	1:2	MDE (60 °C, 20 dk., 700 W); UDE (60 °C, 45 dk.)	Fenolik Bileşik	[31]
Japon hanımeli		1,4 bütandiol	1:2	MDE (60 °C, 20 dk., 700 W); UDE (60 °C, 45 dk.)	Fenolik Bileşik	[31]
Bezelye kökleri		1,6 heksandiol	1:7	MDE (80 °C, 11 dk., 600 W)	Genistin, genistein, apigenin	[32]
Yara otu		Etilen glikol	1:2	GE (80 °C, 30 dk.)	Rosmarinik asit ve salviaflasit	[33]
Yara otu	Kolin klorür	Gliserol	1:2	GE (80 °C, 30 dk.)	Rosmarinik asit ve salviaflasit	[33]
Yara otu		1,2 Propilen glikol	1:2	GE (80 °C, 30 dk.)	Rosmarinik asit ve salviaflasit	[33]
Yara otu		1,4 Bütandiol	1:2	GE (80 °C, 30 dk.)	Rosmarinik asit ve salviaflasit	[33]
Yara otu		1,3 Bütandiol	1:2	GE (80 °C, 30 dk.)	Rosmarinik asit ve salviaflasit	[33]
Yara otu		2,3 Bütandiol	1:2	GE (80 °C, 30 dk.)	Rosmarinik asit ve salviaflasit	[33]
Tatar karabuğdayı		Gliserol	1:1	UDE (40 °C, 1 sa., 200 W)	Rutin	[34]
Ispanak, fesleğen, dereotu, salatalık kabuğu		Tartarik Asit	1:1	GE (95 °C, 2 sa.)	Manganez	[35]
Ispanak, fesleğen, dereotu, salatalık kabuğu		Oksalik Asit	1:1	GE (95 °C, 2 sa.)	Manganez	[35]
Ispanak, fesleğen, dereotu, salatalık kabuğu		Sitrik asit	1:1	GE (95 °C, 2 sa.)	Manganez	[35]
Vanilya baklası		Sitrik asit:su	1:1:6	GE (50 °C, 1 sa.)	Vanilya	[36]
Vanilya baklası		Malik asit:su	1:1:6	GE (50 °C, 1 sa.)	Vanilya	[36]
Japon soforası		D-(+)-Glikoz	5:3	UDE (20 °C, 45 dk., 330-450 W)	Kuersetin, kaempferol, isorhamnetin	[37]
Japon soforası	Sitrik Asit	D-(+)-Glikoz	1:1	UDE (20 °C, 45 dk., 330-450 W)	Kuersetin, kaempferol, isorhamnetin	[37]
Kerkede		Gliserol	1:4	MDE (180 s, 550 W)	Fenolik bileşik, antosiyanin	[38]
Kerkede		Etilen glikol	1:4	MDE (180 s, 550 W)	Fenolik bileşik, antosiyanin	[38]
Japon soforası	L-prolin	Adonitol	1:1	UDE (20 °C, 45 dk., 330-450 W)	Kuersetin, kaempferol, isorhamnetin	[37]
Japon soforası		DL-Maleik asit	1:1	UDE (20 °C, 45 dk., 330-450 W)	Kuersetin, kaempferol, isorhamnetin	[37]
Vanilya baklası	Betain	Sükroz:su	2:1:6	GE (50 °C, 1 sa.)	Vanilya	[36]
Vanilya baklası		Sitrik asit:su	1:1:6	GE (50 °C, 1 sa.)	Vanilya	[36]
Bezelye kökleri		L-prolin	1:1	MDE (80 °C, 11 dk., 600 W)	Genistin, genistein, apigenin	[32]
Bezelye kökleri	Glikoz	Laktik asit	1:1	MDE (80 °C, 11 dk., 600 W)	Genistin, genistein, apigenin	[32]
Vanilya baklası	Laktik asit	1,2 Propandiol	1:1	GE (50 °C, 1 sa.)	Vanilya	[36]

*GE: Geleneksel Ekstraksiyon; MDE: Mikrodalga Destekli Ekstraksiyon; UDE: Ultrason Destekli Ekstraksiyon

30 °C olması durumunda, en düşük değerini aldığı görülmüştür. Bunun nedeni, düşük sıcaklıkta viskozitenin yüksek olmasından dolayı, kütle transferini sınırlandırmasıdır. En yüksek ekstraksiyon verimi, sıcaklık 40 °C olduğu durumda elde edilmiş olup, bu sıcaklığın üzerine çıktığında da ekstraksiyon dengelendiği için, verim artışı görülmediği rapor edilmiştir. Derin ötektik çözücü olarak L-karnitin ve 1,3 bütandiol karışımının kullanıldığı

başka bir çalışmada ise zencefil tozundan gingeroller, ultrason destekli ekstraksiyon yöntemi ile ekstrakte edilmiştir. Ekstraksiyon işlemi sıcaklık 20, 30, 40, 50 ve 60 °C olarak değiştirilmiştir. Sıcaklık 20 °C'den 50 °C'ye çıkarıldığında, artan sıcaklığa bağlı olarak viskozitenin azalması ile ekstraksiyon veriminin arttığı görülmüştür. Ancak, sıcaklık 50 °C'den 60 °C'ye çıkarıldığında ekstraksiyon verimi azalmıştır. Bunun nedeninin ise artan

sıcaklık ile birlikte gingerollerin degradasyona uğramasından kaynaklı olduğu bildirilmiştir [45].

Ekstraksiyon üzerine diğer bir önemli faktör ise derin ötektik çözücüyü oluşturan bileşiklerin molar oranları olmuştur. Li vd. [46], yeşil çay yaprakları ile yapmış oldukları çalışmada, materyalden kateşin ekstrakte edebilmek için, kolin klorür:laktik asit ile farklı oranlarda (1:1, 1:2, 1:3, 1:4) oluşturulan derin ötektik çözücüler hazırlamışlardır. Kolin klorür:laktik asit oranı 1:1'den 1:2'ye çıkarıldığında ekstraksiyon veriminin arttığı, ancak bu molar oranın 1:2'den 1:4'e çıkarılmasıyla ekstraksiyon veriminin azaldığı görülmüştür. Bu sonuçlara göre, laktik asit oranının artmasına bağlı olarak azalan viskozitenin kütle transferini artırarak ekstraksiyon verimliliğini arttırdığı bildirilmiştir. Bunun yanında laktik asit miktarının daha fazla artmasının verimi azaltması ise kolin klorür oranının azalması ile yani hidrojen bağ reseptörlerinin oranının azalması ile açıklanmıştır. Benzer olarak, yeşil çaydan kateşinlerin ekstraksiyonu için kolin klorür ve etilen glikol ile hazırlanan derin ötektik çözücüde etilen glikol oranının artırılması ekstraksiyon verimini belli bir noktaya kadar arttırabilmiştir [43].

Ekstraksiyon işleminde çözücünün viskozitesi, kütle aktarımı ve prosesin verimliliği açısından önemli bir parametredir. Derin ötektik çözücülerin viskozitesinin yüksek olması sebebiyle büyük ölçekte akışla ilgili problemlere sebep olabileceği düşünülmektedir. Yüksek viskoziteye sahip bazı ötektik çözücülerin, kütle transferini azaltabileceği tespit edilmiştir. Bunun çözümü olarak, ekstraksiyonun yapıldığı sıcaklığın artırılması ve/veya derin ötektik çözücünün belli oranda hidrojen bağ donörü özelliği taşıyan su ile karıştırılması önerilmektedir [26]. Derin ötektik çözücülerin su ile seyreltilerek kullanımının ekstraksiyon veriminin arttırdığını gösteren çalışmalar rapor edilmiştir. Cui vd. [32], yapmış oldukları ekstraksiyon işleminde kolin klorür ve 1,6 heksandiol ile oluşturdukları derin ötektik çözücü içine farklı oranlarda (%0-90) su ekleyerek çözeltiler oluşturmuştur ve en yüksek ekstraksiyon veriminin %30 oranında su eklenmesiyle elde ettiklerini bildirmişlerdir. Peng vd. [31], yapmış oldukları çalışmada ise kolin klorür ve 1,3 bütandiol ile oluşturdukları derin ötektik çözücü içine, %10 su eklediklerinde ekstraksiyon veriminin arttığını belirtmişlerdir. Zhang ve Wang [47], ise diğer çalışmalara paralel olarak, kolin klorür ve 1,4 bütandiol ile hazırlamış oldukları derin ötektik çözücü içine farklı oranlarda (%0-50) su eklemişler ve en yüksek ekstraksiyon verimine, %30 oranında su eklenen karışım ile ulaşıldığını belirtmişlerdir.

4 Sonuçlar

Yeşil çözücüler, toksik olmayan, geri dönüşümü mümkün olabilen, uçucu olmayan ve sentezi için yüksek maliyet gerektirmeyen çözücülerdir. Sürdürülebilir döngü için, kullanılan zararlı çözücülerin yerine, yeşil çözücü kullanımı desteklenmesi gerekmektedir. Derin ötektik çözücüler, son yıllarda bu amaç ile kullanılan yeşil çözücülerdendir. Derin ötektik çözücüler, sentezlerinin daha kolay olması, daha kararlı olmaları, biyo-bozunur olmaları ve düşük toksisiteye sahip olmaları gibi özellikleri nedeniyle

ekstraksiyon proseslerinde aranan çözücü haline gelmişlerdir. Ekstraksiyonun yanı sıra, derin ötektik çözücüler, nanoteknoloji, biyoteknoloji, polimerizasyonlar, biyokütle işleme, malzeme hazırlama, biyodizel sentezi, enzim katalizli reaksiyonlar, karbon dioksit adsorpsiyonu, elektrokimya ve organik sentez gibi çeşitli araştırma alanlarında da kendine kullanım alanı bulmuştur.

Çıkar çatışması

Yazarların başka kişiler ve/veya kurumlar ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Benzerlik oranı (iThenticate): %6

Kaynaklar

- [1] P. T. Anastas, and J. C. Warner, Green chemistry: Theory and Practice. Oxford University Press Oxford, 1998.
- [2] M. Poliakoff, and P. Licence, Green chemistry, Nature, vol. 450(6), 810-812, 2007. <https://doi.org/10.1038/450810a>.
- [3] Y. Marcus, Deep eutectic solvents. Chapter 1: Introduction. Springer Nature Switzerland AG, ISBN: 9783030006075, 2019.
- [4] L. S. Torres-Valenzuela, A. Ballesteros-Gómez, and S. Rubio, Green solvents for the extraction of high added-value compounds from agri-food waste. Food Engineering Reviews, 12, 83-100, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12393-019-09206-y>.
- [5] Y. Marcus, Solvent mixtures. Properties and preferential solvation. M. Dekker, New York, ISBN 9780824708375, 2002.
- [6] A. Loppinet-Serani, C. Aymonier, and F. Cansell, Current and foreseeable applications of süper- critical water for energy and the environment. Chemistry and Sustainability, Energy and Materials, 1(6), 486-503, 2008. <https://doi:10.1002/cssc.200700167>.
- [7] Y. Marcus, Supercritical water. Chapter 1: Introduction. Wiley, New York, ISBN: 9780470889473, 2012.
- [8] S. P. M. Ventura, F. A. de Silva, M. V. Quental, D. Mondal, M. G. Freire, and J. A. P. Coutinho, Ionic-liquid mediated extraction and separation processes for bioactive compounds: past, present, and future trends. Chemical Reviews, 117, 6984-7052, 2017. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00550>.
- [9] P. Dominguez de Maria, Ionic liquids, switchable solvents and eutectic mixtures. In: Green solvents. Elsevier, Amsterdam, p. 533, 2017.
- [10] H. Passos, M. G. Freire, and J. A. P. Coutinho, Ionic liquid solutions as extractive solvents for value-added compounds from biomass. Green Chemistry, 16, 4786-4815, 2014. <https://doi.org/10.1039/C4GC00236A>.
- [11] E. L. Smith, A. P. Abbott, and K. S. Ryder, Deep eutectic solvents (DESSs) and their applications. Chemical Reviews, 114, 11060-11082, 2014. <https://doi.org/10.1021/cr300162p>.
- [12] D. J. G. P. van Osch, L. F. Zubeir, A. van den Bruinhorst, M. A. A. Rocha, and M. C. Kroon, Hydrophobic deep eutectic solvents as water

- immiscible extractants. *Green Chemistry*, 17(9), 4518-4521, 2015. <https://doi.org/10.1039/C5GC01451D>.
- [13] B. D. Ribeiro, C. Florindo, L. C. Iff, M. A. Z. Coelho, and I. M. Marrucho, Menthol-based eutectic mixtures: hydrophobic low viscosity solvents. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 3(10), 2469-2477, 2015. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5b00532>.
- [14] Z. Maugeri, and P. Dominguez de Maria, Novel choline-chloride-based Deep eutectic solvents with renewable hydrogen bond donors: levulinic acid and sugar-based polyols. *RSC Advances*, 2(2), 421-425, 2012. <https://doi.org/10.1039/C1RA00630D>.
- [15] C. Florindo, F. S. Oliveira, L. P. N. Rebelo, A. M. Fernandes, and I. M. Marrucho, Insights into the synthesis and properties of deep eutectic solvents based on cholinium chloride and carboxylic acids. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2, 2416-2425, 2014. <https://doi.org/10.1021/sc500439w>.
- [16] G. Garcia, M. Atilhan, and S. Aparicio, An approach for the rationalization of melting temperature for deep eutectic solvents from DFT. *Chemical Physics Letters*, 634, 151-155, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2015.06.017>.
- [17] A. P. Abbott, G. Capper, D. L. Davies, R. K. Rasheed, and V. Tambyrajah, Novel solvent properties of choline chloride/urea mixtures. *Chemical Communications*, 1, 70-71, 2003. <https://doi.org/10.1039/B210714G>.
- [18] A. P. Abbott, P. M. Cullis, M. J. Gibson, R. C. Harris, and E. Raven, Extraction of glycerol from biodiesel into a eutectic based ionic liquid. *Green Chemistry*, 9, 868-872, 2007. <https://doi.org/10.1039/B702833D>.
- [19] L. F. Zubeir, M. H. M. Lacroix, and M. C. Kroon, Low transition temperature mixtures as innovative and sustainable CO₂ capture solvents. *The Journal of Physical Chemistry B*, 118, 14429-14441, 2014. <https://doi.org/10.1021/jp5089004>.
- [20] G. Garcia, S. Aparicio, R. Ullah, and M. Atilhan, Deep eutectic solvents: physicochemical properties and gas separation applications. *Energy Fuels*, 29, 2616-2644, 2015. doi.org/10.1021/ef5028873.
- [21] J. Dai, and R. J. Mumper, Plant phenolics: extraction, analysis and their antioxidant and anticancer properties. *Molecules*, 15(10), 7313-7352, 2010. <https://doi.org/10.3390/molecules15107313>.
- [22] M. S. Jesus, L. F. Ballesteros, R. N. Pereira, Z. Genisheva, A. S. Carvalho, C. Pereira-Wilson, J. A. Teixeira, and L. Domingues, Ohmic heating polyphenolic extracts from vine pruning residue with enhanced biological activity. *Food Chemistry*, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126298>.
- [23] I. Ignat, I. Volf, and V. I. Popa, A critical review of methods for characterization of polyphenolic compounds in fruits and vegetables. *Food Chemistry*, 126(4), 1821-1835, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.12.026>.
- [24] L. Duan, L. L. Dou, L. Guo, P. Li, and E. H. Liu, Comprehensive evaluation of deep eutectic solvents in extraction of bioactive natural products. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 4(4), 2405-2411, 2016. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b00091>.
- [25] Z. Meng, Z. Jing, D. Hongxia, G. Yuanyuan, and Z. Longshan, Green and efficient extraction of four bioactive flavonoids from Pollen Typhae by ultrasound-assisted deep eutectic solvents extraction. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 161, 246-253, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2018.08.048>.
- [26] M. H. Zainal-Abidin, M. Hayyan, A. Hayyan, and N. S. Jayakumar, New horizons in the extraction of bioactive compounds using deep eutectic solvents: A review. *Analytica Chimica Acta*, 979, 1-23, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2017.05.012>.
- [27] M. C. Cvjetko-Bubalo, N. Čurko, M. Tomašević, K. Kovačević Ganić, and I. Radojčić Redovniković, Green extraction of grape skin phenolics by using deep eutectic solvents. *Food Chemistry*, 200, 159-166, 2016. doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.01.040.
- [28] N. Altunay, A. Elik, and R. Gürkan, Preparation and application of alcohol based deep eutectic solvents for extraction of curcumin in food samples prior to its spectrophotometric determination. *Food Chemistry*, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125933>.
- [29] A. R. Mansur, N. E. Song, H. Won Jang, T. G. Lim, M. Yoo, and T. Gyu Nam, Optimizing the ultrasound-assisted deep eutectic solvent extraction of flavonoids in common buckwheat sprouts. *Food Chemistry*, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.003>.
- [30] A. Garcia, E. Rodríguez-Juan, G. RodríguezGutiérrez, J. J. Rios, and J. Fernández-Bolaños, Extraction of phenolic compounds from virgin olive oil by deep eutectic solvents (DESs). *Food Chemistry*, 197, 554-561, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.10.13>.
- [31] X. Peng, M. H. Duan, X. H. Yao, Y. H. Zhang, C. J. Zhao, Y. G. Zu, and Y. J. Fu, Green extraction of five target phenolic acids from *Lonicera japonica* Flos with deep eutectic solvent. *Separation and Purification Technology*, 157, 249-257, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.10.065>.
- [32] Q. Cui, X. Peng, X. H. Yao, Z. F. Wei, M. Luo, W. Wang, C. J. Zhao, Y. J. Fu, and Y. G. Zu, Deep eutectic solvent-based microwave-assisted extraction of genistin, genistein and apigenin from pigeon pea roots. *Separation and Purification Technology*, 150, 63-72, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.06.026>.
- [33] B. Xia, D. Yan, Y. Bai, J. Xie, Y. Cao, D. Liao, and L. Lin, Determination of phenolic acids in *Prunella vulgaris* L.: a safe and green extraction method using alcohol-based deep eutectic solvents. *Analytical Methods*, 7(21), 9354-9364, 2015. <https://doi.org/10.1039/C5AY02035B>.
- [34] Y. Huang, F. Feng, J. Jiang, Y. Qiao, T. Wu, J. Voglmeir, and Z. G. Chen, Green and efficient extraction of rutin from Tartary buckwheat hull by using natural deep eutectic solvents. *Food Chemistry*, 221, 1400-1405, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.11.013>.

- [35] E. Bağda, H. Altundağ, and M. Soylak, Highly simple deep eutectic solvent extraction of manganese in vegetable samples prior to its ICP-OES analysis. *Biological Trace Element Research*, 179(2), 334–339, 2017. <https://doi.org/10.1007/s12011-017-0967-5>.
- [36] C. G. González, N. R. Mustafa, E. G. Wilson, R. Verpoorte, and Y. H. Choi, Application of natural deep eutectic solvents for the green extraction of vanillin from vanilla pods. *Flavour and Fragrance Journal*, 33(1), 91–96, 2017. <https://doi.org/10.1002/ffj.3425>.
- [37] M. W. Nam, J. Zhao, M. S. Lee, J. H. Jeong, and J. Lee, Enhanced extraction of bioactive natural products using tailor-made deep eutectic solvents: application to flavonoid extraction from *Flos sophorae*. *Green Chemistry*, 17(3), 1718–1727, 2015. <https://doi.org/10.1039/C4GC01556H>.
- [38] E. Kurtulbaş, A. G. Pekiş, M. Bilgin, D. P. Makris, and S. Şahin, Citric acid-based deep eutectic solvent for the anthocyanin recovery from *Hibiscus sabdariffa* through microwave-assisted extraction. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2020. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00606-3>.
- [39] M. Wang, J. Wang, Y. Zhou, M. Zhang, Q. Xia, W. Bi, and D. D. Y. Chen, Ecofriendly mechano-chemical extraction of bioactive compounds from plants with deep eutectic solvents. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5(7), 6297–6303, 2017. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b01378>.
- [40] Y. L. Kua, and S. Gan, Natural deep eutectic solvent (NADES) as a greener alternative for the extraction of hydrophilic (polar) and lipophilic (non-polar) phytonutrients. *Key Engineering Materials*, 797, 20–28, 2019. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.797.20>.
- [41] S. C. Cunha, and J. O. Fernandes, Extraction techniques with deep eutectic solvents. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 105, 225–239, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.05.001>.
- [42] T. Bosiljkov, F. Dujmić, M. Cvjetko Bubalo, J. Hribar, R. Vidrih, M. Brnčić, E. Zlatic, I. R. Redovniković, and S. Jokić, Natural deep eutectic solvents and ultrasound-assisted extraction: Green approaches for extraction of wine lees anthocyanins. *Food and Bioprocess Technology*, 102, 195–203, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.12.005>.
- [43] H. Zhang, B. Tang, and K. Row, Extraction of catechin compounds from green tea with a new green solvent. *Chemical Research in Chinese Universities*, 30(1), 37–41, 2014. <https://doi.org/10.1007/s40242-014-3339-0>.
- [44] P. Zhou, X. Wang, P. Liu, J. Huang, C. Wang, M. Pan, and Z. Kuang, Enhanced phenolic compounds extraction from *Morus alba* L. leaves by deep eutectic solvents combined with ultrasonic-assisted extraction. *Industrial Crops and Products*, 120, 147–154, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.04.071>.
- [45] Y. H. Hsieh, Y. Li, Z. Pan, Z. Chen, J. Lu, J. Yuan, Z. Zhu, and J. Zhang, Ultrasonication-assisted synthesis of alcohol-based deep eutectic solvents for extraction of active compounds from ginger. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104915>.
- [46] J. Li, Z. Han, Y. Zou, and B. Yu, Efficient extraction of major catechins in *Camellia sinensis* leaves using green choline chloride-based deep eutectic solvents. *RSC Advances*, 5(114), 93937–93944, 2015. doi.org/10.1039/C5RA15830C.
- [47] L. Zhang, and M. Wang, Optimization of deep eutectic solvent-based ultrasound-assisted extraction of polysaccharides from *Dioscorea opposita* Thunb. *International Journal of Biological Macromolecules*, 95, 675–681, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.11.096>.





Some physicochemical, rheological and sensory properties of flavored ice cream

Aromalı dondurmaların bazı fizikokimyasal, reolojik ve duyuşal özellikleri

Bedia Şimşek^{1,*} , İlhan Gün² 

¹ Süleyman Demirel University, Faculty of Engineering, Department of Food Engineering, Isparta Turkey)

² Burdur Mehmet Akif Ersoy University, Burdur Food, Agriculture and Livestock Vocational High School, Burdur, Turkey

Abstract

In this study, a total of 36 samples of each type of ice cream were collected from four different ice cream producers and determined some of the rheological and chemical properties at three different times. In regard the different flavors of ice cream, the differences between the pH, dry matter, fat, protein, overrun, first trickle of melting time, L *, a * and b* values were found to be statistically significant. All the samples displayed non-Newtonian behavior and pseudoplastic flow behavior. The apparent viscosity at 20 °C under a shear rate of 50 s⁻¹ was determined to be 7.72-2.17 Pa•s, 0.14-0.85 Pa•s and 0.59-1.28 Pa•s for the chocolate, strawberry, and vanilla ice cream samples, respectively. According to the principal component analysis (PCA) and hierarchical cluster analysis (HCA), it was determined that the ice creams were produced with different properties although the typical characteristics of the ice creams were the same

Keywords: Flavored ice cream, Rheological properties, Sensory evaluation

1 Introduction

Ice cream is a dairy product with refreshing features, pleasing aroma and appearance as a result of the addition of different fruit, which can be consumed in every season. In addition, ice cream can be produced as a plain product and its nutritional value and functional properties improved upon the addition of any flavor. A flavored ice cream has one or several flavored ingredients. Its flavor comes from a mixture of one or more products, such as cream, fruit, fruit juice, fruit pulp or paste, fruit juice concentrate, soluble coffee, ground cocoa, vanilla, vanillin, and processed hazelnut, which are commonly used in milk-based ice cream [1]. In addition, the increased consumption of ice cream in the summer months, especially for individuals who do not have milk drinking habits, is beneficial in terms of both nutrition and the dairy sector.

The direction of the recently reported studies has focused on the development of ice cream formulations for the market. Therefore, researchers have begun to study the detection of the sensory and rheological properties of ice creams produced using these new formulations. The investigation of the rheological properties of foods is of the utmost importance for process regulation, evaluation, structural organization of foods and consumer pleasure [2, 3].

Özet

Bu çalışmada, dört farklı dondurma üreticisinden her bir dondurma çeşidinden toplam 36 numune toplanmış ve üç farklı zamanda bazı reolojik ve kimyasal özellikler belirlenmiştir. Dondurmanın farklı aromaları açısından pH, kuru madde, yağ, protein, hacim artışı, ilk damlama zamanı, L *, a * ve b * değerleri arasındaki farklar istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Tüm örnekler, Newton yasalarına uygun olmayan davranış ve psödoplastik akış davranışı göstermektedir. 20 °C'de 50 s⁻¹ kesme hızı altında görünen viskozite, çikolata, çilekli ve vanilyalı dondurma örnekleri için sırasıyla 7.72-2.17 Pa•s, 0.14-0.85 Pa•s ve 0.59-1.28 Pa•s olarak belirlenmiştir. Temel bileşen analizi (PCA) ve hiyerarşik küme analizine (HCA) göre, dondurmaların çeşit özellikleri aynı olsa da dondurmaların farklı özelliklerde üretildiği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Aromalı dondurma, Reolojik özellikler, Duyuşal değerlendirme

Tekinsen [4] states that 240 kinds of ice cream can be found in the ice cream sector. The most consumed types of ice cream contain vanilla (or vanillin), chocolate (or cocoa) and fruit (strawberry, lemon, etc.). There are many studies on the development of new ice cream formulations with different ingredients, such as cola extract [5], black tea and herbal tea [6], being used. There are also studies on how different substances affect the consistency of ice cream [3, 7] and how fat substitutes affect the freezing properties of ice cream [8].

Although the chemical, structural and microbiological properties of ice creams vary according to the parameters used in their production, the structural and chemical properties of the flavorings used in the production of ice cream and their effect of the usage rates are very important. The aim of this study is to identify and compare some of the chemical, sensory, textural, and rheological properties of ice creams containing different flavors that are presently consumed in the current market.

2 Material and methods

2.1 Materials

All research materials were obtained from four small and medium-sized ice cream producers located in Isparta

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: bediasimsek@sdu.edu.tr (B. Şimşek)

Geliş / Recieved: 07.04.2021/ Kabul / Accepted: 20.04.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.911167

Province-Turkey. Three samples of flavored ice cream were collected from each producer on three different occasions: Vanilla (or vanillin), chocolate and strawberry. With this arrangement, a total of 36 samples were analyzed.

The samples were placed in sterile glass jars and the rheological, physical, and chemical analyses were carried out immediately after they were brought to the laboratory in accordance with Turkish Standard [9].

2.2 Methods

2.2.1 Physicochemical analysis

The total solids, fat, and protein content in the ice cream samples were analyzed according to Official Methods of Analysis [10]. The pH values of the ice cream samples were measured using a pH-meter combined with a glass electrode (WTW pH 315 (Weilheim, Germany)).

2.2.2 Melting characteristics

Melting behaviour which indicative of the melting properties and first dropping time, were detected using samples stored at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. The melting properties were carefully analysed in the ice cream samples weighing about 60 g which placed onto a 1 mm stainless steel screen placed over a cup. The amount of ice cream drained into the cup was measured at $26 \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. The first dropping time of samples was also determined [11]. The melting time was calculated according to the amount of melted ice cream collected after the first drop over 4 h [12].

The overrun was calculated as the ratio of the weight of the ice cream mix to its weight after freezing. The formula given as follows was used in the calculate of overrun;

Overrun (%) = (weight of ice cream mixture) – (weight of ice cream) $\times 100 \times$ (weight of ice cream) $^{-1}$ [13].

2.2.3 Color measurements

The color of the ice cream samples was measured using a colorimeter (Minolta (CR-400), Japan) as the L^* (the lightness from black to white on a 0–100 scale), a^* (red (+) or green (-)) and b^* (yellow (+) or blue (-)) values.

2.2.4 Textural analysis

Samples were stored at $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 24 hours before determining the hardness in ice creams. A texture analyser (Stable Microsystems Ltd, TA-XT2i, Surrey, UK) was used to determine the textural properties of the samples. Measurements were determined in five measurements with a 36 mm stainless steel cylindrical probe (P / 36R) attached to a 2 kg load cell. The penetration depth was set to 10 mm and the penetration speed to 2.0 mm / s in the analyses.

2.2.5 Rheological measurements

A rotational viscometer (Model DV-II-pro; Brookfield Engineering Inc., MA, USA) equipped with a UL small sample adapter was used to measure the viscosity of samples. The viscosity measurements were carried out in all ice cream samples at $10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

The shear rate, shear stress and apparent viscosity value of samples were determined. Consequently, the consistency index and power law model (Eq (2)) were recorded [14]:

$$\eta = K\dot{\gamma}^{n-1} \quad (1)$$

where η is the apparent viscosity (Pas), K is the consistency coefficient (Pa sn), $\dot{\gamma}$ is the shear rate (s^{-1}) and n (dimensionless) is the flow behaviour index.

The apparent viscosity of the ice cream samples was calculated at a shear rate of 50 s^{-1} ($10\text{ }^{\circ}\text{C}$), which represents the sensing shear rate in the mouth of low viscosity foods [15].

2.2.6 Sensory assessment

Eleven experienced panelists were selected and trained to evaluate their sensory characteristics (two sessions) [16-18].

While the texture, appearance, and flavor of the samples were evaluated together, their melting properties were determined separately. Ice cream samples, coded using random numbers, were evaluated by panellists in special cabinets.

The ice cream was preserved at -15 for 24 hours before being the sensory evaluation. The samples were given to the panellists in plastic plates in the form of two balls in approximately 20 g portions. The intensity of the flavor was evaluated by its sweet, acidic, insipid, milk and cream characteristics. The texture was evaluated using five descriptors including gummy, stickiness, fragile, frosted and orodispersible structure. The appearance was evaluated using the terms glossy, moire and granular.

To determine the melting quality, 10 g of each ice cream sample was left at room temperature for 15 minutes to thaw. In addition, the appearance, texture, odor, flavour, and general acceptability of ice cream samples were evaluated using a 5-point scale (1 = unpleasant, non -acceptable, 5 = pleasant, no criticism).

2.2.7 Statistical analyses

All analyzes applied to ice cream were repeated three times. SPSS 17.0 was used for the statistical evaluation of the analyzes. Variance analysis was applied to the results, and Tukey test was used to determine the differences within the groups. In addition, the statistical evaluation of the data was made with one-way ANOVA.

Principal component analysis and cluster analysis were implemented to investigate the correlation between the instrumental and sensory properties and used to find the similarities between the flavored ice cream samples.

3 Results and discussion

3.1 Chemical and physical properties

While ice cream is a dairy product with high nutritional value, its chemical properties may vary depending on the ingredients used in its production. In particular, the quality of the flavorings as well as the composition and freshness of the milk used in the production of ice cream directly affect the product's properties. The materials used in the production of ice cream can affect the acidity of the ice cream mixture. In this study, it was observed that the pH values of the ice creams obtained from the different manufacturers varied between pH 3.49 and 7.37 (Table 1). The pH value of the strawberry ice cream samples was significantly different from those of the vanilla and chocolate

ice cream samples ($p < 0.05$). The main reasons for this difference can be ascribed to the use of fruit, the acidity and the amount of the fruit used in production and the use of cocoa or chocolates from different sources [19]. It is also thought that the use of cocoa in the production of ice cream obtained from different sources creates this difference. The acidity of the ice cream mixture is affected because alkaline cocoa powder adjusted to pH 8.0 is commonly used instead of natural cocoa powder, which has a pH value of 5.0-5.8.

The composition and processing of the mixture used in ice cream production is extremely important in terms of the ice cream's quality. It would be good to comment the results of overrun, fat and dry matter according to the Turkish Food Codex. The dry matter values of the ice cream samples used in the study were determined to be between 32.13 and 44.09% (Table 1). In a study on fruit ice cream, it was determined that the dry matter contents changed between 29.64 and 34.36% in strawberry ice [20]. In the same study it was also found that the dry matter values varied between 27.72 and 37.79% in lemon ice cream, 29.38-40.33% in sour cherry ice cream. The dry matter values of the samples vary depending on the composition of the milk and the materials used during the production process, depending on whether the flavoring is fibrous or juicy, the use ratio or the powder form, which can increase the dryness as well as the pasteurization temperature and duration.

Milk fat is an important component in the structure and flavor of ice cream. The lowest fat level in the ice cream samples studied was 0.10% (C3). The fat content in the strawberry ice cream samples was significantly different to those of the other samples ($p < 0.05$). In a study on fruit ice cream, it was determined that the fat content of the samples varied between 0.5-2.6% in lemon ice cream, 0.6-3.8% in sour cherry ice cream and 0.2-2.4% in strawberry ice cream [20].

Another important component in addition to the fat content in regard the structural properties of ice cream is the protein content. In our study it was determined that the protein content of chocolate ice cream was higher than those of the other ice cream samples. The highest protein content was found in the K1 sample (5.503%) and the lowest protein content was found in strawberry ice cream (0.631%) (Table 1). The use of milk and/or dairy products in the ice cream mixture also affects the protein content. In a study on Kahramanmaraş type ice cream, it was reported that the protein content changed between 3.49 and 3.60% [21]. In a study on fruit ice cream, it was determined that the protein content in the samples studied varied between 0.62 and 2.6% in lemon ice cream, 0.71-3.8% in sour cherry ice cream and 0.21-2.4% in strawberry ice cream [20].

During the production of ice cream, the overrun refers to the increase in volume when the liquid is mixed with air during the churning process. In the ice cream samples studied, the overrun varied between 28.42 and 46.97% in vanilla ice cream, 24.02-33.73% in chocolate ice cream and 30.86-32.67% in strawberry ice cream (Table 1). In our study, there was no statistically significant difference between the overrun values obtained for the other ice creams samples except for vanilla ice cream ($p < 0.05$). Celik et al.

(2010) determined the overrun was 35.93-48.94%, while Tekinsen & Karacabey [4] determined the overrun value in ice cream was between 27% and 38%. In Kahramanmaraş type ice cream, Guven et al. [22] determined the overrun to be 21.74%.

When the first dripping property was examined, and its durability during consumption, it was determined that the samples showed a value between 8.24-17.92 min (Table 2). In general, it was observed that the vanilla and chocolate ice creams tend to melt faster than strawberry ice cream. Atsan and Caglar [23] found that the first dripping time in the control sample was 58.97 min in their study on the effects of different emulsifiers during ice cream production.

Similarly, it was also stated that the different fat substitutes added to the ice cream mixture have a significant effect on the penetrometer values of Maras ice cream, including the first dripping times and complete melting times, and the melting rates [24].

The full melting values of the ice creams obtained from the different places of production are given in Table 2. The complete melting values of samples varied between 45.39 and 61.13 min and the statistical difference between the samples was significant ($p < 0.05$). Antepuzumu (2005) determined the full melting value as 2.72-41.24 min in ice creams prepared with the addition of different honey components, while the stabilizers used in different types of ice cream is especially important, it is stated that the fat content in the ice cream composition is also an important factor for its melting time [25].

The color obtained from ice cream technology should also reflect the product's characteristics. Nowadays, as color analysis, most CIE L*, a* and b* color values are examined. As shown in Table 2, the L* value ranged from 71.26 to 86.39 in vanilla ice cream, 34.62-44.38 in chocolate ice cream and 46.67-82.16 in strawberry ice cream. Our statistical evaluation showed that the L* values varied between the varieties ($p < 0.05$), whereas the L* values obtained for the ice cream samples from the different manufacturers were not statistically significant ($p > 0.05$).

In some previous studies, the L* values of lemon fiber ice creams were measured to be 78.21-85.57 (Dervisoglu & Yazici, 2006) and strawberry flavored ice creams containing soy concentrate were measured to be between 72.34 and 77.7 ice cream are especially important, it is stated that the fat content in the ice cream composition is also an important factor for its melting time [26].

The a* values obtained from the measurements made from the outer section of the flavored ice creams produced by the different manufacturers are given in Table 2. The a* values of the samples were found to change between 1.99 - 5.94 in vanilla ice-cream, 11.61-13.13 in chocolate ice-cream and 20.68-35.14 in strawberry ice-cream. This value was determined by Dervisoglu and Yazici [5] to be between 3.55-4.43 in fruit-fiber ice cream

The b* values were determined to be between 9.53 and 23.47 for vanilla ice cream, 6.80-9.82 for chocolate ice cream and 4.28-23.47 for strawberry ice cream (Table 1). The b* value in kefir ice cream was measured to be between 1.41 and 6.58 [27]. In a study on fruit-flavored yogurt, the b

* values were found to be in a narrower range (0.74 and 3.46) than those observed in our study [28]. The formulation of the ice cream mixture, the coloring ability of the fruit used in the product, the manner in which the flavors are obtained and their coloring properties, the maturity ratings of the fruits, the heat treatment grades and times applied during processing, the product preservation conditions, and the chemical degradation of the fruits affect the color quality of the final product.

It has been reported that there is an inverse relationship between the overrun and hardness, and ice cream samples

with low overrun values show harder structures [29]. The hardness measurement results obtained using the texture analyzer are given in Table 2. According to the hardness measurements, the chocolate sample K2 (144.18 N) and the vanilla sample V2 (144.19 N) have the highest values. The lowest hardness value was detected in strawberry ice cream sample C2 (38.47 N).

The hardness values of the ice cream types differed according to the statistical evaluation ($p < 0.05$), but it was determined that there was no significant difference between the hardness values observed for the different manufacturers.

Table 1. Physicochemical properties of flavored ice cream samples

Sample	pH	Total Solid %	Fat%	Protein %	Overrun %
V1	6.31±0.38 ^b	37.38±0.77 ^{bc}	3.65±0.70 ^a	4.84±1.17 ^a	28.42±1.74 ^b
V2	6.56±0.08 ^{ab}	33.94±0.35 ^c	3.21±0.25 ^a	4.16±1.13 ^a	46.97±3.50 ^a
V3	6.48±0.38 ^{ab}	34.84±0.49 ^c	3.78±0.51 ^a	4.38±0.66 ^a	30.97±2.30 ^b
V4	6.66±0.06 ^{ab}	35.21±0.93 ^c	3.60±0.52 ^a	4.29±0.22 ^a	31.74±5.19 ^b
K1	6.68±0.43 ^{ab}	44.09±1.44 ^{bc}	4.10±0.65 ^a	5.50±0.93 ^a	28.02±2.20 ^b
K2	7.32±0.08 ^a	35.37±0.29 ^c	3.08±0.42 ^a	3.92±0.52 ^{ab}	33.73±6.61 ^b
K3	6.47±0.40 ^{ab}	36.65±0.66 ^c	3.51±0.52 ^a	4.33±0.19 ^a	28.65±4.83 ^b
K4	7.37±0.10 ^a	37.52±0.19 ^c	3.11±1.05 ^a	4.29±0.22 ^a	24.67±2.72 ^b
C1	4.22±0.31 ^d	34.21±3.81 ^a	0.73±0.45 ^b	1.16±0.67 ^{bc}	32.25±5.81 ^b
C2	5.26±0.70 ^c	34.63±3.58 ^{ab}	4.36±1.27 ^a	2.81±1.00 ^{abc}	31.83±1.18 ^b
C3	3.49±0.05 ^d	32.13±0.93 ^a	0.10±0.0 ^b	0.63±0.35 ^c	30.86±4.52 ^b
C4	5.27±0.10 ^c	34.51±0.35 ^{bc}	2.93±0.50 ^a	4.63±2.11 ^a	32.67±1.87 ^b

V: vanilla ice cream, K: chocolate ice cream, C: strawberry ice cream

* a, b, c Means within a row with different lowercase letters show significant differences between ripening materials, $P < 0.05$

Table 2. Melting, color and hardness properties of ice cream samples

Sample	First Dripping time (min)	Melting time (min)	L*	a*	b*	Hardness (N)
V1	8.24±3.45	48.15±4.82 ^{bc}	84.75±0.45 ^a	2.73±0.09 ^d	9.53±0.64 ^{ab}	90.75±93.38 ^{ab}
V2	9.20±6.89	53.75±2.56 ^{abc}	83.19±0.53 ^a	2.17±0.11 ^d	9.93±1.15 ^{ab}	144.19±82.44 ^{ab}
V3	8.71±3.63	58.50±3.47 ^{ab}	71.26±20.08 ^{ab}	1.99±0.94 ^d	9.48±5.17 ^{ab}	77.49±25.46 ^{ab}
V4	12.24±2.19	57.82±5.91 ^{ab}	86.39±1.14 ^a	5.94±0.40 ^d	13.47±2.04 ^{ca}	74.85±68.25 ^{ab}
K1	13.00±6.67	45.39±1.20 ^c	34.62±2.51 ^c	11.92±0.14 ^{cd}	6.80±2.25 ^{cd}	85.93±68.25 ^a
K2	14.07±3.71	56.54±2.86 ^{abc}	39.80±3.63 ^c	13.13±1.63 ^{bcd}	8.18±1.67 ^c	144.18±75.87 ^a
K3	19.68±5.07	50.05±2.69 ^{abc}	44.38±1.82 ^c	12.94±0.74 ^{bcd}	9.82±1.78 ^{ab}	113.37±13.41 ^a
K4	15.37±2.16	50.62±0.74 ^{abc}	37.34±3.64 ^c	11.61±1.69 ^{cd}	7.58±0.97 ^{cd}	115.53±27.44 ^a
C1	13.88±2.77	52.37±3.48 ^{abc}	50.20±12.85 ^{bc}	33.73±3.89 ^{ab}	12.92±1.41 ^b	42.83±34.01 ^b
C2	12.76±0.93	55.15±2.51 ^{abc}	69.47±6.04 ^{ab}	20.68±13.37 ^{abc}	4.28±7.30 ^d	38.47±25.93 ^b
C3	17.92±1.79	61.13±4.29 ^a	46.67±1.55 ^c	35.94±0.40 ^a	13.47±2.04 ^a	69.89±28.24 ^b
C4	16.24±0.28	52.99±6.48 ^{abc}	82.16±1.76 ^a	31.19±0.36 ^{ab}	9.00±0.52 ^{cd}	50.70±50.27 ^b

V: vanilla ice cream, K: chocolate ice cream, C: strawberry ice cream

* a, b, c Means within a row with different lowercase letters show significant differences between ripening materials, $P < 0.05$

Using different stabilizers, Badem [30] determined the effect of these stabilizers on the ice cream quality and found that the hardness value of the ice cream prepared with 0.2% carrageenan was 157.316 N, followed by the carrageenan ice cream (140.286 N) and carrageenan-free ice cream (93.299 N).

3.2 Rheological properties

The consistency index and flow behavior index of the samples were calculated according to the power law model and apparent viscosity (Table 3). It was used to determine the flow characteristics of mixtures. All samples were found to exhibit pseudoplastic flow, where $n < 1$ (Figure 1).

The apparent viscosity decreased with an increase in the shear rate (Figure 2). The highest apparent viscosity value was found between 0.59 and 1.28 Pa.s in the vanilla ice cream samples, 0.14-0.85 Pa.s in the strawberry ice cream samples and 2.17-7.73 Pa.s in the chocolate ice cream samples on the first day of storage at 10 °C at 50 s⁻¹.

Table 3. The consistency coefficient and flow behavior index values of the ice cream mix samples at 10°C

	K	n	R ²
V1	32.0	0.62	99.28
V2	33.8	0.65	99.57
V3	34.6	0.67	99.46
V4	31.8	0.61	99,34
K1	1748	0.30	98.55
K2	1695	0.33	99.17
K3	1847	0.32	98.76
K4	1715	0.34	98.97
C1	518	0.23	99.79
C2	532	0.24	99.68
C3	545	0.28	99.47
C4	498	0.22	99.86

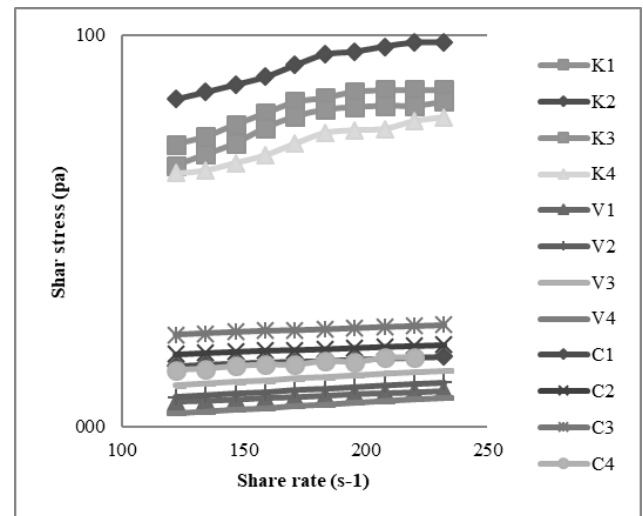
Errors in η , K and n were $\pm 1\%$, $\pm 1\%$, and $\pm 2\%$, respectively

V: Vanilla ice cream C: Strawberry ice cream, K: chocolate ice cream

The visible viscosity values in the chocolate frost samples were determined to be higher than the other samples. Dervisoglu and Yazici [5] reported that they determined the apparent viscosity values to be 0.18-1.091 Pa.s at 20 °C; Karaman and Kayaciger [6] measured the apparent viscosity to be 1.13 Pa.s at 10 °C.

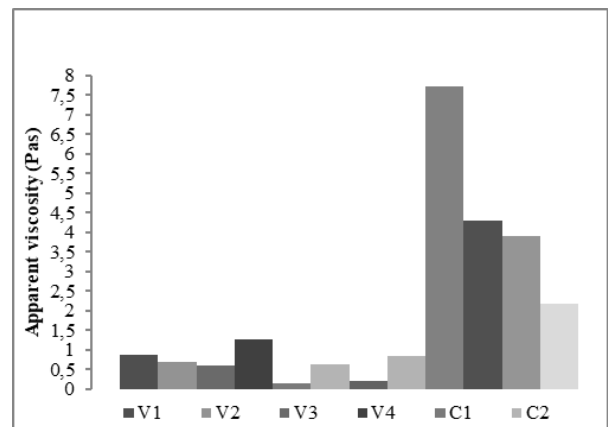
The flow behavior index was found to be 0.61-0.67 in vanilla ice cream at 10 °C, 0.30-0.34 in chocolate ice cream and 0.22-0.28 in strawberry ice cream in the yoghurt ice cream samples (Table 3).

The flow behavior index was the highest in vanilla ice cream and the lowest in strawberry ice cream. Kaya and Tekin [3] determined the n value to be between 0.77 and 0.96 in sahlepl ice cream with different ratios. Karaman and Kayaciger [6] reported that the flow behavior index in ice cream mixtures ranged from 0.269 to 0.356 at 20 °C.



V: vanilla ice cream, K: chocolate ice cream, C: strawberry ice cream

Figure 1. Apparent viscosity and share rate relationship of ice cream samples



V: vanilla ice cream, K: chocolate ice cream, C: strawberry ice cream

Figure 2 Apparent viscosity and share rate relationship of ice cream samples

The consistency index was the lowest in the vanilla ice cream samples (31.8-34.6 Pa.s) followed by strawberry ice cream (518-545 Pa.s) and chocolate ice cream (1695-1847 Pa.s). The difference between the K and n values was evaluated by variance analysis and the difference was found to be statistically significant ($p < 0.05$). The value of the consistency index in chocolate ice cream was significantly higher than the other samples. Kaya and Tekin [3] reported that the consistency index was determined to be between 66.65 and 540.62 in samples containing 0.78% sahlepl. Karaman and Kayaciger [6] determined the consistency index was 11-19.90 Pa.s at 20 °C in ice creams containing different aroma compounds (herbal tea and black).

3.3 Sensorial properties

Some sensory properties (color, appearance, texture, odor and taste) of flavored ice cream are given in Table 4. While the statistical difference between the color appearance, odor and taste properties is not significant

between the samples, it was seen that the difference between the texture properties was significant ($p < 0.05$).

Principal component analysis was applied to demonstrate the state of the properties of the ice cream samples and shown in Figure 3. The variance of the first two axes is greater than 1, the eigenvalue value of the first principal component is 7.422 and explains 42.47% of the total variance. Axis 2 (PC2) describes 20.50% of the variance. The sum of the first two axes describes 62.97% of the variance.

The primary major component has the same sign and was sorted by the distance from zero corresponding to the frosted structure (-0.35), smooth structure (-0.34), acidic flavor (-0.27), milk flavor (0.35), creamy flavor (0.35) orodispersibility (0.33), gummy structure (0.29) and sticky structure (0.25). The second major component is the insipid flavor (-0.32), glossy appearance (0.55), moire appearance (0.53) and granular appearance (0.40).

According to these results, the major component scores for the vanilla ice cream samples were positive (2.87, 0.95, 2.30 and 3.17), the chocolate ice cream samples were negative and positive (0.15, -1.80, 0.14 and -2.22) and the strawberry ice cream samples were positive and negative (-1.37, 5.93 and 0.85), while the second component scores were positive in the V1, C1, C3, V4 and K4 samples (1.98, 3.43, 0.18, 1.62 and 1.11) and have negative values in the other samples. According to these results, while the vanilla ice cream samples (V1, V4) were granular in appearance and gummy and fragile in structure (orodispersibility), the milk taste was creamy and without a sticky structure; the most prominent features in the K1, K3, V2, C2, C4 and V3 sample. The C1 and K4 samples were moire, glossy, acidic and sweet flavored, whereas K2 had an insipid flavor with a smooth structure.

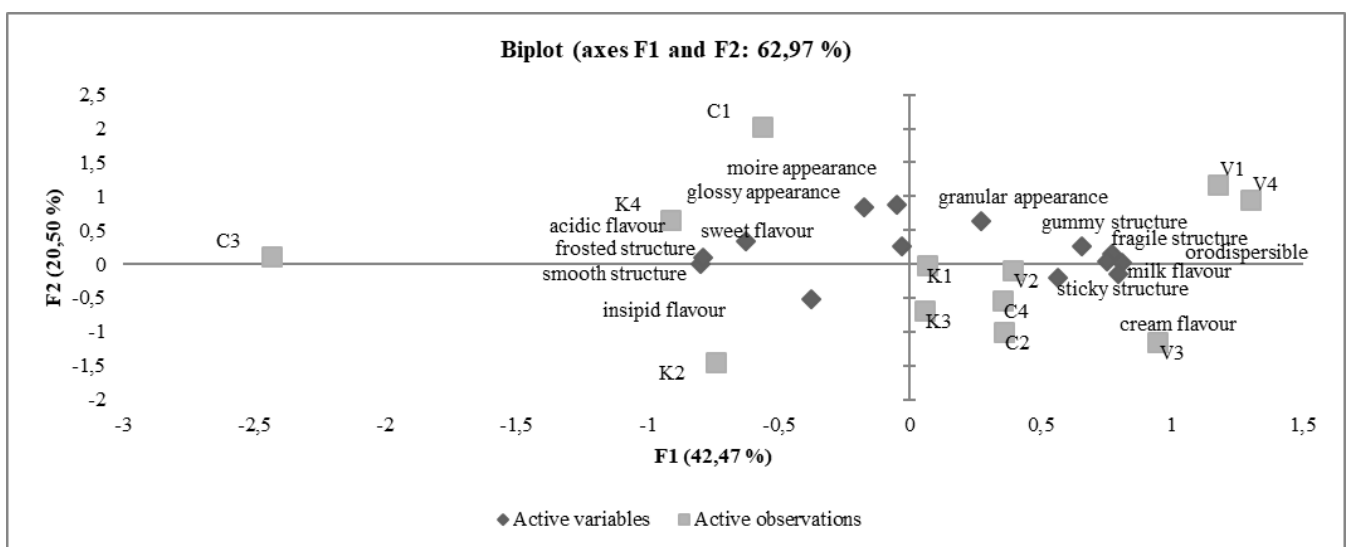
In the cluster analysis used to determine the degree of closeness of the ice cream samples taken from the different

types and different manufacturers, it was seen that the samples can be divided into 3 groups. When the related dendrograms were examined, the first group consists of the sample areas C1, C2, C4, C3 and V4 in I1, V1, K3, K1 and V3 in I2 and the other groups V2, K2 and K4 in I3.

Table 4. Sensory results of flavored ice cream

	Color and Appearance	Structure	Odor and Flavor	Total
V1	4.40±0.51	3.63±0.44 ^{ab}	3.65±0.71	11.69
V2	4.16±0.32	3.66±0.35 ^{ab}	3.98±0.36	11.82
V3	3.38±0.57	3.50±0.07 ^{ab}	3.61±0.32	10.50
V4	4.29±0.63	4.21±0.32 ^a	3.70±0.63	12.21
K1	3.95±0.50	3.75±0.66 ^{ab}	3.67±0.09	11.38
K2	3.67±0.36	3.66±0.45 ^{ab}	3.17±0.43	10.52
K3	3.27±0.14	3.40±0.22 ^{ab}	3.53±0.34	10.21
K4	4.34±0.67	4.38±0.64 ^a	4.11±0.48	12.84
C1	3.84±0.35	3.92±0.53 ^{ab}	4.16±0.40	11.94
C2	3.69±0.82	4.11±0.48 ^{ab}	3.85±0.65	11.66
C3	3.27±0.28	2.90±0.29 ^b	2.94±0.27	9.11
C4	3.61±0.65	4.11±0.33 ^{ab}	3.60±0.62	11.34

V: Vanilla ice cream C: Strawberry ice cream, K: chocolate ice cream
 * a, b: Means within a row with different lowercase letters show significant differences between ripening materials, $P < 0.05$



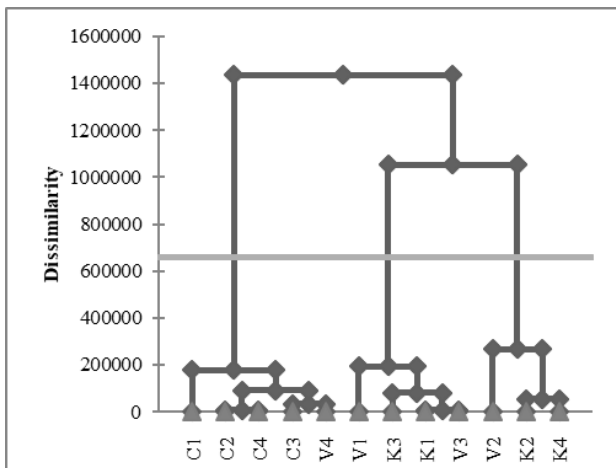
V: Vanilla ice cream C: Strawberry ice cream, K: chocolate ice cream

Figure 3. Principal components analysis of ice cream (sensory attributes data) as they affected by different flavor (vanilla, chocolate, and Strawberry) presence and storage time

While the vanilla and chocolate samples were found to be partially related to each other due to their sensory and textural properties, the strawberry ice cream samples showed similarity among themselves. The cream and milk flavor, and sticky structure. The C1 and K4 samples were more, glossy, acidic and sweet flavored, whereas K2 had an insipid flavor with a smooth structure.

In the cluster analysis used to determine the degree of closeness of the ice cream samples taken from the different types and different manufacturers, it was seen that the samples can be divided into 3 groups. When the related dendrograms were examined, the first group consists of the sample areas C1, C2, C4, C3 and V4 in I1, V1, K3, K1 and V3 in I2 and the other groups V2, K2 and K4 in I3. While the vanilla and chocolate samples were found to be partially related to each other due to their sensory and textural properties, the strawberry ice cream samples showed similarity among themselves.

It has been determined that the vanilla, chocolate, and strawberry ice creams from four different producers have different flavor profiles from each other and are located separately in Figure 4. The samples with similar aroma profiles were determined at different locations in close proximity to each other as a result of the basic component analysis and at different locations for the ice cream samples with different aroma profiles. This shows us that different types of formulations can be used to produce ice cream even if the type properties are the same.



V: Vanilla ice cream C: Strawberry ice cream, K: chocolate ice cream

Figure 4. Inspection of the similarities among flavoured ice cream based on sensory properties data using cluster analysis

Soukoulis et al. [15] used key component and cluster analyses to determine the characteristics of ice cream and determine the degree of closeness in their studies. This explains the relationship between an ice cream's features and stabilizers.

4 Conclusions

Producers are producing ice cream with different characteristics and varieties according to consumer demand.

In this study, the chemical, rheological, textural and sensory properties of vanilla, chocolate and strawberry flavored ice cream in the market, which is thought to be widely produced, were determined and compared. Strawberry ice cream has a low fat and protein content and a relatively high acidity. It has been determined that there are very different color changes in the similar types of ice cream, and that the hardness properties show similarity between their types. In all the types of ice cream studied, a non-Newtonian pseudoplastic flow type was determined but different consistency coefficients were measured. Our sensory analyzes and statistical evaluations suggest that ice creams were produced with different properties, even if they have the same type characteristics.

Acknowledgments: This study was supported with 2841-M-11 number by Suleyman Demirel University Scientific Research Department.

Conflict of interest: The authors declare that they do not have any conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 18 %

References

- [1] F. Coskun, Determination of fecal contamination in mere and strawberry ice cream sold in Tekirdag Province. Tekirdag Journal of Agriculture Faculty, 2 (2), 135-142, 2005.
- [2] Ş. İbanoğlu and E. İbanoğlu, Rheological characterization of some traditional Turkish soups. Journal of Food Engineering 35, 251-256, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(98\)00016-8](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00016-8)
- [3] S. Kaya and A. R. Tekin, The effect of salep content on the rheological characteristics of a typical ice-cream mix. Journal of Food Engineering, 47, 59-62, 2001.
- [4] O. C. Tekinşen ve A. Karacabey, Bazı stabilizer karışımlarının Kahramanmaraş tipi dondurmanın fiziksel ve organoleptik nitelikleri üzerine etkisi. TÜBİTAK Proje No: VHAG-594, Ankara, 48 s., 1984.
- [5] M. Dervişoğlu and F. Yazıcı, The Effect of Fibre on the physical, chemical and sensory properties of ice cream. Food Sci. Tech. Int. 12 (2), 159-164, 2006. <https://doi.org/10.1177/1082013206064005>.
- [6] S. Karaman and A. Kayacıger, Rheology of ice cream mix flavored with black tea or herbal teas and effect of flavoring on the sensory properties of ice cream. Food and Bioprocess Technology 5(8), 3159-3169, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0713-5>
- [7] C. Cogne, J. Andrieu, P. Laurent, A. Besson and J. Nocquet, Experimental data and modelling of thermal properties of ice creams. Journal of Food Engineering, 58, 331-341, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00396-5](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00396-5)
- [8] Z. Li, R. H. Marshall and H. L. Fernando, Effect of milk fat content on flavor perception of vanilla ice cream. J. Dairy Sci. 80, 3133-3141, 1997.
- [9] TS 4265- Dondurma – Süt Esaslı, Türk Standartları Enstitüsü. Ankara, 1992.

- [10] A.O.A.C (Official Methods of Analysis), 17th Ed., Association of Official Analytical Chemist Virginia, USA, 2002.
- [11] P. S. Christiansen, D. Edelsten, J. R. Kristiansen, and E. W. Nielsen, Some properties of ice cream containing *Bifidobacterium bifidum* and *Lactobacillus acidophilus*. *Milchwissenschaft*, 51, 502-504, 1996.
- [12] A. Koyun, Endüstriyel dondurma üretiminde yağsız süt tozu yerine, peyniraltı suyu protein konsantresi kullanımının dondurmaya uygunluğunun araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2009.
- [13] R. T. Marshall, H. D. Goff and R. W. Hartel, *Ice cream*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 2003.
- [14] Z. Xuewu, L. Xin, G. Dexiang, Z. Wei, X. Tong and M. Yonghong, Rheological models for xanthan gum. *Journal of Food Engineering* 27, 203-209, 1996. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(94\)00092-1](https://doi.org/10.1016/0260-8774(94)00092-1)
- [15] C. Soukoulis, I. Chandrinou and C. Tzia, Study of the functionality of selected hydrocolloids and their blends with K-carrageenan on storage quality of vanilla ice cream. *Food science and technology*, 41, 1816-1827, 200, <https://doi:10.1016/j.lwt.2007.12.009>.
- [16] F. W. Bodyfelt, J. Tobias, and G. M. Trout, *The sensory evaluation of dairy product*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1988.
- [17] J. X. Guinard, C. Zoumas-Morse, L. Mori, B. Uatoni, D. Panyam and A. Kilara, Sugar and fat effects on sensory properties of ice cream. *Journal of Food Science*, 62, 1087-1094, 1997. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1997.tb15044.x>.
- [18] M. Meilgaard, G. Vance, B. Civille and T. Carr, *Sensory Evaluation Techniques*. CRS press, US, 2007.
- [19] S. Evrensel ve E. Güneş, Bursa'da tüketilen dondurmaların kimyasal ve mikrobiyolojik kalitesi. *Gıda*, 23 (4), 261-265, 1998.
- [20] T. Özcan, ve E. Kurdal, Bursa ili merkezinde satılan meyveli dondurmaların kimyasal ve mikrobiyolojik nitelikleri üzerine araştırma. *Gıda*, 22 (3), 217-225, 1997.
- [21] F. Antepüzümü, Bal ve glukoz şurubu kullanımının Kahramanmaraş tipi dondurmaların kalite üzerine etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2005.
- [22] M. Güven, O. B. Karaca, A. Kaçar, A. A. Hayaloğlu ve K. Yaşar, Farklı stabilizörlerle üretilen Kahramanmaraş tipi dondurmaların fiziksel kimyasal ve duyu özellikleri. *Çukurova Üni. Ziraat Fak. Dergisi*, 18 (1), 1-8, 2002.
- [23] E. Atsan ve A. Çağlar, Dondurmanın bazı fiziksel ve duyu özellikleri üzerine farklı emülgatörlerin etkisi, Atatürk Üniv. Ziraat Fak. Derg. 39 (1), 75-81, 2008.
- [24] M. Güven, O. B. Karaca ve A. Kaçar, Yağ ikame maddelerinin yağ oranı azaltılmış Maraş usulü dondurmaların özellikleri üzerine etkileri. *Çukurova Üni. Ziraat Fak. Dergisi*, 23 (1), 7-14, 2008.
- [25] M. R. Muse, and R. W. Hartel, Ice cream structural elements that affect melting rate and hardness. *Journal of Dairy Science*, 87 (1), 1-10, 2004.
- [26] M. Dervişoğlu, F. Yazıcı, and O. Aydemir, The effect of soy protein concentrate addition on the physical, chemical, and sensory properties of stawberry flavored ice cream. *European Food Research and Technology* 221, 446-470, 2005. <https://doi.org/10.1007/s00217-005-1207-3>.
- [27] C. Aliyev, Kefir ve yaban mersininin dondurmanın fizikokimyasal, duyu ve mikrobiyolojik özelliklerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2006.
- [28] M. K. Walker, D. F. Farkas, V. Loveridge and L. Meunier-Goddik, Fruit yogurt processed with high pressure. *International Journal of Food Science and Technology* 40, 1-4, 2005. <https://doi:10.1111/j.1365-2621.2005.01084.x>.
- [29] R. A. Wilbey, T. Cooke, and G. Dimos, Effects of solute concentration, overrun and storage on the hardness of ice cream. *Proceedings of the International Symposium Held in Athens, Greece*, 18-19 September 1997.
- [30] A. Badem, Keçiyoynuzlu pekmezli dondurma üretiminde kullanılan karragenan, ksantan ve keçiyoynuzu zamklarının dondurmaların kaliteleri üzerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2006.





Some physicochemical, textural properties and acrylamide contents of chips produced from the teleme of white cheese

Beyaz peynir telemesinden üretilen cipslerin fizikokimyasal, tekstürel özellikleri ve akrilamid içerikleri

SümeYra Uğur¹ , Bedia Şimşek^{2,*} 

^{1,2} Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümü, 32260 Isparta Türkiye

Abstract

The aim of this study is to evaluate some properties (acrylamide content, textural, and sensory) of cheese chips produced from the teleme of white cheese. Cheese chips were flavored with sucrose and stevia, salt, and evaluated against the control group (without salt, stevia, and sucrose). Cheese dough formulations were thinned to the thickness of chips and turned into round-shaped chips and fried in the oven at the specified temperature and time (180 °C, 6 min.). The produced chips were packed and stored at + 4 °C for 30 days. The difference between chips and storage time of pH, lactic acid (%), and water activity analysis was found to be statistically significant ($p < 0.05$). The sucrose (CSU) added chips were determined to be harder but less brittle than the stevia added chips (CST). The acrylamide value was found between 0.218 ppm and 0.573 ppm (with sucrose sample) in cheese chips. The acrylamide content of cheese chips was determined below the legal limit. All chips produced were found to be generally acceptable. Starting from the most liked according to the total sensory score, the ranking is as follows; saline (CSA), control (CNA), stevia (CST), and sucrose (CSU) sample.

Keywords: Cheese chips, white cheese, Acrylamide, Stevia

1 Introduction

Ready for immediate consumption, long shelf life, easily transportable chips, biscuits, nuts, crackers, etc. products are called snack foods [1]. Most of these foods are of cereal origin, high fat and sucrose content, low nutritious and fried products [2]. Chips are the most important group among snack foods. Potato chips are among the most consumed chips [3]. At the same time, as an alternative to potato chips, chips were produced from different raw materials such as wheat chips [4], tarhana chips [5], corn chips [6], gluten chips [7], and carrot chips [8].

Turkish white cheese is obtained by pasteurizing raw cow's milk, adding calcium chloride and mesophilic starter culture, coagulating with proteolytic enzymes, separating whey from the curd, and shaping of the curd [9]. Different cheeses have been used in snack production by some

Özet

Bu çalışmanın amacı, beyaz peynirinin telemesinden üretilen peynir cipslerinin bazı özelliklerini (akrilamid içeriği, tekstür ve duyuşal) değerlendirmektir. Peynir cipsleri şeker, stevia, tuz ile tatlandırılarak, kontrol grubuna (tuz, stevia ve şeker ilavesiz) karşı değerlendirilmiştir. Peynirin hamur formülasyonları cips kalınlığına kadar inceltilecek yuvarlak hale getirilerek, belirtilen sıcaklık ve sürede (180 °C, 6 dakika) fırında kızartılmıştır. Üretilen cipsler ambalajlanarak, + 4 °C'de 30 gün süreyle depolanmıştır. Cipslerin pH, laktik asit (%) ve su aktivite analizinin depolama süresi arasındaki fark istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur ($p < 0.05$). Şeker (CSU) eklenen cipslerin, stevia eklenen cipslerden (CST) daha sert ancak daha az kırılğan olduğu belirlenmiştir. Akrilamid değeri peynir cipslerinde 0.218 ppm ile 0.573 ppm (şekerli numune) arasında bulunmuştur. Peynir cipslerinin akrilamid içeriği yasal sınırın altında belirlenmiştir. Üretilen tüm cipslerin genel olarak kabul edilebilir olduğu görülmüştür. Toplam duyuşal puana göre en çok beğenilenlerden başlayarak sıralama şu şekildedir; tuzlu (CSA), kontrol (CNA), stevia (CST) ve şekerli (CSU) numune.

Anahtar kelimeler: Peynir cipsi, Beyaz peynir, Akrilamid, Stevia

researchers. Rakcejeva et al. [10] produced a snack from Cheddar cheese using a vacuum microwave dryer. In other research, puffed snacks were obtained from slicing ripened Harzer cheese. They were produced by hot air application (at 44 ± 5 °C until $72 \pm 5\%$ dry matter) in vacuum microwave dryer [11]. Liu et al. [12] were studied on textural and microstructural properties of microwave-puffed cheese chips.

Acrylamide is a molecule formed by processing carbohydrate-rich foods at high temperatures (100-120 °C and higher). Acrylamide, a potential carcinogenic substance, is formed during processes such as frying, baking, and roasting in foods, resulting in high temperature and low humidity conditions. The highest amount of acrylamide found in foods containing high amounts of carbohydrates (100-4000 µg/kg). Researchers have reported that foods with high protein content (< 100 µg/kg) have low

* Sorumlu yazar / Corresponding author, bediasimsek@sdu.edu.tr, Phone:+902462111541

Geliş / Received: 04.05.2021 Kabul / Accepted: 05.07.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.932609

acrylamide levels [13, 14]. The highest amount of acrylamide was found in potato chips (117-2762 ppb), while the lowest amount of acrylamide was determined in milk and dairy products (<10-43 ppb). It has been reported that acrylamide could not be detected in foods such as milk, butter, cheese, etc. [15]. This is due to the fact that potatoes contain high levels of asparagine amino acids and after this amino acid reacts with reducing sugars at high temperatures, thereby accelerates the formation of acrylamide [16].

Snack products such as chips are consumed by different consumers (age, gender, etc.). Therefore, snacks can be produced in different varieties such as bitter, sweet, salty, and spicy. The emergence of health-related disorders such as weight gain, metabolic syndrome and diabetes has led to increased interest in foods with reduced fat and sugar [17]. Stevia is a natural substance with properties such as 250-300 times sweeter than sucrose, stable up to 200°C, high pH stability, etc. [18].

There is no study on the production of chips produced from teleme of Turkish white cheese, containing only sucrose, stevia, and salt without any additives. In this study, it was aimed to determine whether the teleme of Turkish white cheese can be used as an alternative raw material for chips. In addition, another aim of the study is to examine the effects of sucrose, salt and stevia added to the teleme of Turkish white cheese chips on acrylamide content of the chips. Then, chemical, physical, microbiological, and sensory properties of chips were determined.

2 Materials and methods

2.1 Cheese production

In this study, the teleme of Turkish white cheeses was produced by the plant of Isparta Unsut (Isparta, Turkey). Pasteurized cow milk was used in the production of the teleme of Turkish white cheese. The method recommended by Hayaloglu et al. [9] was used in the production of teleme of Turkish white cheese. Salting was not applied to the cheeses to be used in the production of chips. Cheeses were freshly used after whey was removed.

2.2 Chips production

Stevia, (Takita, Stevia Sweetener, İzmir, Turkey), sucrose (Local market-Isparta Turkey), and salt (Local market- Isparta Turkey) were used in the production of cheese chips. No other additives were added to the cheese chips formulation. The teleme of Turkish white cheese was first cut into small pieces. Then, these pieces were kneaded by hand until they formed a smooth dough for about 10 minutes. The teleme of Turkish white cheese dough (3000 g) was divided into four equal pieces. Sucrose (20% - CSU), stevia (2% - CST), salt (4% - CSA) was added to each piece. The last piece without any addition was separated as the control group (CNA). Then, the chips dough formulations were given in round shape. Pre-drying, baking and final drying processes were applied to the chips in the drying oven (Wiseven, WOF-155, Korea) respectively as follows; 90 minutes at 55 °C, 6 minutes at 180 °C and 15 minutes at 55 °C. The chips produced are shown in Fig. 1. Cheese chips

were packaged using polyethylene (PE) packaging material, which was closed with non-vacuum only hot press application (4 pieces in each package). The chips produced are shown in Fig. 2. Cheese chips were stored at 4 °C for 30 days. Chemical, physical, microbiological, and sensorial properties of cheese chips were analyzed on the first day and 30th day of storage. This study was carried out three times.

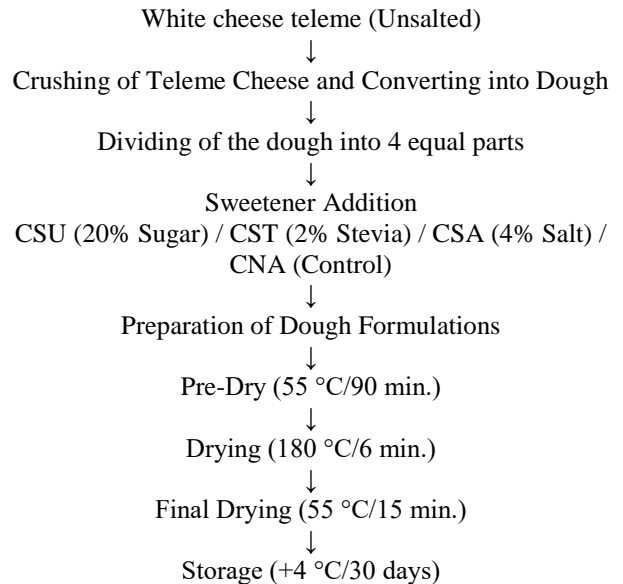


Figure 1. Flow chart of Turkish white cheese chips production

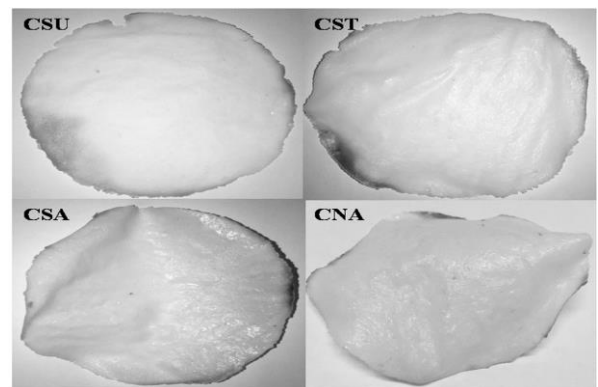


Figure 2. Turkish white cheese chips samples (CSU: sugared, CST: stevial, CSA: salted, CNA: control)

2.3 Physical and chemical analysis

Thickness and diameter of cheese chips were measured using digital calipers (0.001 mm, Mitutoyo, Tokyo, Japan) [19]. The values of dry matter, pH (Weilheim, Germany), titration acidity (LA%) and fat% were determined in the teleme of Turkish white cheese [20]. In cheese chips, dry matter [20], water activity (aw) (Novasina, Lab Touch-aw, Lachen, Switzerland), pH (Weilheim, Germany), titration acidity (LA%); fat [20] analyzes were performed. Total protein contents of cheese chips were determined by Dumathermnitrogen-determination system run under the

combustion method (Gerhardt Analytical Systems, Dumatherm, Germany) [21].

2.4 Acrylamide analysis

Sample preparation: Acrylamide analysis was performed on the 1st and 30th storage days in cheese chips. For this analysis, homogenized 1 g cheese chips sample was centrifuged at 0 °C for 20 minutes with 10 ml of 0.1N formic acid solution. After removing the upper layer of oil, 2 ml of the aqueous extract separated from the solid precipitate was taken and filtrated through a 0.45 µm filter, and then filtrated through a pre-conditioned (2 ml acetone and 2 ml 0.1N formic acid) CarboPrep™ 200 SPE tube. The solid phase extraction (SPE) tube was washed with 1 ml of water and vacuumed for 1 minute to dry the excess water. Two ml of acetone was filtrated through the vacuumed solid phase extraction (SPE) tube, the filtrate was taken into the vial. Acrylamide analysis was carried out using GC-MS device (Agilent 7890A, GC 5975C MS, 7693B Autosampler) and DB-Wax (30 m x 0.25 mm; film thickness 0.2 µm) column (selected ion monitoring-SIM) in the selective ion imaging (selected ion monitoring-SIM) mode [22]. The programs used in the analysis are as follows; Computer program MSDCHEM was used in the analysis. In the column temperature program, after waiting 1 minute at 60 °C, it reached 240 °C with an increase of 20 °C per minute and kept for 20 minutes at this temperature. Chromatographic conditions: the carrier gas is Helium (He, 1 mL min⁻¹), injection volume is 1 µL, detector and injection temperature is 240 °C and 250 °C. The standard chromatogram and calibration graph are presented in Fig. 3.

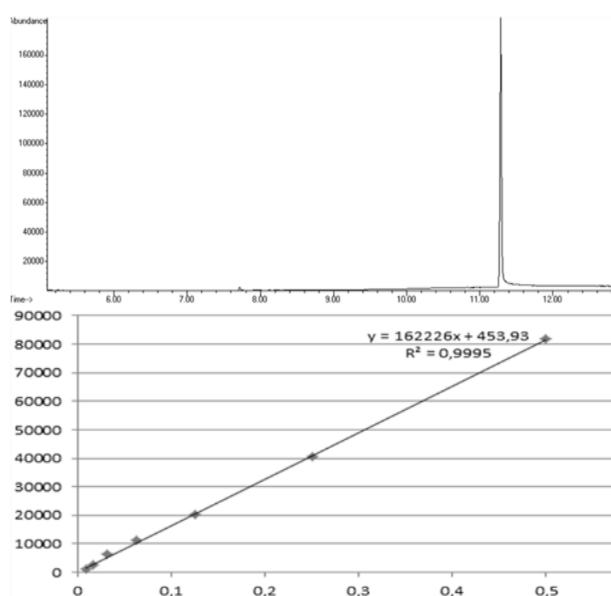


Figure 3. The calibration curve for the determination of acrylamide. Linearity of the method in standard (calibrating) solutions, (y) concentration acrylamide (mg/mL), (x) peak area (arbitrary units).

2.5 Color analysis

The color analysis of the chips samples was determined using a portable CR-400 tristimulus colorimeter (Minolta

Chroma Meter CR 400 model Osaka, Japan) and Spectra Match software, set to L*, a*, b* mode. The methods given by Hua et al. [23] were applied in the use of the colorimeter.

Color changes were documented over the duration of the experiment. L* values indicate lightness (black [L* = 0] and white [L* = 100]), a* values indicate redness-greenness (red [a* = 100] and green [a* = -100]), b* values indicate yellowness-blueness (yellow [b* = 100] and blue [b* = -100]). The L*, a*, and b* values obtained from each cheese chips at the time of sampling represent average L*, a*, and b* values calculated from three separate light pulses from the colorimeter. A white plate was used for calibration (Y=92.7, x=0.3160, y=0.3321). Each chips sample was placed on a white table, and L*a*b* color measurements were taken in triplicate.

2.6 Texture analysis

Texture analysis of chips samples were carried out using texture analysis device (Texture Stable Micro Systems, TA-XT Plus, UK). Six chips samples were used for each experiment using probe speed 1 mm/s and 7 mm distance (probe-chip surface distance) values. Three Point Bend Rig probe was used to predict the crispness of cheese chips. Hardness (N) and brittleness (mm) values of chips samples were determined. The maximum force applied to the samples was associated with the hardness of the chip, and the deformation value to which the maximum force was applied was associated with the brittleness of the chips [24].

2.7 Sensorial analysis

Sensorial evaluation was carried out by a panelist group experienced in sensorial evaluation at Süleyman Demirel University, Faculty of Engineering, Department of Food Engineering. The panelist group (10 people) consisted of 5 men and 5 women between the ages of 25-35. Samples were encoded with 3-digit randomly selected numbers. In sensorial evaluation, four types of cheese chips were served to the panelists with a glass of water. Chips samples were evaluated using descriptive words expressing color and appearance, structure and crispness, smell, taste, and general acceptability. It was applied according to the methods suggested by Lawless and Heymann [25]. Color and appearance, texture and crispness, taste and odor parameters are in the range of 1-5 points; the general acceptability parameter is scored between 1-9 points.

2.8 Statistical analysis

SPSS 22.0 statistics program was used in the statistical evaluation of this study. Tukey test (P<0.05) was used to determine the difference between the groups [26]. As Multiple Variable Analysis, Principal Component (PCA) Analysis was applied to the samples, and Xlstat Trial version (2020) package program was used for the statistical evaluation of the data.

3 Results and discussions

3.1 Some chemical properties of Turkish white cheese and chips

Chemical analysis results of Turkish white cheese used in chips production; dry matter was 36.73±1.11%, fat

14.33±0.58%, pH 5.28±0.17, titration acidity (LA%) 1.02±0.27. The results of chemical analysis of Turkish white cheese are similar to the findings of Pappa et al. [27].

Chemical and physical analysis results of cheese chips are given in Table 1. However, the dough thickness of cheese chips was the same in all samples, they were determined in the value of 0.03-0.06 mm after baking in the oven and their diameters in the value of 2.95-3.34 mm. When diameter values of the chips were analyzed statistically, the difference between the samples was not found significant ($P>0.05$). It is reported in the literature that the thickness of potato chips should be 1-2 mm in order to have good texture properties [28]. The thickness of all cheese chips is similar to the conventional thickness of the potato chips.

Dry matter content in chips samples was determined between 94.91 and 96.02. The dry matter value of gluten chips enriched with food industry by-products was determined in the range of 92.73-95.44% [7]. The dry matter values of Turkish white cheese chips are similar to the study on gluten chips.

When the fat contents of chips samples were analyzed statistically, the difference between the samples was found significant ($P<0.05$). The highest fat rate was determined in the control (CNA) sample (36.50%). The lowest fat rate was detected in chips produced with the addition of sucrose (21.00%). It is thought that the addition of sucrose reduces the fat percentage. The low-fat content of the chips makes it well flavored and crispy [29]. In a study on tortilla chips, it was stated that the fat rate varies between 21-34% depending on the raw material used in production and production conditions [30].

The difference between the samples for protein results in Turkish white cheese chips was statistically significant ($P<0.05$). Since sucrose in the samples taken for protein determination are part of the dry matter, the protein content of the samples containing sucrose was found to be low. Protein values of cheese chips (26.74-47.94%) were higher than the average protein values of dried Cheddar cheese (31.16%), and chips tarhana (15.29%) [10, 5].

The color accepted by consumers in chips is the yellow color defined as golden yellow formed because of maillard reaction [31]. Color values of chips samples are given in Table 1. The statistical difference between the color values (L^* and a^*) was found significant in the cheese chips ($P<0.05$). The highest L^* value was found as 73.77 in sucrose-added chips sample (CSU). While the lowest a^* value is seen in salt-added chips (CSA) sample (-2.85), the highest a^* value was observed in sucrose-added chips (CSU) (-1.89). The b^* value of the samples was determined between 3.16 and 4.10. L^* and a^* values of the chips with stevia were similar to the control group. However, these values were found to be higher in samples with sucrose and salt. It is known that sucrose and salt are two effective substances on refraction of light. It is thought that the addition of these two substances may have caused the change in color values.

The difference between cheese chips and time for pH value was found statistically significant in stevia-added (CST) and control (CNA) samples ($P<0.05$). The pH value

of sucrose-added (CSU) and salt-added (CSA) samples was similar during storage. The pH value of the chips was found to be lower than the potato chips [32].

The titration acidity (LA%) value of the chips samples during storage was lowest in the sucrose added (CSU) sample on the first storage day (1.13%) and highest in the control (CNA) sample (1.83%) on the 30th storage day (Table 2). Titration acidity value of the potato chips samples was determined to be 0.1-0.2 mg/100 g [32]. Cheese, the raw material of cheese chips, is a product produced by the addition of lactic acid bacteria. Hence, the pH and titration acidity of chips were higher than potato chips. Sugar covers a significant part of the dried matter in the chips sample. It is thought that this may have caused the titration acidity to below.

The highest water activity value on the first day of storage was found in stevia-added (CST) sample (0.53), while the lowest water activity value was detected in the sucrose-added (CSU) sample (0.35). The difference between the samples and time in the water activity (aw) results of Turkish white cheese chips was statistically significant ($P<0.05$). It was seen that the water activity values of the Turkish white cheese chips increased at the end of the storage. It is understood that suitable conditions occur at the end of storage in cheese chips samples for the growth of yeast and mold. In addition, the relationship between water activity and lipid oxidation has been known for many years [33]. Since cheese chips samples are a food containing saturated and unsaturated fats, the increase in water activity can also be associated with rancidity and oxidative deterioration in the samples.

3.2 Acrylamide analysis

It has been reported by researchers that health hazardous compounds such as acrylamide can be formed when chips products are subjected to high temperature baking and frying processes. Acrylamide is reported to cause carcinogenic and neurotoxic effects above these values [34]. In countries such as the Netherlands and the United States the short-term daily intake of acrylamide with food is 0.3-2 µg/kg/day, long-term intake varies according to biological effects such as age, race, or food consumption habits in the population [35].

Acrylamide contents of Turkish white cheese chips are given in Table 2. The difference between samples and storage times is statistically significant on the acrylamide values of chips ($P<0.05$). Acrylamide results of cheese chips increased during storage; the highest acrylamide value was observed in the sucrose-added (CSU) sample. It is believed that this is due to the maillard reaction between reducing sucrose and amino groups known as the mechanism by which acrylamide formation occurs under the influence of sugar.

It is known that increase in temperature and time increases the formation of acrylamide [13]. The study with biscuits carried out by Summa et al. [36] showed an inverse relationship between moisture content and the amount of acrylamide formation.

Table 1. Physico-chemical analysis results in white cheese chips (n=3)

Chemical and Physical Analysis	Chips Samples†			
	CSU*	CST*	CSA*	CNA*
Dry Matter (%)	96.02±0.60 ^a	94.91±0.34 ^{ab}	95.51±0.05 ^a	95.10±0.72 ^{ab}
Fat (%)	23.50±0.50 ^d	31.50±1.50 ^c	33.50±0.50 ^{abc}	36.50±0.50 ^a
Protein (%)	26.74±0.64 ^b	45.81±0.02 ^a	45.48±0.40 ^a	46.83±0.41 ^a
Diameter (mm)	3.21±0.01 ^a	3.22±0.02 ^a	3.23±0.02 ^a	3.22±0.02 ^a
L*	73.77±2.31 ^a	64.12±0.02 ^{cde}	71.55±1.11 ^{ab}	64.55±0.27 ^{b-e}
a*	-1.89±0.07 ^c	-2.69±0.04 ^{ab}	-2.85±0.01 ^a	-2.56±0.16 ^{ab}
b*	3.20±0.47 ^a	3.16±0.56 ^a	4.10±0.42 ^a	3.28±0.04 ^a

*The different letters show that the difference between the samples is statistically important (P<0.05).

†CSU: sucrose, CST: stevia, CSA: salt, CNA: plain, L*: lightness, a*: redness, b*: yellowness

Table 2. The chemical and textural analysis results in white cheese chips (n=3)

Chemical Analysis	Chips Samples†	Storage Period (day)*	
		1	30
Water activity (aw)	CSU	0.35±0.03 ^f	0.64±0.03 ^a
	CST	0.53±0.01 ^{b-e}	0.64±0.02 ^a
	CSA	0.47±0.02 ^{def}	0.61±0.00 ^{a-d}
	CNA	0.38±0.05 ^{ef}	0.62±0.03 ^{abc}
pH	CSU	5.38±0.12 ^{ab}	5.40±0.10 ^{ab}
	CST	5.22±0.05 ^b	5.42±0.04 ^{ab}
	CSA	5.39±0.28 ^{ab}	5.57±0.21 ^{ab}
	CNA	5.21±0.18 ^b	5.72±0.00 ^a
LA (%)	CSU	1.13±0.27 ^b	1.37±0.14 ^{ab}
	CST	1.57±0.16 ^{ab}	1.70±0.35 ^{ab}
	CSA	1.51±0.22 ^{ab}	1.75±0.41 ^{ab}
	CNA	1.40±0.13 ^{ab}	1.83±0.10 ^a
Acrylamide (ppm)	CSU	0.543±0.133 ^a	0.573±0.071 ^a
	CST	0.226±0.010 ^{cd}	0.293±0.008 ^{a-d}
	CSA	0.360±0.062 ^{abc}	0.497±0.202 ^{ab}
	CNA	0.218±0.065 ^{cd}	0.261±0.017 ^{bcd}
Hardness (N)	CSU	0.68±0.33	0.68±0.44
	CST	0.74±0.33	1.03±0.46
	CSA	0.46±0.01	0.59±0.27
	CNA	0.73±0.24	1.08±0.39
Brittleness (mm)	CSU	27.80±0.50 ^c	26.07±0.46 ^d
	CST	28.35±0.46 ^c	29.44±0.50 ^b
	CSA	29.56±0.48 ^b	31.88±0.50 ^a
	CNA	31.93±0.45 ^a	31.36±0.50 ^a
	CSU	27.80±0.50 ^c	26.07±0.46 ^d

*The different letters show that the difference between the samples is statistically important (P<0.05)

†CSU: sucrose, CST: stevia, CSA: salt, CNA: control

Accordingly, the amount of acrylamide increases exponentially as the amount of moisture decreases. In another study, the amount of acrylamide was determined at a high rate in foods with high carbohydrate in heat treatments above 100-120 °C, while it was found in lower amounts (100 <µg / kg) in foods with high protein [37]. In a study, very high amounts of acrylamide (1.1ppm) were found in potato chips. It is reported that approximately 10 g of potato chips contain 20 ng of acrylamide [38]. In sucrose-added cheese chips (0.543-0.573 ppm), which have the highest acrylamide content during storage, this rate is about half the rate in cheese chips. The upper limits of acrylamide intake allowed in the European Union are stated as 0.5-0.8 µg/kg/day in foods and 0.1 µg/l in water [39]. The

acrylamide content of Turkish white cheese chips was determined below the legal limit.

3.3 Texture values

Hardness (N) and brittleness (mm) values of teleme cheese chips are given in Table 2. When the hardness results of the chips were analyzed statistically, there was no difference between the samples (P>0.05). In our study, the change in textural hardness of the samples related to storage is similar to the studies in the literature. In the study conducted by Kayacier and Singh [40] it was stated that the hardness value of tortilla chips stored for 4 weeks remained unchanged at the end of storage. In another study on carrot chips, it was observed that there was no change in the hardness value of the samples during storage periods up to

5 months [8]. Also in the study carried out by Chudy et al. [11] hardness value of puff snacks produced after the application of hot air drying ($44\pm 5^\circ\text{C}$, until production of $72\pm 5\%$ dry matter) and vacuum microwave drying processes on sliced plain Harzer cheese (acid-set ripened) was found in the range of 2.84-6.82 N, in the 0-120 minutes, and the hardness value of Turkish white cheese chips (0.45-1.08 N) was found to be lower than the puff snacks. When the brittleness values of Turkish white cheese chips are examined, the highest brittleness value was determined on the 1st day plain (CNA) sample (31.93 mm) and the lowest brittleness value was determined on the 30th day sucrose added (CSU) sample (26.07 mm). CSU is supported by sensorial analysis results that the sample is softer and more elastic than other samples. In addition, salt is thought to be effective on brittleness. It was observed that the difference between the samples was significant in the brittleness results ($P < 0.05$). In the study conducted by Ulusoy [41] it was stated that brittleness (deformation) value of biscuit produced because of decrease in sugar ratio and increase in stevia increased and the hardness value decreased. Stevia was found to be effective in brittleness of biscuits compared to sugar. Turkish white cheese chips samples also showed that CSU sample was harder but less brittle than the stevia added (CST) sample. In the study carried out by Chudy et al. [11] brittleness value of puff snacks produced after the application of hot air drying (at $44\pm 5^\circ\text{C}$, until production of $72\pm 5\%$ dry matter) and vacuum microwave drying processes on sliced plain Harzer cheese (acid-set ripened) was found in the range of 3.20-10 mm, in the 0-120 minutes. Brittleness results of Turkish white cheese chips were found over the findings of Chudy et al. [11].

3.4 Sensorial analysis

Sensory analysis results and statistical evaluations of Turkish white cheese chips are given in Table 3. When the sensorial analysis results of the Turkish white cheese chips during the storage were analyzed statistically, the difference between the color and appearance parameter was found insignificant ($P > 0.05$); the statistical difference between the samples in texture and crispness, taste and smell, general acceptability parameters were found significant ($P < 0.05$).

It is supported by sensorial analysis results that the CSU chip is softer and more elastic than other samples. For this reason, the cheese chips with sucrose added had low scores in terms of their sensorial properties. However, taste and smell parameters were evaluated better in these chips. In stevia (CST) chips, although the color and appearance, texture and crispness, general acceptability parameters are interpreted positively, the taste and smell parameter caused these chips to be scored low due to the taste effect in the mouth by the stevia. Salted (CSA) chips received the most appreciation in terms of taste and smell properties. It was determined that the general acceptability of salted (CSA) and plain (CNA) chips is higher than other samples.

3.5 Principal component analysis

The sensorial (color and appearance, texture and crispness, taste and smell, general acceptability), texture (hardness, texture-brittleness) and some chemical properties

(acrylamide) of cheese chips were analyzed using the principal component analysis (PCA). The principal component analysis model was developed with 8 components. These components explain 58.90% of the total variance. The first principal component explains 23.87% of the total variance and the second principal component explains 35.03%. The eigenvalue value of the first principal component was found as 9.45 and that of the second principal component was 6.44.

The order of the first principal component according to their distance from zero and having the same sign is as follows: Color and appearance 0.22, texture and crispness 0.27, taste and appearance 0.26, hardness 0.18, roughness -0.20, sound 0.26, elastic-brittleness 0.28, thickness-fineness -0.22, sugar taste -0.13. The order of the second principal component is sienna-yellowish 0.74, matt-yellowish 0.19, fatty appearance 0.82, chewiness -0.66. As can be seen in Figure 4, the first principal component of sample CSA30 (4.79) and CNA30 (2.55) is positively high. The first principal component of CNA (1.89) took this value positively and in the second principal component, CSA has high values 1.16, and CNA with value 2.56. CSU received a negative value in the first principal component such as -5.13, CST -1.64, CSU30 -3.40. CST30 (-1.35) and CSU30 (-4.24) received higher values in the second principal component.

According to these data, it is seen in Fig. 4 that CST and CSU are in melted appearance, burnt smell and taste, high foreign smell rate and sugar taste. It was found that CNA and CSA are products with fatty appearance, yellowish, brighter, high textural brittleness, and crispness, hard, salted, and with non-elastic properties and high acceptability, and CSU30 and CST30 have the rancid taste and higher acrylamide content than other samples. On the other hand, CNA30 and CSA30 have harder texture, thinner appearance, better chewability and more popular than others.

4 Conclusions

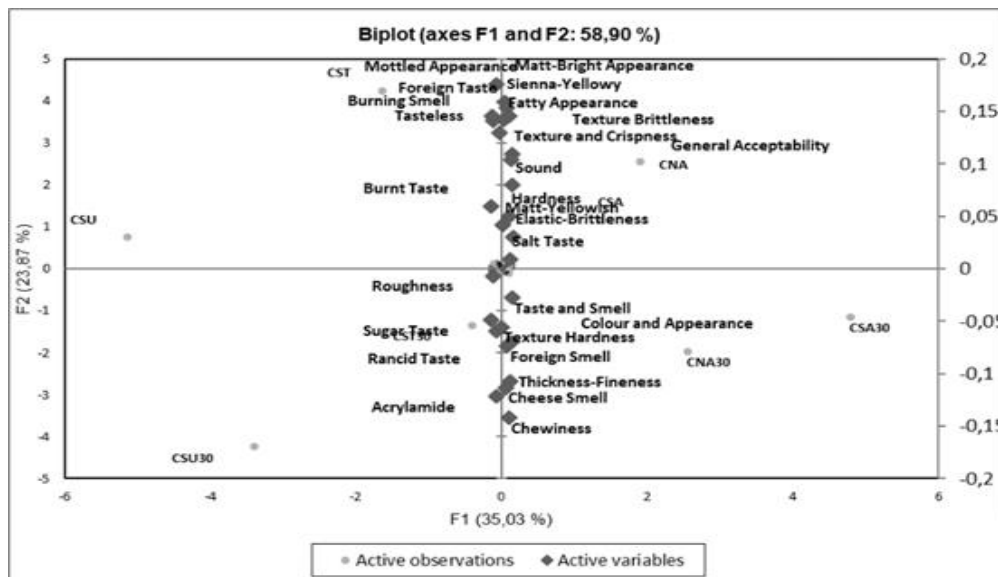
In the study, sweet (sucrose and stevia), salted and plain chips were produced from Turkish white cheese. Turkish white cheese chips were produced without adding any fat in the oven and without adding any additives. The cheese chips were determined to have a high protein (26.74%) and a low acrylamide content (below legal limits). The brittleness value of Turkish white cheese chips was determined the highest in control (CNA) sample and the lowest in CSU sample. Salted (CSA) sample received the most appreciation in terms of total sensorial properties and general acceptability. Others follow it as follows; plain (CNA), stevia (CST), sucrose (CSU). In this study, it has been revealed that sweet and salted cheese chips can offer alternatives to today's consumers in terms of natural and healthy nutrition. It is thought that cheese chips produced with the addition of stevia and sugar may be produced industrially after some other properties are examined.

Table 3. Sensorial analysis results of cheese chips produced from white cheese (n=3)

Sensorial Parameters	Analysis	Chips Samples†	Storage Period (day)	
			1	30
Color and Appearance		CSU	3.20±0.00	3.50±0.50
		CST	3.00±0.60	4.35±0.65
		CSA	4.20±0.20	4.10±0.90
		CNA	4.00±0.20	4.00±1.00
Texture and Crispness		CSU	2.70±0.10 ^{cd}	2.50±0.50 ^d
		CST	3.90±0.30 ^{abc}	3.50±0.50 ^{a-d}
		CSA	4.00±0.20 ^{abc}	4.00±1.00 ^{abc}
		CNA	4.20±0.20 ^{ab}	3.95±0.75 ^a
Taste and Smell		CSU	3.30±0.30 ^c	3.50±0.50 ^{bc}
		CST	3.50±0.50 ^{bc}	4.30±0.30 ^{ab}
		CSA	4.00±0.20 ^{abc}	4.50±0.50 ^a
		CNA	4.00±0.20 ^{abc}	3.75±0.05 ^{abc}
General Acceptability		CSU	5.20±0.00 ^{de}	4.10±0.40 ^e
		CST	6.20±0.40 ^{cd}	4.60±0.60 ^e
		CSA	7.60±0.40 ^{ab}	7.50±0.50 ^{ab}
		CNA	7.15±0.65 ^{abc}	6.50±0.50 ^{bc}

a-e: Shows that the difference between the samples is important (P<0.05).

†CSU: sucrose, CST: stevia, CSA: salt, CNA: Control.



*CSU: sugared, CST: stevia, CSA: salted, CNA: Control (the first day of storage); CSU30, CST30, CSA30 and CNA30 (the 30th day of storage)

Figure 4. Principal component analysis in Turkish white cheese chips samples

Funding

This research was performed with the financial support of Suleyman Demirel University Scientific Research Projects Coordination Unit-Isparta Turkey, Grant/Award Number: 4860-YL1-17.

Conflict of Interest: The authors declare that they do not have any conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 6%

References

[1] P. Fellows, A. Hampton. Small-scale food processing: a guide to appropriate equipment. Intermediate

Technology Publications 7, 155-156, 1992. <https://doi.org/10.1002/pts.2770070306>

[2] N. M. Nor, A. Carr, A. Hardacre, C. S. Brennan. The development of expanded snack product made from pumpkin flour-corn grits: effect of extrusion conditions and formulations on physical characteristics and microstructure. Foods 2(2) 160-169, 2013. <https://doi.org/10.3390/foods2020160>

[3] A. J. McCarthy. The snack industry: history, domestic and global status. Snack Foods Processing, CRC Press, 29-35, 2001.

[4] M. Cankurtaran. Production of fried wheat chips and determination of quality characteristics of the wheat

- chips. Master's Thesis, Erciyes University, Kayseri, 2008.
- [5] M. Ozçam. Determination of textural and microbiological properties of tarhana chips. Master's Thesis, Celal Bayar University, Manisa, 2012.
- [6] F. Yuksel. Utilization of stale bread in fried wheat and corn chips. PhD Thesis, Erciyes University, Kayseri, 2014
- [7] M. Hendek-Ertop, K. Kutluk, K. Coşkun, S. Canlı. A new approach for production of chips with food industry byproducts: gluten enriched chips. *Academic Food Journal* 14 (4), 398-406, 2016.
- [8] A. Sulaeman, L., Keler, W. D. Giraud, L. S. Taylor, A. J. Driskell. Changes in carotenoid, physicochemical and sensory values of deep-fried carrot chips during storage. *International Journal of Food Science and Technology* 38, 603-613, 2003. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2621.2003.00689.x>
- [9] A.A. Hayaloglu, M. Guven, P. F. Fox. Microbiological, biochemical and technological properties of Turkish white cheese 'Beyaz Peynir' *International Dairy Journal* 12, 635-648, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0958-6946\(02\)00055-9](https://doi.org/10.1016/S0958-6946(02)00055-9)
- [10] T. Rakcejeva, J. Zagorska, L. Dukalska, R. Galoburda, E. Eglitis. Physical-chemical and sensory characteristics of cheddar cheese snack produced in vacuum microwave dryer. *Chemine Technology* 3 (52), 16-20, 2009.
- [11] S. Chudy, A. Makowska, M. Piatek, M. Krzywdzinska-Bartkowiak. Application of microwave vacuum drying for snack production: characteristics of pure cheese puffs. *International Journal of Dairy Technology* 72(1) 82-88, 2019. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12562>
- [12] L Liu, H. Zhang, X. Li, X. Han, X. Qy, P. Chen, F. Wang, L. Wang. Effect of waxy rice starch on textural and microstructural properties of microwave-puffed cheese chips. *International Journal of Dairy Technology* 71 (2) 501-511, 2017. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12437>
- [13] E. Tareke, P. Rydberg, P. Karlsson, S. Eriksson, M. Toemqvist, Analysis of acrylamide, a carcinogen formed in heated foodstuffs. *J. Agric. Food Chem.* 50 4998-5006, 2002.
- [14] F. Mestagh, B. D. Meulenaer, C. V. Peteghem, Influence of oil degradation on the amounts of acrylamide generated in a model system and in french fries. *Food Chemistry* 100 1153-1159, 2007.
- [15] T. Krishnakumar, R. Visvanathan. Acrylamide in food products: a review. *Journal of Food Processing and Technology* 5 (7) 344, 2014. <https://doi.org/10.4172/2157-7110.1000344>
- [16] C. E. Tamer, B. Karaman. Formation of acrylamide in foods and it's effects on human health. *Journal of Food* 31 (4) 195-199, 2006.
- [17] R. S. Cadena, H. M. A. Bolini. Time-Intensity Analysis and Acceptance Test for Traditional and Light Vanilla Ice Cream. *Food Research International* 3 (44) 677-683, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.12.012>
- [18] M. Soliman. Stevia Plant, Natural Concentrated Sweetenes. Egyptian Society of Sugar Technologists, 28th Annual Conference, December 2-4, 1997
- [19] AACC. Approved methods of the AACC the association St. Paul., 2000
- [20] TSE. Beyaz Peyniri Standardı TS 591. Türk Standartları Enstitüsü. Necatibey cad. No:112. Bakanlıklar Ankara- Türkiye, 1989.
- [21] Anonymous. Handbook of Gerhardt Dumatherm Instruction Manual, C.Gerhardt GmbH & Co. KG. 2011.
- [22] M. Biedermann, S. Biedermann-Brem, A. Noti, K. Grob. Methods for determining the potetional formation and its elimination in raw materials for food preparation, such as potatoes. *Mitteilungen aus Lebensmitteluntersuchung und Hygiene* 93 653-667, 2002.
- [23] X. Hua, K. Wang, R. Yang, J. Kang, H. Yang. Edible coating from sunflower head pectin to reduce lipid uptake in fried potato chips. *Food Science and Technology* 62 1220-1225, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.02.010>
- [24] H. S. Kwak, S. S. Kim, Y. H. Chang, M. Saleh, Y. Lee. Prediction of Sensory Crispness of Potato chips using a reference calibration method. *Journal of Food Quality* 7 1-6, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/5462751>
- [25] H. T. Lawless, H. Heymann. Sensory evaluation of food principles and practices. (2th ed.). New York, 2010.
- [26] B. J. Winer, D. R. Brown, K. M. Michels. Statistical principles in experimental design. (3th ed.). New York: McGraw-Hill, 1991
- [27] E. C., Pappa, I. Kandarakis, E. M. Anifantakis, G. K. Zerfiridis. Influence of types of milk and culture on the manufacturing practices, composition and sensory characteristics of Teleme cheese during ripening. *Food Control* 17 570-581, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2005.03.004>
- [28] M. M. A. Basuny, M. M. D. Mostafa, M. A. Shaker. Relationship between chemical composition and sensory evaluation of potato chips made from six potato varieties with emphasis on the quality of fried sunflower oil. *World Journal of Dairy & Food Sciences* 4 (2) 193-200, 2009.
- [29] W.F. Talburt, O. Smith. Potato processing. (4th ed.). AVI-Van Nostrand Reinhold Company, New York., 1986.
- [30] J. K. Lee. The effects of processing conditions and maize varieties on physicochemical characteristics of tortilla chips. PhD Thesis, Texas A & M University, 1991.
- [31] F. Pedreschi, K. Kaack, K. Granby, E. Troncoso. Acrylamide reduction under different pre-treatments

- in french fries. Journal of Food Engineering 79 786-793, 2006.
- [32] P. K. Caetano, F. A. C. Marino-Nasser, V. Z. Mendonça, K. A. Furlaneto, E. R. Daiuto, R. L. Vieites. Physicochemical and sensory characteristics of sweet potato chips undergoing different cooking methods. Food Science and Technology, Campinas 38 (3) 434-440, 2018.
- [33] M. Pala, B. Saygi. Su Aktivitesi ve Gıda İşlemedeki önemi. Gıda, 1 33-39, 1983.
- [34] R. H. Stadler, I. Blank, N. Varga, F. Robert, P. Hau, A. Guy, M. C. Robert, S. Riediker. Acrylamide from maillard reaction products. Nature 419 449-450, 2002.
- [35] P. Rydberg, S. Ericson, E. Tareke, P. Karlsson, L. Ehrenberg, M. Tornqvist. Investigations of factors that influence the acrylamide content of heated foodstuffs. Journal of Agriculture and Food Chemistry 51 7012-7018, 2003.
- [36] C. Summa, T. Wenzl, M. Brohee, B. De La Calle, E. Anklam. Investigation of the correlation of the acrylamide content and the antioxidant activity of model cookies. Journal of Agricultural and Food Chemistry 54 853-859, 2006.
- [37] W. L. Claeys, K. D. Vleeschouwer, M. E. Hendrickx. Quantifying the formation of Carcinogens during food processing acrylamide. Trends in Food Science and Technology 16 181-193, 2005.
- [38] E. Dybing, T. Sanner. Risk assessment of acrylamide in food. Toxicol. Science 75 7-15, 2003.
- [39] A. Karagoz. Acrylamide and its presence in foods. TAF Preventive Medicine Bulletin 8(2) 187-192, 2009.
- [40] A. Kayacier, R. K. Singh. Textural properties of baked tortilla chips. Food Science and Technology 36 463-466, 2003.
- [41] Ulusoy, S. Determination of the quality features and acrylamide content of biscuits sweetened with stevia. Master's Thesis, Mersin University, Mersin, 2011.





Modeling approach for estimation of ultimate load capacity of concrete-filled steel tube composite stub columns based on relevance vector machine

Beton-dolgu çelik tüplü kompozit kısa kolonların nihai yük taşıma kapasitesinin ilgililik vektör makinesine dayalı tahmini için modelleme yaklaşımı

Çiğdem Avcı Karataş^{1,*} 

¹ Department of Transportation Engineering, Faculty of Engineering, Yalova University, 77200, Yalova, Turkey

Abstract

In this paper, the applicability of relevance vector machine (RVM) has been explored to predict the ultimate axial load capacity of concrete-filled steel tube composite stub columns (CFSTCSCs) with circular sections under axial compression loadings. As an extension of support vector machine, RVM employs Bayesian inference to achieve parsimonious solutions for regression and classification. By using MATLAB software and 150 comprehensive experimental data presented in the previous studies, a model to predict the ultimate load of circular CFSTCSCs was developed by properly training the data. Utmost care has been taken in grouping the data for training and validation. About 80% dataset for training and 20% dataset for validation have been used, respectively. The results show that the predicted ultimate axial compression load capacity of CFSTCSC members is comparable with that of the corresponding experimental data and the percentage difference is about $\mp 11\%$.

Keywords: Concrete-filled steel tube composite stub columns (CFSTCSCs), Ultimate axial load capacity, Relevance vector machine (RVM), Nonlinear regression algorithm

1 Introduction

Concrete-filled steel tube composite stub columns (CFSTCSCs) are being used in the civil infrastructure sector such as high-rise buildings, bridges, towers, etc., as they offer many structural advantages such as high strength, promising ductility, and large energy absorption capacities. The enhanced strength and ductility are due to the confinement of concrete. CFSTCSCs were used for various applications such as (i) retrofitting applications in earthquake-prone areas [1] (ii) bridge piers [2]. It was understood from the literature that the ultimate load of CFSTCSCs largely depends on material properties and steel ratio [3, 4] and several cross-sections of CFSTCSCs, namely, circular, square and rectangular, etc., were with various grades of concrete [5-10]. Design specifications used to predict the load capacity of composite stub columns, the ANSI/AISC 360-16 [11], and the Eurocode 4 (EC4) [12].

Özet

Bu makalede, dairesel kesitli beton-dolgu çelik tüplü kompozit kısa kolonların aksel basınç yükleri altındaki nihai yük taşıma kapasitesini tahmin etmekte ilgililik vektör makinesinin (İVM) uygulanabilirliği incelenmiştir. Destek vektör makinesinin bir eklentisi olarak İVM, regresyon ve sınıflandırmada sağlam çözümler elde etmek için Bayesyen yaklaşımını kullanmaktadır. MATLAB yazılımı ve 150 adet daha önceki çalışmalarda sunulan kapsamlı deneysel veriler kullanılarak ve bu verilerin uygun şekilde düzenlenmesiyle, dairesel kesitli beton-dolgu çelik tüplü kompozit kısa kolonların nihai yük taşıma kapasitesini tahmin etmek için bir model geliştirilmiştir. Verilerin düzenleme ve doğrulama için gruplandırılmasında azami özen gösterilmiştir. Sırasıyla, düzenleme için yaklaşık %80 veri seti ve doğrulama için %20 veri seti kullanılmıştır. Sonuçlar, beton-dolgu çelik tüplü kompozit kolon elemanının tahmini nihai aksel basınç yük taşıma kapasitesinin, ilgili deneysel verilerle kıyaslanabilir olduğunu ve aradaki yüzde farkının yaklaşık $\mp 11\%$ olduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Beton-dolgu çelik tüplü kompozit kısa kolonlar, Nihai aksel yük taşıma kapasitesi, İlgililik vektör makinesi (İVM), Lineer olmayan regresyon algoritması

The axial compressive stiffness and ultimate capacity are the basic properties of CFSTCSCs. In the literature, there are different opinions and conclusions about the axial compressive stiffness of the stub columns, and one of the main reasons may be that researchers used different deformation measurement methods for the stub columns under axial compressive loading. However, there have been very few reports that compare these measurement methods for CFSTCSCs.

It is well known that analytical models are very much useful to predict the responses of the structural members. In the present scenario, machine learning techniques have attracted much importance to develop a model for the prediction of the future response. In any machine learning model, there are basically two major steps, namely, training, and testing. For training the data, mixed data with all variations should be required. One should have knowledge

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: cigdem.karatas@yalova.edu.tr (Ç. Avcı Karataş)
Geliş / Recieved: 28.06.2020 Kabul / Accepted: 26.01.2021 Yayımlanma / Published: 27.07.2021
doi: 10.28948/ngumuh.759297

of the data preparation for training and testing. From the wide literature, it is noted that numerous statistical models or metamodels are available for developing the models to predict the required response. The models cover artificial neural networks, multivariate adaptive regression splines, Gaussian regression process, least squares support vector machine, relevance vector machine (RVM), and extreme learning machine, etc., to develop the models by training the mixed data [13-20].

After carefully study of the above models, it is observed that each model has its own advantages and limitations. RVM is a revised version of the support vector machine (SVM) and a machine learning methodology that uses Bayesian treatment to achieve parsimonious solutions for regression and classification [21, 22]. RVM is conceptualized under a complete probabilistic approach. In RVM, weights will be assigned to each dataset based on a defined algorithm and relate to hyperparameters. The significant feature of the RVM is that it uses very few kernel functions so that it will be computationally efficient. RVM concepts were used by many researchers in different domains for developing a model [23-29]. The applications of RVM concepts for the structural engineering domain are found to be scarce. When viewed from this aspect, this work will be a remarkable contribution to the existing knowledge base and engineers about the estimation of ultimate load capacity of CFSTCSCs based on RVM.

In the present study, RVM, one of the sophisticated statistical models is proposed to estimate the ultimate load capacity of CFSTCSCs with circular sections under axial loading by using the features of MATLAB. A dataset containing 150 experimental testing results available in the literature on CFSTCSC members under axial loading has been compiled for the present study.

2 Experimental dataset

Many experimental investigations were carried out by several researchers on the performance of circular CFSTCSCs under axial compression loading. The test configuration considered is the uniaxial compression test which is schematically depicted in Figure 1. A total of 150 data with 22 published literature sources has been collected from different sources. These experimental studies for stub/short CFSTCSCs have been compiled and the geometrical parameters, material strengths, and failure loads of various circular CFSTCSCs are tabulated in Table 1. It can be clearly sighted that the ultimate axial load capacity (P_u) is related to several variables such as (i) the outer diameter of steel tube, D (ii) wall thickness of steel tube, t (iii) unconfined concrete strength, f_c (iv) Young's modulus of concrete, E_c (v) yield strength of steel, f_y (vi) Young's modulus of steel, E_s (vii) length of circular CFSTCSC, L (viii) confinement factor, ξ . Table 1 shows the geometrical parameters of CFSTCSC sections, mechanical properties of steel and concrete, confinement factor, and failure load of a member under axial loadings. The compiled dataset has a wide range of column parameters such as normal to high yield strength steels ($f_y = 186\sim 853\text{ MPa}$), normal concrete to ultra-high-strength concrete ($f_c = 18\sim 193\text{ MPa}$), the

outer diameter of circular sections ($D = 60\sim 450\text{ mm}$), the ratio of the outer diameter to the thickness ($D/t = 17\sim 221$), and the ratio of the height to the outer diameter ($L/D = 1.8 - 4.9$), respectively. The aim of the developed model in the present research is to provide a unique study to the researcher to obtain the decreasing errors, complexity, and reducing convergence of scattering amplitudes of numerical results to the experimental ones that can be an alternative to experimental studies and to estimate the ultimate load capacity of circular CFSTCSCs. It can be obviously noted from Table 1 that E_c varies between $17810\text{ MPa}\sim 66000\text{ MPa}$ and for E_s , it varies in the range of 177000 MPa and 213000 MPa . These variations have been considered while producing model processes to increase the possibility of obtaining a stronger model.

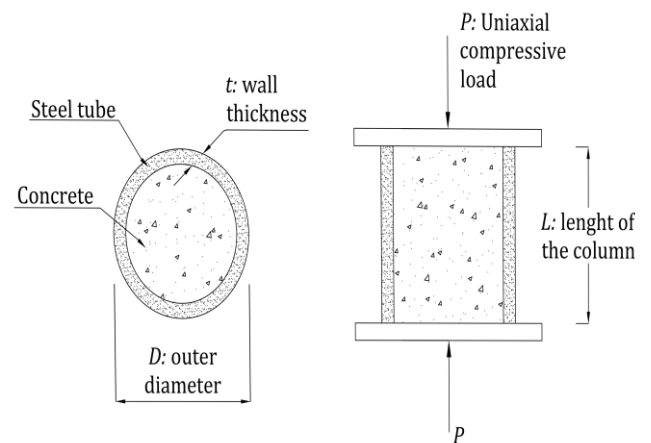


Figure 1. Geometrical configuration of CFSTCSC

3 Relevance vector machine (RVM)

RVM is a modified version of SVM, employs Bayesian concepts, and kernel function [21, 22]. RVM starts with the base of linear models, i.e., the function of $y(x)$ can be predicted at any point x with a set of measurements of the function $t = (t_1, y, t_N)$ and with some training points $x = (x_1, y, x_N)$:

$$t_i = y(x_i) + \varepsilon_i \quad (1)$$

where ε_i = the noise component of the measurement having mean 0 and variance σ^2 . The unknown function $y(x)$ can be expressed as a linear combination of known basis function as

$$y(x) = \sum_{i=1}^M w_i \varphi_i(x) \quad (2)$$

where, $w_i = (w_1, y, w_M)$ = a vector consisting of the linear combination weights

$$y(x) = \text{output, a linearly weighted sum of } M \\ \varphi_i(x) = (\varphi_1(x), \varphi_2(x), \dots, \varphi_M(x))^T$$

For good predictions, most of the parameters are default set to zero [21, 22].

$$t = \Phi w + \varepsilon \quad (3)$$

where, $\Phi = NxM$ design matrix $\Phi_i(x)$ at all the training points

$$\varepsilon_i = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_N) = \text{noise vector}$$

RVM begins with a set of data input $\{x_n\}_n^N = 1$, and the associated vector $\{t_n\}_n^N = 1$. The prediction is of the form similar to SVM as given below:

$$y(x) = \sum_{i=1}^N w_i K(x, x_i) + w_0 \quad (4)$$

where, $w_i = w_1, w_2, \dots, w_N =$ weight vector
 $K(x, x_i) =$ kernel function
 $w_0 =$ bias function

Equation (5) shows the radial basis kernel function is employed in this work as follows:

$$K(x_i, x) = \exp\left\{-\frac{(x_i - x)^T(x_i - x)}{2\sigma^2}\right\} \quad (5)$$

where x_i and x are the training and test patterns, σ is the width of basis function, respectively. For a given input dataset, it is assumed as $\{x_n, t_n\}_n^N = 1$. It is assumed that $p(t|x)$ is Gaussian N (or Normal) $(t|y(x), \sigma^2)$. The mean of this distribution for a given x can be modeled by $y(x)$ as mentioned in Equation (4). The likelihood of dataset can be written as

$$p(t|w, \sigma^2) = (2\pi\sigma^2)^{-N/2} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} \|t - \Phi w\|^2\right\} \quad (6)$$

where, $t_i = (t_1, \dots, t_N)^T$
 $w_i = (w_0, \dots, w_N)$

$$\Phi^T = \begin{bmatrix} 1 & K(x_1, x_1) & K(x_1, x_2) & \dots & K(x_1, x_n) \\ 1 & K(x_2, x_1) & K(x_2, x_2) & \dots & K(x_2, x_n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & K(x_n, x_1) & K(x_n, x_2) & \dots & K(x_n, x_n) \end{bmatrix} \quad (7)$$

where $K(x_i, x_n)$ is the kernel function. The next higher-level parameters are useful to constrain an explicit zero-mean Gaussian prior probability distribution to the weights.

$$p(w|\alpha) = \prod_{i=0}^N N(w_i | 0, \alpha_i^{-1}) \quad (8)$$

where $\alpha =$ a vector of $(N + 1)$ hyperparameters, useful for monitoring the weight deviations [25]. By applying Bayes' rule, the posterior unknowns can be computed as follows:

$$p(\alpha) = \prod_{i=0}^N \text{Gamma}(\alpha_i | a, b) \quad (9)$$

$$p(\beta) = \prod_{i=0}^N \text{Gamma}(\beta | c, d) \quad (10)$$

where, $\beta = \sigma^{-2}$. Hence, for α and σ , the distribution followed is gamma; for w , the normal distribution is followed and after the prior-distributions, Bayes' rule is followed.

$$p(w, \alpha, \sigma^2 | t) = \frac{p(t|w, \alpha, \sigma^2)p(w, \alpha, \sigma^2)}{p(t)} \quad (11)$$

The predictive distribution for a new test point (x^*) corresponding to the target (t^*) is determined as

$$p(t^* | t) = \int p(t^* | w, \alpha, \sigma^2) p(w, \alpha, \sigma^2 | t) dw d\alpha d\sigma^2 \quad (12)$$

By using the decomposition of posterior, the above equation can be solved as below in Equation (13):

$$p(w, \alpha, \sigma^2 | t) = p(w | t, \alpha, \sigma^2) p(\alpha, \sigma^2 | t) \quad (13)$$

The posterior distribution was analyzed by considering the appropriate weights due to the property of normalization integral is the convolution of Gaussians [22]. Accordingly, Equation (13) can be re-written as

$$p(w | t, \alpha, \sigma^2) = \frac{p(t|w, \sigma^2)p(w, \alpha)}{p(t|\alpha, \sigma^2)} \quad (14)$$

By using the Bayes' rule, Equation (14) can be modified as follows:

$$p(w | t, \alpha, \sigma^2) = (2\pi)^{-(N+1)/2} |\Sigma|^{-1/2} \exp\left\{-\frac{1}{2}(w - \mu)^T \Sigma^{-1}(w - \mu)\right\} \quad (15)$$

The solution for the above equation is given below in Equation (16) and Equation (17):

$$\Sigma = (\sigma^{-2}\Phi^T\Phi + A)^{-1} \quad (16)$$

$$\mu = \sigma^{-2}\Sigma\Phi^T t \quad (17)$$

where, $\Sigma =$ covariance
 $\mu =$ mean
 $A = (\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_N)$

Table 1. Experimental data for ultimate axial load capacity of circular CFSTCSCs with the general details

Source	Specimen	D (mm)	t (mm)	f_c (MPa)	E_c (MPa)	f_y (MPa)	E_s (MPa)	L (mm)	ξ	D/t	L/D	P_u (kN)
[30, 31]	SPICIMEN8	120.8	4.06	34.40	27566	452	191536	241.3	1.962	30	2.0	1201
	SPICIMEN9	120.8	4.09	29.58	25562	452	191536	241.4	2.300	30	2.0	1201
	SPICIMEN10	120.8	4.09	25.92	23928	452	191536	241.4	2.625	30	2.0	1112
	SPICIMEN13	152.6	3.18	20.89	21482	415	203395	304.8	1.766	48	2.0	1201
	SPICIMEN14	152.6	3.15	23.10	22589	415	203395	304.8	1.581	48	2.0	1201
	SPICIMEN4	101.7	3.07	31.16	26236	605	207050	203.3	2.575	33	2.0	1068
	SPICIMEN3	101.7	3.07	34.13	27458	605	207050	203.3	2.351	33	2.0	1112
	SPICIMEN3a	169.3	2.62	36.54	28411	317	195811	305	0.563	65	1.8	1307
[32]	4HN	150	4.3	28.71	25183	280	209720	450	1.222	35	3.0	1203
	4HN	150	4.3	28.71	25183	280	209720	450	1.222	35	3.0	1225
	4HN	150	4.3	28.71	25183	280	209720	450	1.222	35	3.0	1200
	3HN	150	3.2	28.71	25183	287	190120	450	0.911	47	3.0	1040
	3HN	150	3.2	28.71	25183	287	190120	450	0.911	47	3.0	998
	3HN	150	3.2	28.71	25183	287	190120	450	0.911	47	3.0	980
	2HN	150	2	28.71	25183	336	211680	450	0.65	75	3.0	882
	2HN	150	2	28.71	25183	336	211680	450	0.65	75	3.0	882
	4MN	150	4.3	21.95	22020	280	209720	450	1.599	35	3.0	1065
	4MN	150	4.3	21.95	22020	280	209720	450	1.599	35	3.0	1087
	4MN	150	4.3	21.95	22020	280	209720	450	1.599	35	3.0	1096
	3MN	150	3.2	21.95	22020	287	190120	450	1.191	47	3.0	841
	3MN	150	3.2	21.95	22020	287	190120	450	1.191	47	3.0	840
	3MN	150	3.2	21.95	22020	287	190120	450	1.191	47	3.0	858
	2MN	150	2	21.95	22020	336	211680	450	0.85	75	3.0	773
	2MN	150	2	21.95	22020	336	211680	450	0.85	75	3.0	756
	4LN	150	4.3	18.03	19957	280	209720	450	1.946	35	3.0	963
	3LN	150	3.2	18.03	19957	287	190120	450	1.45	47	3.0	790
	3LN	150	3.2	18.03	19957	287	190120	450	1.45	47	3.0	790
	3LN	150	3.2	18.03	19957	287	190120	450	1.45	47	3.0	747
2LN	150	2	18.03	19957	336	211680	450	1.035	75	3.0	656	
2LN	150	2	18.03	19957	336	211680	450	1.035	75	3.0	638	
2LN	150	2	18.03	19957	336	211680	450	1.035	75	3.0	672	
[33]	L-20-1	178	9	22.15	22120	283	200000	360	3.036	20	2.0	2042
	L-20-2	178	9	22.15	22120	283	200000	360	3.036	20	2.0	2102
	H-20-1	178	9	45.37	31658	283	200000	360	1.482	20	2.0	2667
	H-20-2	178	9	45.37	31658	283	200000	360	1.482	20	2.0	2677
	L-32-1	179	5.5	22.15	22120	248	200000	360	1.514	33	2.0	1467
	L-32-2	179	5.5	23.91	22982	248	200000	360	1.403	33	2.0	1530
	H-32-1	179	5.5	43.61	31038	248	200000	360	0.769	33	2.0	2040
	H-32-2	179	5.5	43.61	31038	248	200000	360	0.769	33	2.0	2030
	L-58-1	174	3	23.91	22982	266	200000	360	0.809	58	2.1	1135
	L-58-2	174	3	23.91	22982	266	200000	360	0.809	58	2.1	1135
	H-58-1	174	3	45.67	31762	266	200000	360	0.423	58	2.1	1608
	H-58-2	174	3	45.67	31762	266	200000	360	0.423	58	2.1	1677

Table 1. Experimental data for ultimate axial load capacity of circular CFSTCSCs with the general details (continued)

Source	Specimen	D (mm)	t (mm)	f_c (MPa)	E_c (MPa)	f_y (MPa)	E_s (MPa)	L (mm)	ξ	D/t	L/D	P_u (kN)
	R12CF1	190	1.15	110.3	32405	202	193200	662	0.045	165	3.5	2991
	R12CF3	190	1.15	110.3	32405	202	193200	662	0.045	165	3.5	3137
	S10CS50A	190	0.86	41	17810	211	177000	659	0.094	221	3.5	1350
	S12CS50A	190	1.13	41	17810	186	178400	664.5	0.11	168	3.5	1377
	S16CS50B	190	1.52	48.3	21210	306	207400	664.5	0.208	125	3.5	1695
[34, 35]	S20CS50A	190	1.94	41	17810	256	204700	663.5	0.263	98	3.5	1678
	S30CS50B	165	2.82	48.3	21210	363	200600	580.5	0.541	59	3.5	1662
	S10CS80B	190	0.86	74.7	27576	211	177000	663.5	0.052	221	3.5	2451
	S12CS80A	190	1.13	80.2	28445	186	178400	662.5	0.056	168	3.5	2295
	S16CS80A	190	1.52	80.2	28445	306	207400	663.5	0.125	125	3.5	2602
	S20CS80B	190	1.94	74.7	27576	256	204700	663.5	0.144	98	3.5	2592
	S30CS80A	165	2.82	80.2	28445	363	200600	580.5	0.326	59	3.5	2295
[36]	C1	140.8	3	28.18	25599	285	189475	602	0.92	47	4.3	790
	C2	141.4	6.5	23.81	23528	313	206011	602	2.797	22	4.3	1332
	A1-1	125	1	106	48389	232	200000	438	0.072	125	3.5	1275
	A1-2	125	1	106	48389	232	200000	438	0.072	125	3.5	1239
	A2-1	127	2	106	48389	258	200000	445	0.161	64	3.5	1491
	A2-2	127	2	106	48389	258	200000	445	0.161	64	3.5	1339
	A3-1	133	3.5	106	48389	352	200000	465	0.379	38	3.5	1995
[37]	A3-2	133	3.5	106	48389	352	200000	465	0.379	38	3.5	1991
	A4-1	133	4.7	106	48389	352	200000	465	0.524	28	3.5	2273
	A4-2	133	4.7	106	48389	352	200000	465	0.524	28	3.5	2158
	C-1	133	4.7	92	45081	352	200000	465	0.604	28	3.5	1854
	C-2	133	4.7	92	45081	352	200000	465	0.604	28	3.5	1933
	B-3	108	4.5	96	46050	358	200000	378	0.709	24	3.5	1518
	C10A-2A-3	101.8	3.03	23.2	22638	371	200000	305	2.088	34	3.0	628
	C20A-2A	216.4	6.61	24.3	23169	452	200000	650	2.499	33	3.0	3278
[38]	C30A-2A	318.3	10.36	24.2	23121	335	200000	950	1.995	31	3.0	6319
	C20A-4A	216.4	6.61	46.8	32153	452	200000	650	1.298	33	3.0	4214
	C10A-4A-1	101.9	3.03	51.3	33663	371	200000	305	0.943	34	3.0	877
	C30A-4A	318.5	10.36	52.2	33957	334	200000	950	0.921	31	3.0	8289
[39]	CU-040	200	5	27.15	24490	266	200000	600	1.058	40	3.0	1951
	CU-070	280	4	31.15	26232	273	200000	840	0.523	70	3.0	3025
	CU-150	300	2	27.23	24526	342	200000	900	0.342	150	3.0	2608
[3]	scv2-1	200	3	49.5	37420	304	206500	600	0.386	67	3.0	2383
	scv2-2	200	3	49.5	37420	304	206500	600	0.386	67	3.0	2256
	C7	114.9	4.91	28.23	24972	365	200000	300.5	2.53	23	2.6	1020
	C9	115	5.02	48.6	32765	365	200000	300.5	1.506	23	2.6	1378
[40]	C11	114.3	3.75	48.6	32765	343	200000	300	1.026	30	2.6	1033
	C12	114.3	3.85	25.71	23831	343	200000	300	1.997	30	2.6	761
	C4	114.6	3.99	83.6	42974	343	200000	300	0.637	29	2.6	1308

Table 1. Experimental data for ultimate axial load capacity of circular CFSTCSCs with the general details (continued)

Source	Specimen	D (mm)	t (mm)	f_c (MPa)	E_c (MPa)	f_y (MPa)	E_s (MPa)	L (mm)	ξ	D/t	L/D	P_u (kN)
[40]	C8	115	4.92	94.9	45786	365	200000	300	0.753	23	2.6	1787
	C14	114.5	3.84	88.9	44315	343	200000	300	0.575	30	2.6	1359
[41]	CC4-A-4-1	149	2.96	40.5	29911	308	200000	447	0.642	50	3.0	1064
	CC8-A-8	108	6.47	77	41242	853	200000	324	3.221	17	3.0	2667
	CC8-C-8	222	6.47	77	41242	843	200000	666	1.397	34	3.0	7304
	CC8-D-8	337	6.47	85.1	43357	823	200000	1011	0.788	52	3.0	13776
	CC4-D-4-1	450	2.96	41.1	30131	279	200000	1350	0.182	152	3.0	6870
	CC4-D-4-2	450	3	41	30131	279	200000	1350	0.182	152	3.0	6985
[4]	CA1-1	60	1.87	75.2	41540	282	201500	180	0.515	32	3.0	312
	CA1-2	60	1.87	75.2	41540	282	201500	180	0.515	32	3.0	320
	CA2-1	100	1.87	75.2	41540	282	201500	300	0.297	53	3.0	822
	CA2-2	100	1.87	75.2	41540	282	201500	300	0.297	53	3.0	845
	CA3-1	150	1.87	75.2	41540	282	201500	450	0.194	80	3.0	1701
	CA3-2	150	1.87	75.2	41540	282	201500	450	0.194	80	3.0	1670
	CA4-1	200	1.87	75.2	41540	282	201500	600	0.144	107	3.0	2783
	CA4-2	200	1.87	75.2	41540	282	201500	600	0.144	107	3.0	2824
	CA5-1	250	1.87	75.2	41540	282	201500	750	0.115	134	3.0	3950
	CA5-2	250	1.87	75.2	41540	282	201500	750	0.115	134	3.0	4102
	CB2-1	100	2	75.2	41540	404	207000	300	0.457	50	3.0	930
	CB2-2	100	2	75.2	41540	404	207000	300	0.457	50	3.0	920
	CB3-1	150	2	75.2	41540	404	207000	450	0.298	75	3.0	1870
	CB3-2	150	2	75.2	41540	404	207000	450	0.298	75	3.0	1743
	CB4-1	200	2	75.2	41540	404	207000	600	0.222	100	3.0	3020
	CB4-2	200	2	75.2	41540	404	207000	600	0.222	100	3.0	3011
	CB5-1	250	2	75.2	41540	404	207000	750	0.176	125	3.0	4442
	CB5-2	250	2	75.2	41540	404	207000	750	0.176	125	3.0	4550
	CC2-1	150	2	80	41540	404	207000	450	0.281	75	3.0	1980
	CC2-2	150	2	80	41540	404	207000	450	0.281	75	3.0	1910
CC3-1	250	2	80	41540	404	207000	750	0.166	125	3.0	4720	
CC3-2	250	2	80	41540	404	207000	750	0.166	125	3.0	4800	
[42]	D3M4C2	89.32	2.74	33	26999	360	200000	340	1.473	33	3.8	494
	D3M4F13	89.32	2.74	31.48	26370	360	200000	340	1.544	33	3.8	495
	D3M4F22	89.32	2.74	31.48	26370	360	200000	340	1.544	33	3.8	478
	D3M4F33	89.32	2.74	28.19	24954	360	200000	340	1.724	33	3.8	529
	D4M4C1	112.6	2.89	30.84	26101	360	200000	340	1.297	39	3.0	702
	D4M4F13	112.6	2.89	31.48	26370	360	200000	340	1.271	39	3.0	757
	D4M4F21	112.6	2.89	25.28	23631	360	200000	340	1.583	39	3.0	659
	D4M4F32	112.6	2.89	26.2	24057	360	200000	340	1.527	39	3.0	638
[43]	SZ3S4A1	165	2.72	48	32563	350	213000	510	0.506	61	3.1	1750
	SZ3S6A1	165	2.73	67.2	38529	350	213000	510	0.363	60	3.1	2080

Table 1. Experimental data for ultimate axial load capacity of circular CFSTCSCs with the general details (continued)

Source	Specimen	D (mm)	t (mm)	f _c (MPa)	E _c (MPa)	f _y (MPa)	E _s (MPa)	L (mm)	ξ	D/t	L/D	P _u (kN)	
[44]	C-30-3D	114.3	3.35	32.7	26876	287	206000	342.9	1.128	34	3.0	669	
	C-60-3D	114.3	3.35	58.7	36009	287	206000	342.9	0.629	34	3.0	946	
	C-80-3D	114.3	3.35	88.8	44290	287	206000	342.9	0.416	34	3.0	1133	
	C-100-3D	114.3	3.35	105.5	48275	287	206000	342.9	0.350	34	3.0	1455	
[45]	049C36 30	360	6	31.5	26379	498	202000	1760	1.109	60	4.9	6888	
[46]	C3	114.3	3.6	173.5	63000	403	213000	250	0.323	32	2.2	2422	
	C4	114.3	3.6	173.5	63000	403	213000	250	0.323	32	2.2	2340	
	C5	114.3	3.6	184.2	63000	403	213000	250	0.304	32	2.2	2497	
	C6	114.3	3.6	184.2	63000	403	213000	250	0.304	32	2.2	2314	
	C7	114.3	6.3	173.5	63000	428	209000	250	0.649	18	2.2	2610	
	C8	114.3	6.3	173.5	63000	428	209000	250	0.649	18	2.2	2633	
	C9	219.1	5	51.6	28000	377	205000	600	0.684	44	2.7	3118	
	C10	219.1	5	185.1	66000	377	205000	600	0.199	44	2.7	7813	
	C11	219.1	5	193.3	66000	377	205000	600	0.191	44	2.7	8527	
	C12	219.1	10	51.6	28000	381	212000	600	1.489	22	2.7	4309	
	C13	219.1	10	185	66000	381	212000	600	0.435	22	2.7	9085	
	C14	219.1	10	193.3	66000	381	212000	600	0.416	22	2.7	9187	
	C15	219.1	6.3	163	66000	300	202000	600	0.231	35	2.7	6915	
	C16	219.1	6.3	175.4	59000	300	202000	600	0.215	35	2.7	7407	
	C17	219.1	6.3	148.8	52000	300	202000	600	0.254	35	2.7	6838	
	C18	219.1	6.3	174.5	52000	300	202000	600	0.216	35	2.7	7569	
	[47, 48]	CF3-1	76.19	2.99	145	56595	278	200000	300	0.341	25	3.9	795
		CF3.3-1	76.18	3.31	145	56595	305	200000	300	0.419	23	3.9	847
C4NG-1		114.2	4.02	115	50402	306	200000	400	0.418	28	3.5	1428	
C6NG-1		114.3	5.98	115	50402	314	200000	400	0.675	19	3.5	1833	
[49]	c0	160	3.83	51	33900	409	200000	480	0.827	42	3.0	2023	

Maximization of $p(\alpha, \alpha_{\epsilon_n}^2 | y) \alpha p(y | \alpha, \alpha_{\epsilon_n}^2) p(\alpha) p(\alpha_{\epsilon_n}^2)$ concerning α and σ^2 provide a search for the hyperparameters posterior. For the case of uniform hyperpriors, maximization is to be performed for the terms of $p(y | \alpha, \alpha_{\epsilon_n}^2)$, as described below:

$$\begin{aligned}
 & p(y | \alpha, \alpha_{\epsilon_n}^2) \\
 = & \int p(y | w, \alpha_{\epsilon_n}^2) p(w | \alpha) dw = (2\pi)^{-1/2} |\alpha_{\epsilon_n}^2|^{-1} \\
 & + \Phi A^{-1} \Phi^T |^{1/2} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} y^T (|\alpha_{\epsilon_n}^2|^{-1} I \right. \\
 & \left. + \Phi A^{-1} \Phi^T)^{-1} y \right\}
 \end{aligned} \tag{18}$$

The predictions can be made based on the posterior distribution over the weights, conditioned on the maximized most probable values of α , $\sigma_{\epsilon_n}^2$, α_{MP} , and σ_{MP}^2 , respectively.

$$\begin{aligned}
 & p(y^* | y, \alpha_{MP}, \sigma_{MP}^2) \\
 = & \int p(y^* | w, \alpha_{MP}^2) p(w | y, \alpha_{MP}, \sigma_{MP}^2) dw
 \end{aligned} \tag{19}$$

Equation (19) can be evaluated as follows:

$$p(y^* | y, \alpha_{MP}, \sigma_{MP}^2) = N(y^* | t^*, \sigma_*^2) \tag{20}$$

$$t^* = \mu^T \Phi(x^*) \tag{21}$$

$$\sigma_*^2 = \sigma_{MP}^2 + \Phi(x^*)^T \sum \Phi(x^*) \tag{22}$$

The result of the optimization involved in RVM (i.e., max of $p(y | \alpha, \sigma_{\epsilon_n}^2)$), is that many of α tend to infinity such that “w” will have only a few nonzero weights that can be considered as relevant vectors [50].

4 RVM based analysis

In the present study, the main goal is to develop a model by using the concepts of RVM. To train the data and develop

a model, MATLAB software was used. The dependent parameters, such as f_c , E_c , f_y , E_s , ξ , D/t , and L/D are considered as the input parameters for developing the RVM model. The output from the model is the ultimate load capacity of CFSTCSCs, P_u . There are a total of 150 datasets for training as well as validation. On closer examination of Table 1, the input vector has a significant variation in magnitude. Hence, a normalization of the data was done before inputting into the algorithm. Equation (23) has been used for the linear normalization of the data ranging between 0 and 1.

$$x_i^n = \frac{x_i^a - x_i^{min}}{x_i^{max} - x_i^{min}} \quad (23)$$

where x_i^a and x_i^n = i^{th} component of the input vector before and after normalization, x_i^{max} and x_i^{min} = the maximum and minimum values of all the components of the input vector before the normalization, respectively. About 80% of dataset was for training the data and about 20% of the dataset is used for testing and verification of the RVM model. The most important input parameter is the selection of kernel width. Further, the training and testing R values are dependent on the number of relevance vectors (NRV) used in the model and their corresponding weights and variation in the kernel width. In the present study, the value of kernel width (σ) is assumed as 0.12. The efficiency of the model has been verified with the coefficient of correlation (R), which is given below:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (E_{ai} - \bar{E}_a)(E_{pi} - \bar{E}_p)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (E_{ai} - \bar{E}_a)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_{pi} - \bar{E}_p)^2}} \quad (24)$$

where E_{ai} and E_{pi} are the actual and predicted values, \bar{E}_a and \bar{E}_p are the mean of actual and predicted E values corresponding to n patterns, respectively. Figure 2 presents the schematic diagram of the RVM model. Table 2 presents the coefficient of correlation, the number of relevance vectors used in the development of the model. Table 3 shows the weights for the developed RVM model. By using Equation (18) and Equation (19) with w_0 as zero, the following equation has been deduced to predict P_u values of CFSTCSC members under axial compression loadings. The values of weights, w_i , for all the training datasets are available in Table 3.

$$y = P_u = \sum_{i=1}^{105} w_i \exp \left\{ - \frac{(x_i - x)^T (x_i - x)}{0.034} \right\} \quad (25)$$

By using Equation (25), the normalized output vector has been converted back to original value as

$$x_i^a = x_i^n (x_i^{max} - x_i^{min}) + x_i^{min} \quad (26)$$

where, x_i^n = normalized result obtained after the test for the i^{th} component

x_i^a = actual result obtained for i^{th} component
 x_i^{max} and x_i^{min} = maximum and minimum values of all the components of the corresponding input vector before the normalization

The developed model is applicable for the dataset in the range of yield strength of steels ($f_y = 186 \sim 853 \text{ MPa}$), concrete compressive strength ($f_c = 18 \sim 193 \text{ MPa}$), the outer diameter of circular sections ($D = 60 \sim 450 \text{ mm}$), the ratio of the outer diameter to the thickness ($D/t = 17 \sim 221$), and the ratio of the height to the outer diameter ($L/D = 1.8 - 4.9$). Table 4 presents the predicted ultimate axial load, P_u^{RVM} , and the corresponding experimental value, P_u^E . It can be very clearly seen that the predicted values by using the developed RVM model are comparable with each other. The maximum % difference between the predicted and the corresponding experimental value is about 11. The model can be used for the prediction of the ultimate load of CFSTCSC members under axial loading within the ranges of input data. The predicted values will be useful for the design of steel-concrete composite structures.

5 Conclusions

The concept of RVM has been employed for developing a model to predict the ultimate load of CFSTCSC members under axial loading. Large experimental data available in the literature on this concept has been collected. The data consists of large variations of geometry, mechanical properties, and ultimate loads. The influencing variables on the ultimate load have been identified after a close examination of the collected data. RVM is a machine learning methodology that uses Bayesian treatment to obtain parsimonious solutions for regression and classification. RVM is formulated based on the probabilistic concept and weights have been assigned iteratively and also related to a set of hyperparameters. RVM model was developed by using MATLAB software for training and prediction of the ultimate load capacity of CFSTCSCs. About 80% of the total datasets were used for training and about 20% of the remaining total datasets have been used for verification and validation of the developed model.

It was found that the predicted values are very much comparable with that of the corresponding experimental values. The predicted ultimate capacity is compared with that of the corresponding experimental value and the percentage difference between the predicted value and the corresponding experimental value is found to be less than 11%. The ratio of predicted and the corresponding experimental ultimate load P_u^{RVM}/P_u^E was found to vary between 0.90 and 1.06, respectively.

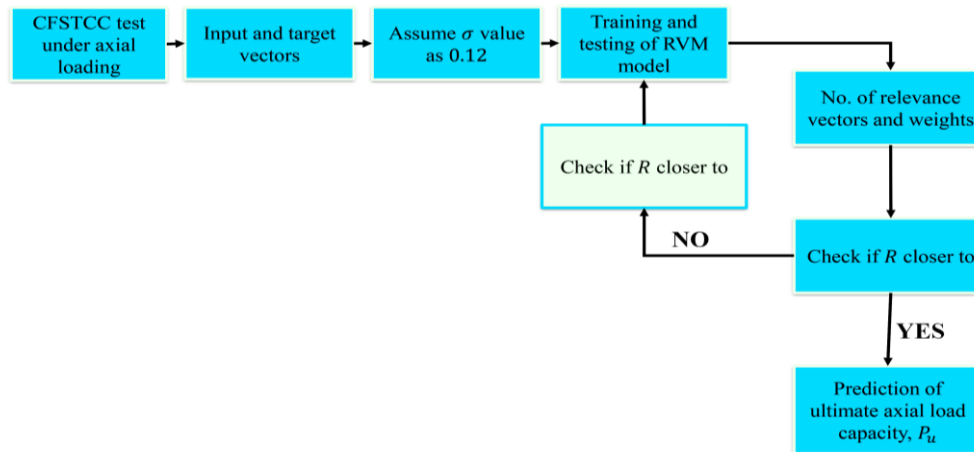


Figure 2. Schematic diagram for the proposed RVM model of CFSTCSC

Table 2. Performance of developed RVM models

Parameters	Coefficient of correlation (R)		Width	No. of RVs used out of total 105 dataset	No. of RVs (% of training dataset)
	Training	Testing			
P_u	0.996	0.991	0.12	85	80.5%

Table 3. Weights (w_i) for RVM models

$i = 1,2, \dots, 105$	w_i	$i = 1,2, \dots, 105$	w_i	$i = 1,2, \dots, 105$	w_i	$i = 1,2, \dots, 105$	w_i
1	0.0	30	0.0	60	0.0	90	0.1
2	0.052	31	0.0	61	0.20	91	0.01
3	0	32	0.01	62	0.0	92	0.02
4	0	33	0.012	63	0.02	93	0.01
5	0.06	34	0.06	64	0.01	94	0.0
6	0.03	35	0.001	65	0.04	95	0.01
7	0.1	36	0.01	66	0.0	96	0.1
8	0.12	37	0.03	67	0.0	97	0.21
9	0.04	38	0.01	68	0.03	98	0.0
10	0.160	39	0.02	69	0.05	99	0.0
11	0.11	40	0.3	70	0.23	100	0.03
12	0.05	41	0.02	71	0.02	101	0.02
13	0.054	42	0.0	72	0.01	102	0.10
14	0.05	43	0.0	73	0.10	103	0.0
15	0.11	44	0.08	74	0.0	104	0.0
16	0.10	45	0.0	75	0.08	105	0.01
17	0.212	46	0.001	76	0.01		
18	0.6	47	0.3	77	0.03		
19	0.1	48	0.01	78	0.02		
20	0.01	49	0.02	79	0.01		
21	0.01	50	0.012	80	0.02		
22	0.02	51	0.1	81	0.0		
23	0.03	52	0.6	82	0.3		
24	0.01	53	0.12	83	0.10		
25	0.12	54	0.06	84	0.02		
26	0.1	55	0.04	85	0.01		
27	0.11	56	0.03	86	0.01		
28	0.013	57	0.04	87	0.0		
29	0.03	58	0.0131	88	0.01		
		59	0.013	89	0.03		

Table 4. Comparison of experimental ultimate axial load values with predicted results obtained from RVM model

f_c (MPa)	f_y (MPa)	ξ	D/t	L/D	P_u (kN)		P_u^{RVM}/P_u^E
					P_u^E (kN)	P_u^{RVM} (kN)	
25.92	452	2.625	30	2.0	1112	1067	0.96
23.10	415	1.581	48	2.0	1201	1103	0.92
34.13	605	2.351	33	2.0	1112	1043	0.94
28.71	287	0.911	47	3.0	1040	1012	0.97
28.71	287	0.911	47	3.0	998	943	0.94
21.95	280	1.599	35	3.0	1087	1043	0.96
21.95	280	1.599	35	3.0	1096	1021	0.93
21.95	287	1.191	47	3.0	840	862	1.03
18.03	280	1.946	35	3.0	963	955	0.99
18.03	287	1.45	47	3.0	790	811	1.03
18.03	287	1.45	47	3.0	747	722	0.97
18.03	336	1.035	75	3.0	672	652	0.97
22.15	283	3.036	20	2.0	2102	2143	1.02
45.37	283	1.482	20	2.0	2667	2521	0.95
23.91	248	1.403	33	2.0	1530	1621	1.06
43.61	248	0.769	33	2.0	2030	2045	1.01
45.67	266	0.423	58	2.1	1608	1612	1.00
110.3	202	0.045	165	3.5	2991	2826	0.94
48.3	306	0.208	125	3.5	1695	1623	0.96
74.7	211	0.052	221	3.5	2451	2312	0.94
80.2	186	0.056	168	3.5	2295	2132	0.93
28.18	285	0.92	47	4.3	790	754	0.95
23.2	371	2.088	34	3.0	628	612	0.97
24.3	452	2.499	33	3.0	3278	3387	1.03
24.2	335	1.995	31	3.0	6319	6561	1.04
77	843	1.397	34	3.0	7304	7240	0.99
85.1	823	0.788	52	3.0	13776	14352	1.04
41.1	279	0.182	152	3.0	6870	6543	0.95
75.2	282	0.515	32	3.0	320	305	0.95
75.2	282	0.115	134	3.0	4102	3697	0.90
80	404	0.166	125	3.0	4800	4654	0.97

Hence the developed model will serve as a robust and reliable tool for the design of circular CFSTCSCs. The main focus of the present paper was to develop a model to predict the ultimate load capacity of CFSTCSCs based on RVM. Accordingly, the model was developed and the efficacy of the model was verified by the experimental data. The proposed model can be used in the modeling approach for the estimation of the ultimate load capacity of CFSTCSCs based on RVM.

Acknowledgments

Some or all raw/processed data required to reproduce these findings of this study will be made available from the corresponding author upon reasonable request. This research

received no external funding. The author has no conflict of interest to declare the research described in this paper.

Similarity rate (iThenticate): 15%

References

- [1] K. Sakino, Y. Sun, Steel jacketing for improvement of column strength and ductility. Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand, February, 2000.
- [2] O. I. Abdelkarim, A. Ghenni, S. Anumolu, S. Wang, M. ElGawady, Hollow-core FRP-concrete-steel bridge columns under extreme loading. Report No. cmr15-008; Missouri Department of Transportation Research,

- Development and Technology, Missouri University of Science and Technology, MO, USA, 2015.
- [3] L. H. Han, G. H. Yao, Experimental behaviour of thin-walled hollow structural steel (HSS) columns filled with self-consolidating concrete (SCC). *Thin-Walled Struct.*, 42(9), 1357–1377, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2004.03.016>.
- [4] L. H. Han, G. H. Yao, X. L. Zhao, Tests and calculations for hollow structural steel (HSS) stub columns filled with self-consolidating concrete (SCC). *J. Constr. Steel Res.*, 61(9), 1241–1269, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2005.01.004>.
- [5] D. L. Liu, W. M. Gho, J Yuan, Ultimate capacity of high-strength rectangular concrete-filled steel hollow section stub columns. *J. Constr. Steel Res.*, 59(12), 1499–1515, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(03\)00106-8](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(03)00106-8).
- [6] D. L. Liu, W. M. Gho, Axial load behaviour of high-strength rectangular concrete filled steel tubular stub columns. *Thin-Walled Struct.*, 43(8), 1131–1142, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2005.03.007>.
- [7] D. M. Lue, J. L. Liu, T. Yen, Experimental study on rectangular CFST columns with high-strength concrete. *J. Constr. Steel Res.*, 63(1), 37–44, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.03.007>.
- [8] Q. Yu, Z. Tao, Y. X. Wu, Experimental behaviour of high performance concrete filled steel tubular columns. *Thin-Walled Struct.*, 46(4), 362–370, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2007.10.001>.
- [9] B. Uy, Strength of short concrete filled high strength steel box columns. *J. Constr. Steel Res.*, 57(2), 113–134, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0143974X\(00\)00014-6](https://doi.org/10.1016/S0143974X(00)00014-6).
- [10] F. Aslani, B. Uy, Z. Tao, F. Mashiri, Behaviour and design composite columns incorporating compact high-strength steel plates. *J. Constr. Steel Res.*, 107, 94–110, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.01.005>.
- [11] ANSI/AISC-360-10, Specification for Structural Steel Buildings. Illinois 60601-1802, American Institute of Steel Construction, Chicago, 2010. <https://www.aisc.org/Specification-for-Structural-Steel-Buildings-ANSIAISC-360-16-1>.
- [12] Eurocode 4: EN 1994-1-1 (2004) (English): Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings [Authority: The European Union per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]. <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/showpage.php?id=134>.
- [13] P. Yuvaraj, A. R. Murthy, N. R. Iyer, P. Samui, S. K. Sekar, Multivariate adaptive regression splines model to predict fracture characteristics of high strength and ultra high strength concrete beams. *Comput. Mater. Contin.*, 36(1), 73–97, 2013. <https://doi.org/10.3970/cmc.2013.036.073>.
- [14] P. Yuvaraj, A. R. Murthy, N. R. Iyer, P. Samui, S. K. Sekar, Prediction of fracture characteristics of high strength and ultra high strength concrete beams based on relevance vector machine. *Int. J. Damage Mech.*, 23(7), 979–1004, 2014. <https://doi.org/10.1177/1056789514520796>.
- [15] S. Dutta, A. R. Murthy, D. Kim, P. Samui, Prediction of compressive strength of self-compacting concrete using intelligent computational modelling. *Comput. Mater. Contin.*, 53(2), 157–174, 2017. <https://doi.org/10.3970/cmc.2017.053.167>.
- [16] J. Kaur, K. Kaur, A fuzzy approach for an IoT-based automated employee performance appraisal. *Comput. Mater. Contin.*, 53(1), 23–36, 2017. <https://doi.org/10.3970/cmc.2017.053.024>.
- [17] A. R. Murthy, S. Vishnuvardhan, M. Saravanan, P. Gandhi, Relevance vector based approach for the prediction of stress intensity factor for the pipe with circumferential crack under cyclic loading. *Struct. Eng. Mech.*, 72(1), 31–41, 2019. <https://doi.org/10.12989/sem.2019.72.1.031>.
- [18] P. K. Prasanna, A. R. Murthy, K. Srinivas, Prediction of compressive strength of GGBS based concrete using RVM. *Struct. Eng. Mech.*, 68(6), 691–700, 2018. <https://doi.org/10.12989/sem.2018.68.6.691>.
- [19] C. Avcı-Karatas, Prediction of ultimate load capacity of concrete-filled steel tube columns using multivariate adaptive regression splines (MARS). *Steel Compos. Struct.*, 33(4), 583–594, 2019. <https://doi.org/10.12989/scs.2019.33.4.583>.
- [20] A. Gholampour, I. Mansouri, O. Kisi, T. Ozbakkaloglu, Evaluation of mechanical properties of concretes containing coarse recycled concrete aggregates using multivariate adaptive regression splines (MARS), M5 model tree (M5Tree), and least squares support vector regression (LSSVR) models. *Neural Comput. Appl.*, 32, 295–308, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00521-018-3630-y>.
- [21] M. E. Tipping, Sparse Bayesian learning and the relevance vector machine. *J. Mach. Learn. Res.*, 1, 211–244, 2001.
- [22] M. E. Tipping, The relevance vector machine. In S. A. Solla, T. K. Leen, and K.-R. Muller, editors, *Advances in Neural Information Processing Systems*, 12, 652–658, 2000.
- [23] L. Wei, Y. Yang, R. M. Nishikawa, M. N. Wernick, A. Edwards, Relevance vector machine for automatic detection of clustered micro-calcifications. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 24(10), 1278–1285, 2005. <https://doi.org/10.1109/TMI.2005.855435>.
- [24] S. K. Das, P. Samui, Prediction of liquefaction potential based on CPT data: A relevance vector machine approach. *Proceedings of the 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)*, October, 2008, Goa, India, 2008.
- [25] W. Caesarendra, A. Widodo, B. S. Yang, Application of relevance vector machine and logistic regression for machine degradation assessment. *J. Mech. Syst. Signal Process.*, 24, 1161–1171, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2009.10.011>.
- [26] X. Wang, M. Ye, C. J. Duanmu, Classification of data from electronic nose using relevance vector machines.

- Sens. Actuators B Chem., 140(1), 143–148, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2009.04.030>.
- [27] K. Liu, Z. Xu, Traffic flow prediction of highway based on wavelet relevance vector machine. *J. Inf. Comput. Sci.*, 8(9), 1641–1647, 2011.
- [28] M. H. Stanikzai, S. Elias, R. Rupakhety, Seismic response mitigation of base-isolated buildings. *Appl. Sci.*, 10(4), 1230, 2020. <https://doi.org/10.3390/app10041230>.
- [29] H. Dehghani, I. Mansouri, A. Farzampour, J. W. Hu, Improved homotopy perturbation method for geometrically nonlinear analysis of space trusses, *Appl. Sci.*, 10(8), 2987, 2020. <https://doi.org/10.3390/app10082987>.
- [30] N. J. Gardener, R. Jacobson, Structural behavior of concrete filled steel tubes. *J. Am. Concr. Inst.*, 64(7), 404–413, 1967.
- [31] N. J. Gardener, Use of spiral welded steel tubes in pipe columns. *J. Am. Concr. Inst.*, 65(11), 937–942, 1968.
- [32] M. Tomii, K. Yoshimura, Y. Morishita, Experimental studies on concrete filled steel tubular stub columns under concentric loading. *Proceedings of the International Colloquium on Stability of Structures under Static and Dynamic Loads*, Washington, USA, May, 718–741, 1977.
- [33] K. Sakino, H. Hayashi, Behavior of concrete filled steel tubular stub columns under concentric loading. *Proceedings of the 3rd International Conference on Steel Concrete Composite Structures*, Fukuoka, Japan, September, 25–30, 1991.
- [34] M. D. O’Shea, R. Q. Bridge, Tests of thin-walled concrete-filled steel tubes. *Proceedings of the 12th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, St. Louis, USA, October, 399–419, 1994. <https://scholarsmine.mst.edu/iscss/12iccfss/12iccfss-session7/3>.
- [35] M. D. O’Shea, R. Q. Bridge, Tests on circular thin-walled steel tubes filled with medium and high strength concrete. *Australian Civil Engineering Transaction*, 40, 15–27, 1998.
- [36] S. P. Schneider, Axially loaded concrete-filled steel tubes. *J. Struct. Eng.*, 124(10), 1125–1138, 1998. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339445\(1998\)124:10\(1125\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339445(1998)124:10(1125)).
- [37] K. F. Tan, X. C. Pu, S. H. Cai, Study on mechanical properties of extra-high strength concrete encased in steel tubes, *J. Build. Struct.*, 20(1), 10–15, 1999. http://manu25.magtech.com.cn/Jwk3_jzjgxb.
- [38] T. Yamamoto, J. Kawaguchi, S. Morino, Experimental study of scale effects on the compressive behavior of short concrete-filled steel tube columns, *Proceedings of the United Engineering Foundation Conference on Composite Construction in Steel and Concrete IV (AICE)*, Banff, Canada, June, 879–891, 2000. [https://doi.org/10.1061/40616\(281\)76](https://doi.org/10.1061/40616(281)76).
- [39] C. S. Huang, Y. K. Yeh, G. Y. Liu, H. T. Hu, K. C. Tsai, Y.T. Weng, S. H. Wang, M. H. Wu, Axial load behavior of stiffened concrete-filled steel columns. *J. Struct. Eng.*, 128(9), 1222–1230, 2002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339445\(2002\)128:9\(1222\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339445(2002)128:9(1222)).
- [40] G. Giakoumelis, D. Lam, Axial capacity of circular concrete-filled tube columns, *J. Constr. Steel Res.*, 60(7), 1049–1068, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2003.10.001>.
- [41] K. Sakino, H. Nakahara, S. Morino, I. Nishiyama, Behavior of centrally loaded concrete-filled steel-tube short columns, *J. Struct. Eng.*, 130(2), 180–188, 2004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339445\(2004\)130:2\(180\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339445(2004)130:2(180)).
- [42] P. K. Gupta, S. M. Sarda, M. S. Kumar, Experimental and computational study of concrete filled steel tubular columns under axial loads. *J. Constr. Steel Res.*, 63(2), 182–193, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.04.004>.
- [43] Z. W. Yu, F. X. Ding, C. S. Cai, Experimental behavior of circular concrete filled steel tube stub columns. *J. Constr. Steel Res.*, 63, 165–174, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.03.009>.
- [44] W. L.A. de Oliveira, S. de Nardin, A. L. H. de Cresce El Debs, M. K. El Debs, Influence of concrete strength and length/diameter on the axial capacity of CFT columns. *J. Constr. Steel Res.*, 65(12), 2103–2110, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2009.07.004>.
- [45] S. H., Lee, B. Uy, S. H. Kim, Y. H. Choi, S. M. Choi, Behavior of high-strength circular concrete-filled steel tubular (CFST) column under eccentric loading. *J. Constr. Steel Res.*, 67, 1–13, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.07.003>.
- [46] M. X., Xiong, D. X. Xiong, J. Y. R. Liew, Axial performance of short concrete filled steel tubes with high- and ultra-high- strength materials. *Eng. Struct.*, 136, 494–510, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.01.037>.
- [47] S. Guler, A. Copur, M. Aydogan, Axial capacity and ductility of circular UHPC-filled steel tube columns. *Mag. Concrete Res.*, 65(15), 898–905, 2013. <https://doi.org/10.1680/macr.12.00211>.
- [48] S. Guler, A. Copur, M. Aydogan, A comparative study on square and circular high strength concrete-filled steel tube columns. *Adv. Steel Constr.*, 10(2), 234–247, 2014. <https://doi.org/10.18057/IJASC.2014.10.2.7>.
- [49] L. H., Han, C. C. Hou, Q. L. Wang, Behavior of circular CFST stub columns under sustained load and chloride corrosion. *J. Constr. Steel Res.*, 103, 23–36, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.07.021>.
- [50] S. Ghosh, P. P. Mujumdar, Statistical downscaling of GCM simulations to streamflow using relevance vector machine. *Adv. Water Resour.*, 31(1), 132–146, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2007.07.005>.





Yapay sinir ağları ile Marshall stabilite değerinin tahmini

Estimation of Marshall stability value with artificial neural networks

Recep Koray Kıyıldı^{1,*} 

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

Özet

Bu makalede, Niğde-Adana otoyolu inşaatında yapılan Marshall stabilite deneylerinden faydalanılmıştır. Karot numune üzerinde yapılan deneylerin sonuçları Yapay Sinir Ağları (YSA) ile modellenmiştir. Asfalt betonu karışımı numunesi üzerinde yapılan Marshall stabilite deneyinde; agrega ağırlığına göre bitüm yüzdesi, karışım içindeki bitümün ağırlıkça yüzdesi, hacim özgül ağırlığı ve boşluk değerlerine bağlı olarak bulunan Marshall stabilite değeri YSA yöntemine göre tahmin edilmiştir. Yapılan eğitim sonucu elde edilen tahmin modeli, önceden ayrılan deney sonuçları ile denetlendiğinde, YSA modelinin tahmin ettiği Marshall stabilite değerleri ile deneysel olarak elde edilen değerlerin arasında iyi bir ilişkinin olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Asfalt betonu, Marshall deneyi, Yapay sinir ağları

1 Giriş

Günümüzde, yeni yapılan konforlu yollar daha çok ulaşım talebi oluşturmaktadır. Karayolu taşımacılığı diğer sektörleri de tetikleyerek geliştirmekte, en önemli lokomotif faktörlerin başında gelmektedir. Karayolu yapılırken uzun süre hizmet verebilmesi için, günümüz inşaat standartlarına uygun olarak yapılması, güvenli seyahat imkanlarının minimum maliyetle sağlanması çok önemlidir.

Bir ülkenin ekonomik ve sosyal bakımdan gelişmesi karayolu ağının tüm ülkeye yayılmasıyla doğrudan ilişkilidir. Karayolu inşaatı rijit ve esnek üstyapı olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır. Ülkemizde esnek üstyapı türü daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Esnek üstyapılar tasarımı yapılan üstyapı kalınlığına göre birden çok tabakaları içerebilmektedir. Bunlar içerisinde trafik yüklerine en fazla maruz kalan tabaka kaplama tabakasıdır. Bundan dolayı maruz kalacağı gerilmelere dayanabilmesi için bu tabakanın yüksek Elastisite Modülüne sahip olması son derece önemlidir. Bu sayede alt tabakalara iletilen gerilmeler de azaltılmış olmaktadır.

Yapılacak karayolunun bölge özelliklerini de dikkate alarak projelendirilmesi ve bölge çevresinden elde edilebilecek malzemeler kullanılarak inşa edilmesi daha ekonomik sonuçlar vermektedir. Bu nedenle üstyapı dizaynında kullanılacak malzemelerin özelliklerinin çok iyi tespit edilmesi gereklidir.

Abstract

In this article, Marshall stability tests carried out in Niğde-Adana highway construction site were used. The results of the experiments performed on the core sample were modelled by Artificial Neural Networks (ANN). In Marshall stability test performed on the specimen of asphalt concrete mixture; the Marshall stability values, which are determined by the percentage of bitumen according to the weight of aggregate, the percentage by weight of the bitumen in the mixture, the volume specific gravity and the void values, were estimated by using the ANN method. When the prediction model obtained as a result of the training was inspected with the previously separated experimental results, it was determined that there was a good relationship between the Marshall stability values estimated by the ANN model and the experimentally obtained values.

Keywords: Asphalt concrete, Marshall test, Artificial neural networks

Karayolu inşaatında kullanılan deneyler zaman alıcı ve maliyeti yüksek deneylerdir. Bunun yanında inşaat sonunda karayolundan karot alınarak yapılan deneylerle üstyapı tahrip edilmekte ve bunun sonucu olarak çeşitli bozulmalar tetiklenebilmektedir. Bu deneylerin belli karayolu kesimlerinde rutin olarak yapılmasının yanında, yapılacak deneylere hızlı ve kolay çözümler sunan yeni yöntemler üzerinde araştırmalar yapılması son derece önem arz etmektedir.

Dünyada karayolu inşaatının gelişimi ve yeni inşaat tekniklerinin araştırılması halen devam eden bir süreçtir. Bu konuda çok sayıda çalışma yapılmış olup, özellikle sıcak karışım asfalt dizaynı konusunda yapılan temel gelişmelerle ilgili [1-7] çalışmaları sayılabilir. Bu gelişmelere paralel olarak ülkemizde Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM), belediyeler ve üniversiteler tarafından yapılan çok sayıda çalışma vardır [8-22].

Günümüzde sert optimizasyon teknikleri yerine, yumuşak hesaplama kullanımı ön plana çıkmıştır. YSA bu yaklaşımlardan birini oluşturmaktadır. YSA kullanılarak yeni çözümler geliştirilmektedir. Karayolu inşaatı konusunda, YSA ve bulanık mantık yöntemlerinin kullanılmasıyla çok sayıda yayın yapılmış olup [23-56], gelişen bilgisayar teknolojileri ile bu çözümler her geçen gün daha fazla alanda daha gerçekçi çözümler bizlere sunmaktadır.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: rkoray@ohu.edu.tr (R.K. Kıyıldı)

Geliş / Received: 22.01.2021 Kabul / Accepted: 22.02.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.866566

2 Materyal ve metot

2.1 Esnek üstyapı karayolu kaplaması

Karayolu üstyapısı inşaat çeşitlerinden birisi olan esnek üstyapı; bitümlü karışımlardan oluşan çeşitli tabakalar halinde yapılmaktadır. Klasik bir üstyapı kesiti; doğal zemin, alt temel, temel ile bitüm kullanılarak imal edilen binder ve aşınma tabakalarından oluşur. Sonuçta imal edilen esnek üstyapı kaplamasının performansı, tamamen şartname kurallarına uygun malzeme ve inşaat teknikleri kullanımına bağlıdır. En üstte bulunan kaplama tabakası büyük gerilmelere direk temasta olacağından, buraya serilecek malzemenin elastisite modülünün yüksek olması hedeflenir. Karışımındaki agrega miktarı yaklaşık %92 iken bitüm oranı ise %8 civarındadır [8]. Kaplama tabakasının çok kalın yapılması taşıyacağı tekrarlı dingil yükü sayısını da artırır. Bu sayede alt tabakalara etkiyen basınç ve kayma gerilme miktarı azalır.

Taşıma gücü zayıf olan zeminlerde temel tabakasının taşıma gücünü artırmak için; çimento, bitüm bağlayıcı karışım, sıkıştırılmış zemin, dikkatle seçilmiş granüler malzeme kullanılarak zeminin taşıma gücü artırılabilir.

2.1.1 Marshall stabilite deneyi

Bitümlü karışım; asfalt malzeme ile granüler malzemenin plentte karıştırılmasıyla elde edilir. Hazırlanan bu karışıma asfalt betonu da denir. Asfalt betonu tasarlanan karışım şartname koşullarını sağlayacak nitelikte hazırlanmalıdır. Bunu içinde kullanılacak malzemelerin nitelikleri iyi etüt edilmeli, tartılar doğru yapılmalı, karışım uygun sıcaklık derecesinde karıştırılmalıdır. Uygun şartlar gerçekleştiğinde elde edilen karışım serilmeye müsait işlenebilirlikte olmalıdır. Sonrasında uygun taşıma araçlarıyla taşınarak, serme makinesi yardımıyla istenilen kalınlıkta serilerek, silindirlerle sıkıştırılır.

Marshall stabilite deneyi, ASTM D 1559 (Marshall deney aletleri ile bitümlü karışımların plastik akmaya karşı direnci) bölümünde yayınlanmıştır [9].

Marshall deney malzemeleri şartname şartlarına göre hazırlanmalıdır. Hazırlanan numuneler 64 mm yüksekliğinde, 102 mm çaplı karot şeklindedir. Deney numunelerinin stabilitesi, standart numunenin 60 °C sıcaklıkta sağlayacağı Newton (lb.) biriminde maksimum yük mukavemetidir. Akma değeri, stabilite deneyi boyunca yüksüz ve maksimum yük konumları arasında numunenin göstereceği 0,25 mm. biriminde toplam deformasyondur.

Marshall deneyinin yapılmasındaki amaç karayolunun şartnameye uygun stabilite değerinde inşa edilmediğini belirlemektir. Serim işlemi yapacak olan kamyondan ya da finişer arkasından bitüm agrega karışımı malzemenin numune alınarak sıcaklığı ölçülür, bu ölçüm 150 °C' den fazla ise deney için uygundur. Laboratuvarda numune kapları 160 °C lik etüvde bekletilir. Alınan numune silindir kaplara yerleştirilir, yerleştirilen numunenin iyice sıkışması için numune şişlenir ve yüzeyi yuvarlak fitre kağıdıyla kapatılır. Sonra tokmak makinesine numune yerleştirilip, 460 mm yükseklikten 4550 kg ağırlığındaki tokmak serbest düşüş uygulayarak numunenin altlı ve üstlü her iki yüzeyine 75 darbe vurulur. Daha sonra numunenin alt

ve üst yüzeyindeki fitre kağıtlarını spatula ile sıyrılıp çıkartılır [10-11].

Numune bir gün bekletilir ve daha sonra numune, numune kabından kriko ile çıkartılır. Numunenin havadaki ağırlığı tartılır, sonra sudaki ağırlığı tartılır ve son olarak sudan çıkartılır numunenin yüzeyi havlu ile silinerek tartılır ve doymuş yüzey ağırlığı bulunur. Numunenin doymuş yüzey ağırlığından sudaki ağırlığı çıkarılarak numunenin hacmi bulunur. Sonra ise numunenin havadaki ağırlığı, hesaplanan hacme bölünerek numunenin özgül ağırlığı bulunur. Su banyosunu 60 °C' ye ayarlanır ve numune (biriket) 45 dakika su banyosunda bekletildikten sonra çıkarılıp yüzeyi havlu ile iyice kurulanır. Daha sonra numune kırma makinesine alınır ve kırılır. Biriketin kırıldığı anda ekranda yazan yük değeri stabiliteyi ve iğne ise numunenin akma değerini ölçer. Maksimum yük değeri ve akma değeri okunarak kaydedilir. Burada dikkat edilmesi gereken bir nokta da, hazırlanan numunenin su banyosundan alınıp kırma işleminin başlanmasına kadar geçen sürenin 0.5 dakikadan fazla olmamasıdır. Burada 3 ayrı numune alınarak, bu üç numunenin ortalama değeri alınır. Hesaplanan stabilite değerleri düzeltme faktörleri ile çarpılarak düzeltilmiş stabilite değerleri bulunur. Stabilite düzeltme faktörü ise biriket boylarına göre değişir. 63.5 mm' lik bir numunenin düzeltme faktörü 1 olarak kabul edilir, fakat numunenin boyu 63.5 mm den farklı ise düzeltmeye ihtiyaç vardır. Deney sonuçları bir rapor şeklinde sunulmalıdır. Rapor kısmında; deneye alınan numunenin cinsi, yani karot numune mi kullanıldı, yoksa laboratuvarda sıkıştırılmış numune mi kullanıldı belirtilmelidir. Ayrıca raporda, maksimum yük değeri, stabilite değeri olarak alınır ve gerekirse düzeltme uygulanır. Maksimum yük anındaki deformasyon değeri plastik akma olarak alınır.

Laboratuvar ortamında Marshall deneyinin yapılması durumunda ise Marshall numuneleri ASTM D 1559 da belirtilen standartlara göre hazırlanır. Laboratuvar koşullarında hazırlanan numunelerin her bir yüzeyine 50 darbe uygulanır. Dört farklı şekilde hazırlanan Marshall numuneleri her bir karışıma 1200 gr agrega konularak hazırlanır.

Deneyde önce boş olan numune kabının ağırlığı tartılır. Sonra numune kabına bitüm numunesi yerleştirilir ve bir kez daha tartılır. Daha sonra sıcaklığı 163 °C olan ve dakikada 5-6 devir dönebilen etüve numune yerleştirilir. Numune 5 saat boyunca etüvde bekletilir. 5 saat sonunda etüvden çıkartılan numune tartılır. Daha sonra numunenin 5 saat boyunca kaybettiği kütle kaybının yüzdesi hesaplanır. Şartnamelere göre maksimum %1 kayba izin verilir.

Sıcak karışımlar çok farklı metotlar kullanılarak hazırlanabilmektedirler. Bunlardan en çok tercih edilen karışım metodu olan Marshall sıcak karışım dizayn metodudur. Marshall karışım metodu her boydaki agrega karışımlarından oluşan kaplama karışımlarında uygulanamaz. Bu metodun uygulanabilmesi için agrega boyunun en fazla 25 mm olması gerekmektedir.

Marshall sıcak karışım yöntemi, Marshall deney düzeneğiyle silindir şeklindeki numunenin yan yüzeylerine yüklemeye yaparak plastik akmaya karşı olan direncini ölçme ilkesine dayanmaktadır. Marshall sıcak karışım metodu; sıvı

petrol asfaltı, asfalt çimentosu, katran veya dane boyutu 25 mm ye kadar olan agregalar için uygulanmaktadır. Bu metot bitümlü karışımların laboratuvar karışım dizaynında uygulanmaktadır. Marshall karışım dizaynında kullanılmak üzere numuneler standartlarda belirtilen koşullarda hazırlanırlar ve maksimum yük ve akma testine tabii tutulurlar. Yoğunluk ve boşluk oranları gibi belirleyici özellikler hazırlanan numuneler üzerinde saptanmalıdır. Marshall metodunda uygulanan deneylerde kullanılan numuneler, başka metotlarla hazırlanmış veya asfalt yoldan alınmış olan bitümlü karot numuneler kullanılarak maksimum akma ve yük değerlerinin bulunması sağlanabilir. Ancak sonuçlar Marshall metodunda bulunan sonuçlardan farklı olabilmektedir. Stabilitate değerleri standartlarda verilen düzeltme faktörleri ile çarpılarak düzeltilir [12].

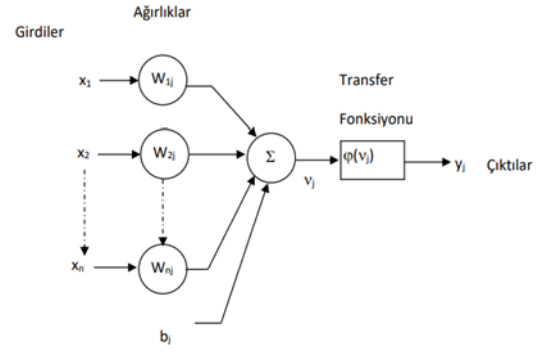
2.2 Yapay sinir ağları

Mühendislik dallarında YSA kullanımı giderek yayılmakta ve etkili sonuçların alındığı görülmektedir. Bunlara örnekler verecek olunursa, karayolu kaplama dizaynı, kaplamanın durumunu inceleyerek ne tür bakımların yapılması gerektiğinin planlanması, ulaşım da trafik yoğunluğunun izlenerek yoğunluğun arttığı yönlerdeki yeşil ışık sürelerinin yeniden ayarlanarak uygulanması, uzun vadeli ulaştırma planlaması tasarlayarak oluşacak talebi taşıma problemlerine çözümler üretilmesi sayılabilir.

YSA eldeki verileri öğrenme mantığıyla çalışan bir sistemdir. Diğer bir deyişle ne kadar çok veri girilirse o kadar doğru sonuçlar bulunmaktadır. YSA öğrendiklerini anımsayarak bilgiler arasındaki en etkili çözümü bulabilme mantığına sahiptir. Bu çalışma mekanizması insan sinir sistemi yapısına benzediği için bu adı almıştır. İnsan vücudunda biyolojik nöronlar vardır. Bu nöronlar insan vücuduna gelen uyarıları birbirlerine ileterek beyine gönderirler. Burada mantık bu uyarıların en kısa yoldan beyine ulaştırılması ve beynin kararını vererek yapacağı eylemi gerçekleştirmeye yönelik emirleri vermesidir. YSA da buna benzer bir yapıda çalışmaktadır. YSA da yapay nöronlar temel işlemci görevini yürütmektedir. Bir yapay nöronun yapısı sıralayacak olunursa; girdi verileri, ağırlıklar, toplama (aktivasyon) fonksiyonları, transfer fonksiyonları ve çıkış verileri ifade edilebilir. Burada esas olan en hızlı ve doğru öğrenme yapan fonksiyonları içeren algoritmanın bulunması ve bunun uygulanmasıdır.

Şekil 1 de Temel bir YSA nöronun yapısal şeması görülmektedir [23].

Şekil 1 de verilen X verileri (X_1, X_2, \dots, X_n) girdi değerleridir. Bu değerler bağlantılardaki ağırlıklarla ($W_{1j}, W_{2j}, \dots, W_{nj}$) hücreye girer. Bir ağırlık değerinin diğer ağırlık değerine göre büyük olması o hattaki girişin sinire daha kuvvetli bağlanması manasına gelmektedir. Bu veriler toplama fonksiyonundan geçirilerek hücreye giren girdiler hesaplanır.



Şekil 1. Temel bir YSA nöronun şeması.

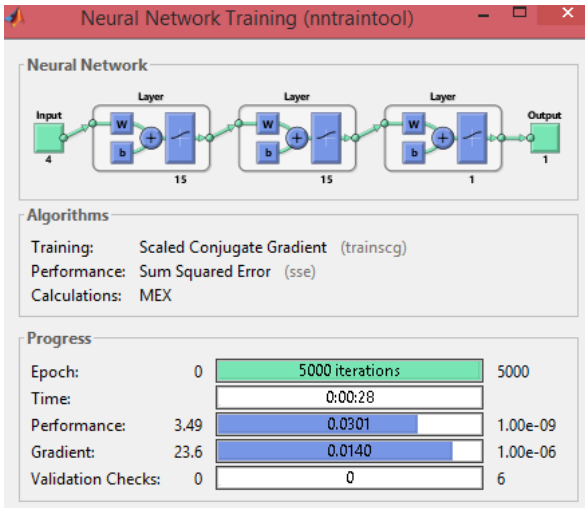
Toplama fonksiyonu gelen her bir ağırlığın ait olduğu girişlerle çarpımının toplamına eşik değerinin ilave edilmesiyle bulunur. Elde edilen bulgu transfer fonksiyonundan geçirilerek hücre çıktı değeri bulunur. Burada transfer fonksiyonu devamlı ve türevlenebilir bir şekilde çalışarak eğitimi tamamlar. YSA araştırmasında çok sayıda transfer fonksiyonu kullanılmaktadır. Mühendislik problemlerinin çözümünde daha çok tanjant hiperbolik, tanjant sigmoid, doğrusal fonksiyonlarının tercih edilmesiyle hızlı sonuçların alındığı görülmektedir nöronların bir araya gelmesiyle YSA mimarisi oluşmaktadır. Temel bir YSA mimarisinde; giriş tabakası, gizli tabaka ve çıkış tabakası bulunmaktadır.

Asfalt betonu inşaatından alınan bir karot numunenin Marshall stabilite değerinin belirlenmesi birçok parametreyi içermektedir. Bunun yanında deneyi yapan kişinin yetkinliği, laboratuvar aletlerinin uygunluğu ve çevresel etkiler gibi birçok faktör de deney sonuçlarına etki edebilmektedir. Bunu önleyebilmek için belli sayıda alınan örnekler üzerinde deneyler yapılarak hesaplanan ortalama değerin kullanılması, laboratuvar ortamında yapay olarak elde edilen numunenin deney sonuçlarının birtakım düzeltme faktörleriyle düzeltilmesi sayılabilir. Hazırlanan bir YSA modelinde tüm değişkenlerin modele eklenmesi genelde mümkün değildir. Bunun yanında tüm değişkenlerin modele eklenmesi modelin hızlı bir şekilde sonuç vermesi bakımından da uygun değildir. Yapılacak modellemede belli değişkenlerin alınması yeterlidir.

Bu çalışmada Niğde-Adana otoyolu inşaatında yapılan Marshall stabilite deney sonuçlarından faydalanılmıştır. Rutin olarak her gün dökülen asfalt betonu karışımından belli kilometrelerden alınan 62 adet karot numune üzerinde yapılan deneylerin sonuçları YSA ile modellenmiştir. Geliştirilen modelde, agrega ağırlığına göre bitüm yüzdesi (W_a), karışım içindeki bitümün ağırlıkça yüzdesi (W_b), hacimce özgül ağırlık (D_p) ve boşluk yüzdesi (V_b) girdi verileri olarak alınırken, Marshall deneyi sonuçlarından stabilite değeri (MS_d) çıktı verisi olarak alınarak tahmini yapılmıştır.

Öncelikle belirlenen girdi değerleri ve çıktı değerleri yapılan deney föylerinden çıkartılarak hazırlanmıştır. 62 deney sonucunun 50 tanesi eğitim amacıyla kullanılmıştır. Kalan 12 tanesi ise yapılan eğitim sonucu geliştirilen modelin test edilerek denetlenmesinde kullanılmıştır. Modellemede kullanılan veriler (Tablo1) verilmiştir.

YSA modellemesinde çözümlerler MATLAB programında yapılmıştır. Elde edilen veriler eğitim ve test dosyası olarak hazırlanmıştır. Bu dosyalar normalizasyon uygulanarak programa yüklenmiştir. Yapılan çeşitli denemeler sonucunda en uygun eğitim ve test sonuçlarını veren Şekil 2 'de verilen YSA mimarisi 4*15*15*1 ağ yapısı seçilerek kullanılmıştır. Modellemeci için esas problem gizli katmandaki nöron sayısının ve transfer fonksiyonunun doğru belirlenmesi sorunudur. Seçilen bu mimaride öğrenme algoritması olarak, sinir ağlarının eğitiminde: scaled conjugate gradient backpropagation (Trainscg) algoritması ve aktivasyon fonksiyonu olarak da logaritma-sigmoid (logsig log) transfer fonksiyonu kullanılmıştır. Seçilen ağ yapısı 4 girdili, 1. gizli tabakada 15 nöronlu 2. katmanda 15 nöronlu ve 1 çıktılı ağ yapısıdır. Sonuçta eğitim ve test verileri için elde edilen hata karelerinin toplamı (SSE) sırasıyla 0.0301 ve 0.0704 olarak bulunmuştur. Sonuçta yapılan eğitim sonucu elde edilen tahmin modeli, önceden ayrılan deney sonuçları ile denetlendiğinde, YSA modelinin tahmin ettiği Marshall stabilite (MSt) değerleri ile deneysel olarak elde edilen değerlerin arasında iyi bir ilişkinin olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 2. Çalışmada belirlenen YSA mimari yapısı.

Şekil 2 den de anlaşılacağı gibi 4 girdi verisi, 2 gizli tabakada eğitilerek, bir çıktı verisi üretilmiştir. Burada esas konu üretilen çıktının hata güncellemesinin yapılmasıdır. Bir sonraki adımda hata geri yayılarak ağırlıklar yeniden dağıtılarak belirlenmekte ve yeni değerlere göre eğitim tekrar yapılmaktadır. Eğitim sonunda elde edilen sonuç SSE ile sonlandırılır. Burada performans karesel hataların toplamına göre ölçülmektedir. İfadesi Denklem (1) de verilmiştir.

$$SSE = \sum_{i=1}^m (T_i - out_i)^2 \quad (1)$$

Bu denklemdeki SSE; performansı karesel hataların toplamına göre ölçer ve hatadan kaynaklanan karelerin toplamıdır. T_i gerçek verilerin ortalaması, out_i gerçek veri değeridir.

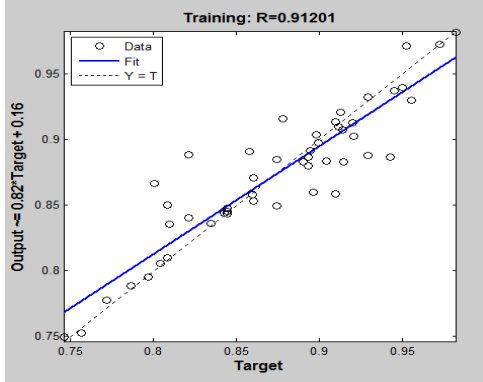
Tablo 1. Modellemede kullanılan Marshall deneyi girdi ve çıktı değerleri

W_a %	W_b %	D_p gr/cm ³	V_h %	MS_d kg	MS_t kg
3.82	3.68	2.429	4.51	1418	1388
3.91	3.76	2.399	5.54	1523	1492
3.92	3.77	2.407	5.24	1173	1171
4.02	3.87	2.408	5.07	1273	1315
3.84	3.7	2.419	4.86	1389	1339
3.93	3.78	2.39	5.91	1410	1421
4.08	3.92	2.414	4.74	1333	1349
3.75	3.61	2.407	5.46	1472	1447
3.8	3.66	2.546	4.71	1309	1307
3.73	3.59	2.43	4.58	1384	1372
4.02	3.87	2.427	4.31	1394	1388
4.03	3.88	2.413	4.84	1333	1326
3.8	3.66	2.426	4.66	1386	1395
3.82	3.68	2.417	4.99	1392	1398
3.91	3.76	2.413	5.01	1415	1419
3.84	3.7	2.393	5.89	1507	1484
3.84	3.69	2.412	5.16	1465	1450
3.85	3.71	2.383	6.28	1417	1417
3.86	3.72	2.421	4.77	1384	1378
3.81	3.67	2.403	5.54	1440	1494
3.89	3.75	2.412	5.07	1476	1504
4.03	3.88	2.407	5.07	1355	1314
3.81	3.66	2.418	4.95	1255	1303
3.94	3.79	2.412	5.01	1426	1423
4.11	3.95	2.415	4.67	1294	1290
4.09	3.93	2.427	4.22	1235	1239
3.79	3.65	2.382	6.4	1246	1245
3.76	3.63	2.425	4.73	1330	1372
3.85	3.71	2.419	4.88	1253	1319
3.75	3.61	2.422	4.9	1309	1293
3.95	3.8	2.431	4.26	1309	1323
4.04	3.88	2.406	5.1	1156	1158
3.89	3.74	2.427	4.51	1401	1366
3.89	3.75	2.42	4.76	1355	1360
3.78	3.64	2.425	4.74	1440	1378
3.8	3.66	2.411	5.25	1196	1204
3.68	3.55	2.422	5	1380	1380
3.81	3.67	2.418	4.88	1410	1336
3.8	3.67	2.418	4.95	1461	1368
4.04	3.88	2.427	4.29	1427	1382
4.11	3.95	2.405	5.06	1306	1304
3.92	3.77	2.41	5.12	1332	1326
3.82	3.68	2.427	4.57	1273	1393
3.74	3.61	2.419	5	1413	1405
4.07	3.91	2.418	4.61	1418	1388
4.04	3.89	2.425	4.39	1523	1492
3.77	3.64	2.421	4.9	1173	1171
3.71	3.58	2.413	5.3	1273	1315
3.76	3.62	2.396	5.87	1389	1339
3.82	3.68	2.429	4.51	1410	1421
3.75	3.61	2.407	5.5	1333	1349
3.89	3.75	2.42	4.76	1472	1447
4.06	3.9	2.409	4.95	1309	1307
3.83	3.68	2.427	4.56	1384	1372
3.83	3.69	2.409	5.3	1394	1388
3.96	3.81	2.425	4.49	1333	1326
4.02	3.86	2.418	4.69	1386	1395
4.03	3.88	2.428	4.27	1392	1398
3.98	3.83	2.42	4.65	1415	1419
4.07	3.91	2.418	4.61	1507	1484
4.04	3.89	2.425	4.39	1465	1450
4	3.84	2.421	4.78	1417	1417

3 Bulgular ve tartışma

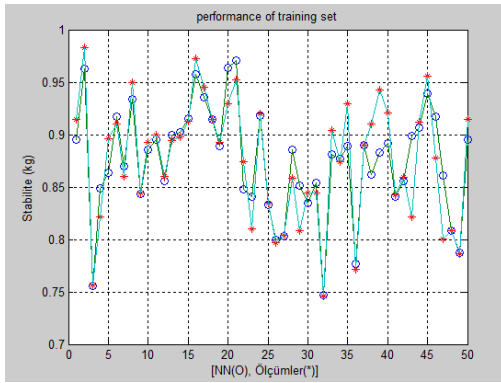
Yapılan eğitim neticesinde bulunan YSA sonuçları ile kontrol amacıyla ayrılan test sonuçları arasındaki ilişkinin

Şekil 3 de verildiği gibi $R^2 = 0.91201$ oranında bulunması oldukça anlamlıdır.

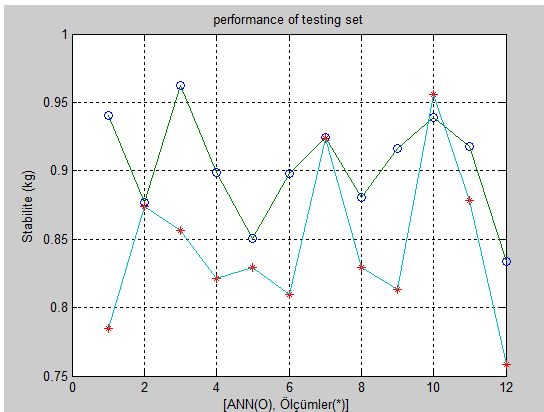


Şekil 3. Çalışmada belirlenen YSA mimarisinin R2 değeri

Şekil 4 de eğitim seti için YSA sonuçlarının gerçek verilerle kıyaslanması diyagramı verilmiştir. Şekil 5 de ise test için ayrılan verilerin gerçek verilerle kıyaslanması diyagramı verilmiştir.



Şekil 4. Çalışmada belirlenen YSA mimarisinde eğitim için ayrılan verilerin YSA sonuçlarının, gerçek deney sonuçlarıyla karşılaştırılması diyagramı



Şekil 5. Çalışmada belirlenen YSA mimarisinde test için ayrılan verilerin YSA sonuçlarının, gerçek deney sonuçlarıyla karşılaştırılması diyagramı

Normalizasyonu yapılmış analiz sonuçlarının normal veriye dönüştürülmüş durumu Tablo 1 de 6. Sütunda

verilmiş olup, sonuçlar yine aynı tabloda verilen 5. Sütundaki gerçek Marshall Stabilite değeri ile karşılaştırıldığında oldukça iyidir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmayla YSA tekniği ile karayolu inşaatında sıkça kullanılan Marshall stabilite değerinin tahmini için bir model ortaya koyulmuştur.

Öncelikle eğitim verileri belirlenen YSA mimarisinde eğitilerek, bir tahmin modeli belirlenmiştir. Bu sonuçlar önceden ayrılan deney sonuçları ile karşılaştırıldığında, YSA modelinin tahmini yaptığı Marshall stabilite değerleri ile deneysel olarak elde edilen gerçek değerler arasında iyi bir ilişkinin olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda hazırlanan modelleme yardımı ile, belli sınırlar dahilinde verilen girdi değerlerine göre çıktı değeri hesabı yaptırılabilir.

Yüksek maliyetlere mal olan karayolu inşaatlarında, konuyla ilgili deneyler ve kalite kontrol yöntemlerinin çabuk ve ucuza yapılması önem arz etmektedir. Sonuçta belli girdilerle elde edilecek çıktının standartlar dahilinde tahmin edilebilmesi maliyetleri azaltıcı bir gelişme olacaktır.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %6

Kaynaklar

- [1] P. S. Kandhall and R. B. Mallick, Aggregate Tests for Hot Mix Asphalt: State of Practice. NCAT Report No.97-6, 10-15, 1997.
- [2] F.L. Roberts, L.N. Mohammad, L.B. Wang, History of hot mix asphalt mixture design in the United States. Journal of Materials in Civil Engineering. 14(4), 279-293, 2002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2002\)14:4\(279\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:4(279)).
- [3] P. G. Lavin, Asphalt Pavements. Spon Pres. London and New York, 2003.
- [4] The Asphalt Institute. Superpave Mix Design. Superpave Series No.2 (SP-2). U.S.A., 1996.
- [5] ASTM D 242, Standard Specification for Mineral Filler for Bituminous Paving Mixtures. Annual Book of ASTM Standards. USA, 1992.
- [6] AASHTO T166, Bulk Specific Gravity of Compacted Bituminous Mixtures Using Saturated Surface-Dry Specimens. FHWA Multi-Regional Asphalt Training and Certification Group. 9p., 1999.
- [7] AASHTO T209, Bulk Specific Gravity of Bituminous Paving Mixtures. FHWA Multi-Regional Asphalt Training and Certification Group. 5p., 1999.
- [8] F. Umar ve E. Ağar, Yol Üstyapısı. İstanbul Teknik Üniversitesi. İnşaat Fakültesi Matbası, İstanbul, 1991.
- [9] M. Karasahin, Resilient behaviour of granular materials for analysis of highway pavements. PhD thesis, University of Nottingham, 1993.
- [10] ASTM D1559, Test Method for Resistance of Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus, 1998.

- [11] A. Önal ve S. Karaca, Asfalt Betonlu Karışım Dizayn Metotları. KGM Yayınları, Ankara, 1990.
- [12] M. Önal ve M. Kahramangil, Bitümlü karışımlar laboratuvar el kitabı. KGM Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara, 1993.
- [13] TS 3720, Bitümlü Kaplama Karışımlarının Hesap Esasları Marshall ve Hubbart Field Metotları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1983.
- [14] E. Açar, İ. Süttaş ve G. Öztaş, Beton Yollar (Rijit Yol Üstyapıları). İTÜ Basımevi, İstanbul, 1998.
- [15] A. Tunç, Yol Malzemeleri ve Uygulamaları. Atlas Yayınevi, İstanbul, 2001.
- [16] İstanbul Büyükşehir Belediyesi, Asfalt ve Uygulamaları. İSFALT Bilimsel Yayın No:1, İstanbul, 2001.
- [17] Yollar Fenni Şartnamesi, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, KGM, 2000.
- [18] R. Baş, Superpave: Sıcak Karışım Asfalt Üstyapının Geleceği, Teknik Çeviri, Karayolları 2. Bölge. Müdürlüğü, Asfalt Başmühendisliği, KGM, Ankara, 1999.
- [19] H. Varol, Bitümlü sıcak kaplamalı üst yapıların yapım kriterlerinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2000.
- [20] M. Iıcalı, S. Tayfur ve H. Özen, Soğuk karışımlarda agrega gradasyonunun optimum bitüm muhtevasına etkisi. II. Ulusal Asfalt Sempozyumu, 1999.
- [21] H. Polat, Ankara Gerede- Ankara Çevre Otoyolu bitümlü karışım üstyapı tabakalarının fiziksel özellikleri ve sıkışabilirliğinin analizi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 1994.
- [22] M. Uluçay, Bitümlü Karışımların Tasarımında Yeni Gelişmeler Yoğurmalı Pres. Yollar. Türk Milli Komitesi, Ankara, 1997.
- [23] Z. Şen, Yapay Sinir Ağları. Su Vakfı Yayınları, İstanbul, 2004.
- [24] J. J. Hopfield, Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. Proceedings. National Academy of Sciences. 79. National Academy of Sciences. Washington. D. C. . 2554–2558, 1992 <https://doi.org/10.1073/pnas.79.8.2554>
- [25] D. E. Rumelhart, G. E. Hinton and J. L. McClelland, A general framework for parallel distributed Processing. in Parallel Distributed Processing: Explorations in the microstructure of Cognition. I: Foundations. MIT Press. Cambridge. MA. . 45–76. 1986.
- [26] P. Mehra and B. W. Wah. Artificial neural networks: concepts and theory. IEEE Computer Society Press. Los Alamitos. CA. 1–8. 1992. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2003.809179>
- [27] J. J. Hopfield, Neurons with graded response have collective computational properties like those of two-state neurons. Proceedings. National Academy of Sciences. 81. National Academy of Sciences. Washington. D. C. . 3088–3092. May 1984; <https://doi.org/10.1073/pnas.81.10.3088>
- [28] J. J. Hopfield and D. W. Tank, Computing with neural circuits: A model. Science. 233, 625–633, August 1986. <http://doi.org/10.1126/science.3755256>
- [29] G. A. Carpenter and S. A. Grossberg, A Massively parallel architecture for a self-organizing neural pattern recognition machine. Computer vision graphics and image processing. 37, 54–115, 1987. [https://doi.org/10.1016/S0734-189X\(87\)80014-2](https://doi.org/10.1016/S0734-189X(87)80014-2).
- [30] G. A. Carpenter and S. Grossberg, ART2: Self-organization of stable category recognition codes for analog input patterns. Applied Optics. 26, 4919–4930.1987. <https://doi.org/10.1364/AO.26.004919>
- [31] G. A. Carpenter and S. Grossberg, The ART of adaptive pattern recognition by a selforganizing neural network. Computer, March 1988. <https://doi.org/10.1109/2.33>
- [32] R. Hecht-Nielsen. Neurocomputing. Addison-Wesley Publishing Company, New York, 1990.
- [33] P. Werbos. Beyond regression: new tools for prediction and analysis in the behavioral sciences. Ph. D. Dissertation, Harvard University, 1974.
- [34] D. B. Parker. Learning Logic. Technical Report TR-47. Center for Computational Research in Economics and Management Science, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1985.
- [35] D. E. Rumelhart, G. E. Hinton and R. J. Williams. Learning representations by backpropagating errors. Nature. 323, 1986, 533–536. <https://doi.org/10.1038/323533a0>.
- [36] J. R. Boyce. A non-linear model for the elastic behaviour of granular materials under repeated loading. Proc. Int. Symp. Soils under Cyclic & Transient Loading. Swansea. 285-294, 1980.
- [37] S. F. Brown and J. W. Pappin, Analysis of pavements with granular bases. Transportation Research Record 810. 17-22, 1981.
- [38] S. Ishak, H. Al-Deek. Performance of automatic ANN-based incident detection on freeways. Journal of Transportation Engineering., 125(4). 281-290. 1999. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733947X\(1999\)125:4\(281\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733947X(1999)125:4(281))
- [39] J. Uzan. Resilient characterization of pavement materials. Int. Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 16. 453-459. 1. 334-350, 1992. <https://doi.org/10.1002/nag.1610160605>
- [40] J. Uzan, M. W. Witzczak. Scullion T & Lytton RL. Development and validation of realistic pavement response models. Proc. of 7th. Int. Conf. On Asphalt Pavements, 1992.
- [41] E. Özgan, T. Kap, A. Beycioğlu ve M. Miroğlu. Asfalt betonunda Marshall stabilitesinin uyarımlı bulanık mantık yaklaşımı ile tahmini. 5. Uluslararası ileri teknolojiler sempozyumu (İATS'09), 2009.
- [42] N. Morova, S. Serin, S. Terzi. Bitüm miktarının asfalt betonuna dayanımına etkisinin bulanık mantık yaklaşımı ile değerlendirilmesi. 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 2011.
- [43] S. Serin, N. Morova, Ş. Sargın, S. Terzi, M. Saltan. The fuzzy logic model for prediction of marshall stability of lightweight asphalt concretes fabricated using

- expanded clay aggregate. SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi. 2013. <https://doi.org/10.19113/sdufbed.79420>
- [44] P. Lingras. Classifying highways: hierarchical grouping versus kohonen neural networks. *Journal of Transportation Engineering*. 121(4), 364-368, 1995.
- [45] H. C. Mayhew. Resilient properties of unbound roadbase under repeated triaxial loading. TRRL Laboratory Report 1088, 1983.
- [46] J. W. Pappin. Characteristics of a granular material for pavement analysis. PhD thesis, University of Nottingham, 1979.
- [47] J. W. Pappin, SF. Brown. Resilient stress-strain behaviour of a crushed rock. *Int. Symp. On Soils and Transient Loading*. Swansea. 169-177, 1980.
- [48] B. Stackel. The derivation of complex stress-strain relations. *Int. Conf. On Soil Mech. and Foun. Eng.*. Volume 1, Moscow, 353-359, 1973.
- [49] J. H. Tsoukalas, ER. Uhrig. Fuzzy and neural approaches in engineering. John Wiley & Sons. Inc, 1997.
- [50] The European Economic Community. A European approach to road pavement design. Progress report 2. 1991.
- [51] J. Xu, S. C. Wong., H. Yang and C. O. Tong. Modeling level of urban taxi services using neural network. *Journal of Transportation Engineering*. 125(3), 216-223. 1999.
- [52] J. Uzan. Characterization of granular material. *Transportation Research Record*. 1022. 52-59, 1985.
- [53] M. Karasahin, A. R. Dawson and J. T. Holden. The applicability of resilient constitutive models of granular material for unbound base layers. *Transportation Research Record*. No 1406, 98-107, 1993.
- [54] M. Karasahin, A. R. Dawson. Resilient behaviour of cohesionless soil. *XII Int. Conf. On Soil Mech. And Foun. Eng.*. Delhi. India. 1827-1830, 1994.
- [55] M. S. Kaseko, Z. P. Lo, S. G. Ritchie. Comparison of traditional and neural classifiers for pavement-crack detection. *Journal of Transportation Engineering*. 120(4), 552-569, 1994. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733947X\(1994\)120:4\(552\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733947X(1994)120:4(552))
- [56] PV. Lade, R. D. Nelson. Modelling the elastic behavior of granular materials. *Int. Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2. 521-542.1987.





Silindirik beton numunelerde boy/çap oranı değişiminin basınç dayanımına etkisi

The effect of length/diameter ratio change of cylinder concrete specimens on compressive strength

Uğur Durak^{1,*} 

¹ Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 38039, Kayseri, Türkiye

Özet

Bu çalışmada silindirik numunelerde boy/çap oranı değişiminin basınç dayanım üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla CEM I 42.5 R çimento kullanılarak su/bağlayıcı oranı 0.62 olan beton elemanlar üretilmiştir. Üretilen betonlardan karot makinası kullanılarak 50, 75, 100, 125 ve 150 mm çaplarında karot numuneleri alınmıştır. Alınan karot numuneleri laboratuvar ortamında taş kesme makinası ile kesilerek her bir çap için boy/çap oranı 0.5, 1.0, 1.5 ve 2.0 olan numuneler elde edilmiştir. Elde edilen numuneler üzerinde basınç dayanımı deneyi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre boy/çap oranının artışı ile genel olarak numunelerin basınç dayanımlarında azalmalar görülmüştür. Ayrıca boy/çap oranı ve basınç dayanımı arasında $R^2=0.88$ 'e varan oranlarda doğrusal bir ilişki olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Beton, Basınç dayanımı, Boy/Çap oranı.

1 Giriş

Beton elemanlarda su/çimento oranı, karma suyu, çimento özellikleri, agrega özellikleri, betona uygulanan karılma, taşıma, yerleştirme ve sıkıştırma işlemleri, kür koşulları, betonun yaşı ve deneyde kullanılan numunelerin şekil ve boyutları gibi birçok parametre, betonun basınç dayanımını etkilemektedir [1–3].

Genel olarak beton numunelerde kırılma durumu incelendiğinde kırılmanın kuvvet yönünde gelişen düşey çatlakların açılması sonucunda meydana geldiği görülmektedir. Deney cihazı tablası ile beton numunesi arasındaki sürtünme kuvveti ise bu çatlakların açılmasını engellemektedir. Boy/çap oranı düşük olan (basık) elemanlarda bu sürtünme etkisi daha yüksek olmakta ve bu nedenle çatlakların açılması zorlanmaktadır. Bu durum doğal olarak basınç dayanımının daha yüksek olmasını sağlamaktadır. Ayrıca beton elemanlarda kesit alanı büyüdükçe beton bünyesinde kusurlu bölge (çatlak, boşluk v.b.) bulunma ihtimali de artmaktadır. Bu durum da beton numunelerin basınç dayanımında azalmalara neden olabilmektedir [1].

Beton elemanların şekil ve boyutlarına bağlı olarak ortaya çıkan bu durum nedeniyle günümüz

Abstract

In this study, the effect of the change in length/diameter ratio on the compressive strength in cylindrical specimens was investigated. For this purpose, specimens with a water / binder ratio of 0.62 were produced using CEM I 42.5 R cement. Core samples of 50, 75, 100, 125 and 150 mm diameters were taken from the produced concretes by using the core drilling machine. The core samples taken were cut with a stone cutting machine in the laboratory environment and samples with the length / diameter ratio of 0.5, 1.0, 1.5 and 2.0 were obtained for each diameter. Compressive strength test was carried out on the samples obtained. According to the results, with the increase in the length / diameter ratio, generally the compressive strength of the samples decreased. In addition, it has been determined that there is a linear relationship of up to $R^2=0.88$ between length / diameter ratio and compressive strength.

Keywords: Concrete, Compressive strength, Length/diameter ratio.

yönetmeliklerinde, beton basınç dayanımı yapılacak numuneler şekil ve boyut açısından standartlaştırılmıştır. Ülkemizde yürürlükte olan TS 13515 [4] standardına göre beton basınç dayanımının tespit edilebilmesi için silindirik numuneler için boy/çap oranı 2 olan 100×200 mm veya 150×300 mm (çap×boy) boyutlarındaki numuneler [5, 6], küp numuneler için ise 100×100×100 mm veya 150×150×150 mm boyutlarındaki numuneler [7–9] kullanılmaktadır.

Diğer taraftan beton numunelerde şekil, boyut ve beton yerleştirme yönüne bağlı olarak ortaya çıkan dayanım farklılıkları birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır. [10–17]. Bu araştırmalardan bazıları özet olarak sunulmuştur

Yi ve arkadaşları [18], yapmış oldukları çalışmada beton numunelerin şekil, boyut ve beton yerleştirme yönüne göre basınç dayanımı değişimlerini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında farklı boyutlarda silindirik, kübik ve prizmatik numuneler kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre numune boyutları arttıkça basınç dayanımlarının azaldığını tespit etmişlerdir.

Sert [19], yapmış olduğu laboratuvar çalışmasında beton karot dayanımları ile standart beton basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi karot çapına bağlı olarak araştırmıştır.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ugurdurak@erciyes.edu.tr (U. Durak)

Geliş / Received: 06.02.2021 Kabul / Accepted: 15.03.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.875574

Çalışmasında 50, 100 ve 150 mm boyutlarında farklı boy/çap oranlarında karot numuneleri kullanmıştır. Elde ettiği sonuçlara göre 50, 100 ve 150 mm çaplı karot numunelerinde boy/çap oranı arttıkça basınç dayanımlarının düştüğünü gözlemlemiştir. Ayrıca beton yerleştirme yönünün basınç dayanımı etkilediğini ve yerleştirme yönünde alınan karot numunelerinin daha yüksek basınç dayanımı verdiğini tespit etmiştir.

Tokyay ve Özdemir [20] yapmış oldukları yüksek dayanımlı betonlarda numune boyut ve şekillerinin beton dayanımına etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla farklı boy/çap oranlarında silindirik ve farklı boyutlarda kübik numuneler üretmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara yüksek dayanımlı betonlarda, küçük boyutlu numunelerin standart numuneler gibi yüksek dayanımlar sağlayamadığını gözlemlemiştir. Bu durumu küçük boyutlu numunelerde yanal yüzey alanı/hacim oranının yüksek olması sebebiyle ortaya çıkan duvar etkisine bağlamışlardır. Ayrıca silindirik numunelerde boy/çap oranı değişiminin yüksek dayanımlı betonlar için önemsiz olduğunu vurgulamışlardır.

Literatürde yer alan çalışmalarda beton elemanlarda silindirik numunelerde boy/çap oranı değişiminin basınç dayanımına etkisi üzerinde farklı görüşler ileri sürülmüştür. Bu nedenle bu çalışmada boy/çap oranı 0.5, 1.0, 1.5 ve 2.0 olan 50, 75, 100, 125 ve 150 mm çapındaki beton numunelere basınç dayanımı deneyi yapılarak, silindirik beton numunelerde boy/çap oranı değişiminin basınç dayanımı üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

2 Materyal ve metot

Çalışmada kullanılan numuneler CEM I 42,5 R normal Portland çimentosu kullanılarak imal edilmiştir. Kullanılan çimentonun özgül ağırlığı 3.16, priz başlangıç süresi 134 dk, priz bitiş süresi 228 dk ve özgül yüzeyi 3220 cm²/g olarak belirlenmiştir. Çimentonun kimyasal kompozisyonu Tablo 1'de sunulmuştur. Çalışmada agrega olarak 0-4 mm tane büyüklüğünde ince agrega ve 4-16 mm tane büyüklüğünde iri agrega kullanılmıştır. Agregata tane büyüklüğü dağılımları TS EN 933-1 [21] standardına uygun olarak elek analizi yapılarak belirlenmiştir. İnce ve iri agreganın kuru yüzey doygun özgül ağırlıkları sırasıyla 2.64 ve 2.60 g/cm³'tür. Su emme kapasiteleri ise sırasıyla %1.30 ve %1.17 olarak ölçülmüştür. Çalışmada akışkanlaştırıcı olarak %1.5 oranında Glenium 51 hiper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Numuneler şebeke suyu kullanılarak üretilmiştir.

Beton üretimini gerçekleştirmek için TS-802 [22] standardına uygun olarak beton karışım hesabı yapılmıştır. Beton karışım hesabına göre 1 m³ beton üretimi için kullanılacak malzeme miktarları belirlenmiş ve Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2'de verilen malzeme oranları kullanılarak beton üretimi gerçekleştirilmiş ve hazırlanan kalıplara beton vibratör kullanılarak yerleştirilmiştir. Beton döküm ve bakım işlemleri TS 1247 [23] standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. 28 gün boyunca kür edilen beton elemanlardan TS EN 12504-1 [24] standardına uygun olarak karot makinası kullanılarak 50, 75, 100, 125 ve 150 mm çaplarında silindirik karot numuneleri alınmıştır.

Tablo 1. Çimentonun kimyasal kompozisyonu

Oksit	%	Oksit	%
CaO	61.77	Serbest CaO	0.93
SiO ₂	19.82	K ₂ O	0.83
Al ₂ O ₃	5.46	Na ₂ O	0.31
Fe ₂ O ₃	3.74	Mn ₂ O ₃	0.17
SO ₃	2.78	KK	0.98
MgO	2.59	Diğer	0.62

Tablo 2. 1 m³ beton üretimi için malzeme miktarları

Malzeme	Miktar (kg)
Çimento	300
0-4 mm agrega	1035
4-16 mm agrega	847
Su	185
Kimyasal Katkı	4.5

Alınan karot numuneleri laboratuvarında taş kesme makinasında her iki yüzeyi de düzgün olacak şekilde kesilerek her bir çap için boy/çap oranı 0.50, 1.0, 1.5 ve 2.0 olan ikişer adet numune elde edilmiştir. Elde edilen silindirik numunelerin alt ve üst kısımlarına, pürüzsüz bir yüzey elde etmek için kükürt-grafit tozu eriyiği ile başlık yapılmıştır. Deneye hazır hale gelen numuneler üzerinde TS EN 12390-3 [25] standardına uygun olarak basınç dayanımı deneyi gerçekleştirilmiştir. Karot numunelerin alınması ve deneye hazırlık aşamaları Şekil 1'de, elde edilen numuneler ve deney cihazı Şekil 2'de sunulmuştur.



Şekil 1. Deney numunelerinin hazırlanması



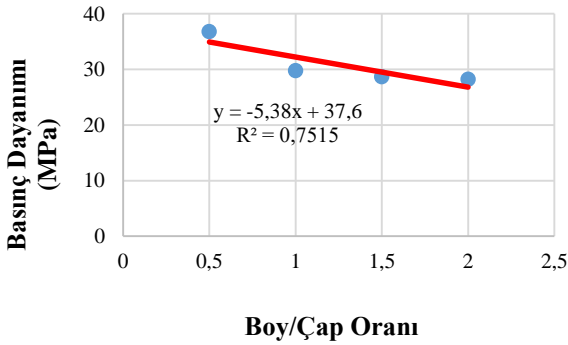
Şekil 2. Hazırlanan numuneler ve deney cihazı

3 Bulgular ve tartışma

Her bir çap ve boy/çap oranı için gerçekleştirilen basınç dayanımı deney sonuçları **Tablo 3**'de sunulmuştur. Elde edilen basınç dayanımı deney sonuçlarına göre 50 mm çaplı numunelerde basınç dayanımları 0.5, 1.0, 1.5 ve 2.0 boy/çap oranları için sırasıyla 36.8, 29.8, 28.7 ve 28.2 MPa olarak belirlenmiştir. 50 mm çaplı numunelerde boy/çap oranının artması ile basınç dayanımlarında azalmalar gözlenmiştir. Boy/çap oranı 0.5, 1.0 ve 1.5 olan numunelerin basınç dayanımları, boy/çap oranı 2.0 olması durumunda sırasıyla %23.3, %5.4 ve %1.7'ye varan oranlarda azalmıştır. 50 mm çaplı numuneler için boy/çap oranı ve basınç dayanımları arasındaki ilişki incelendiğinde $R^2=0.7515$ olacak şekilde doğrusal bir ilişki olduğu belirlenmiştir (**Şekil 3**).

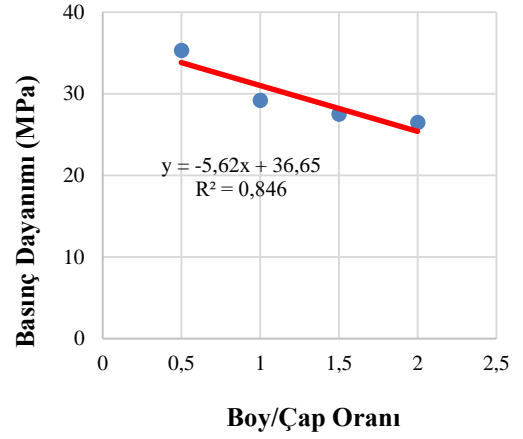
Tablo 3. Basınç dayanımı deney sonuçları

Numune Çapı (mm)	Boy/Çap Oranı	Basınç Dayanımı (MPa)
50	0.50	36.8
50	1.00	29.8
50	1.50	28.7
50	2.00	28.2
75	0.50	35.3
75	1.00	29.2
75	1.50	27.5
75	2.00	26.5
100	0.50	34.5
100	1.00	29.0
100	1.50	26.9
100	2.00	25.9
125	0.50	34.2
125	1.00	27.7
125	1.50	26.2
125	2.00	25.7
150	0.50	33.7
150	1.00	26.9
150	1.50	25.1
150	2.00	24.5



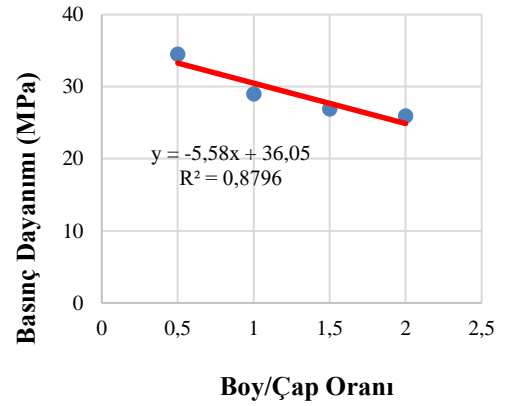
Şekil 3. 50 mm çaplı numunelerde boy/çap oranı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki

75 mm çaplı numunelerde basınç dayanımları 0.5, 1.0, 1.5 ve 2.0 boy/çap oranları için sırasıyla 35.3, 29.2, 27.5 ve 26.5 MPa olarak belirlenmiştir. 75 mm çaplı numunelerde de boy/çap oranının artması ile basınç dayanımlarında azalmalar tespit edilmiştir. Boy/çap oranı 0.5, 1.0 ve 1.5 olan numunelerin basınç dayanımları, boy/çap oranı 2.0 olması durumunda sırasıyla %24.9, %9.2 ve %3.6'ya varan oranlarda azalmıştır. 75 mm çaplı numunelerde boy/çap oranı ve basınç dayanımları arasında $R^2=0.846$ olacak şekilde 50 mm çaplı numunelere oranla daha kuvvetli bir doğrusal bir ilişki olduğu belirlenmiştir (**Şekil 4**).



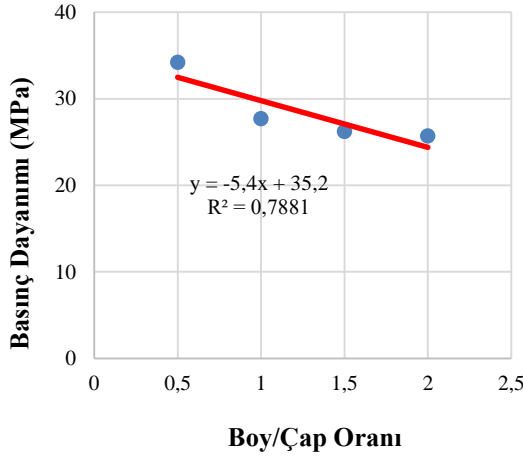
Şekil 4. 75 mm çaplı numunelerde boy/çap oranı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki

100 mm çaplı numunelerde basınç dayanımları 0.5, 1.0, 1.5 ve 2.0 boy/çap oranları için sırasıyla 34.5, 29.0, 26.9 ve 25.9 MPa olarak ölçülmüştür. 100 mm çaplı numunelerde de boy/çap oranının artması ile basınç dayanımları azalmıştır. Boy/çap oranı 0.5, 1.0 ve 1.5 olan numunelerin basınç dayanımları, boy/çap oranı 2.0 olması durumunda sırasıyla %24.9, %10.7 ve %3.7 oranlarında düşüş göstermiştir. 100 mm çaplı numunelerin boy/çap oranı ve basınç dayanımları arasında $R^2=0.8796$ olacak şekilde 50 ve 75 mm çaplı numunelere oranla daha kuvvetli bir doğrusal bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. (**Şekil 5**).



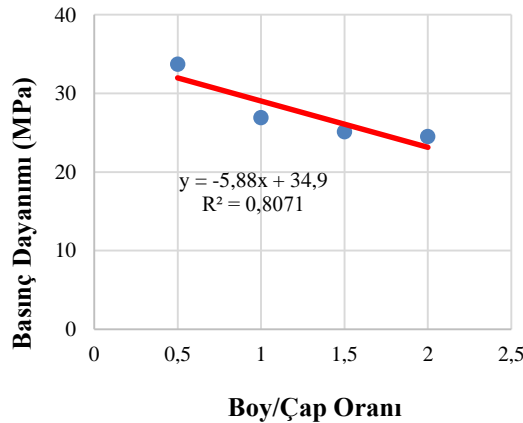
Şekil 5. 100 mm çaplı numunelerde boy/çap oranı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki

125 mm çaplı numunelerde basınç dayanımları 0.5, 1.0, 1.5 ve 2.0 boy/çap oranları için sırasıyla 34.2, 27.7, 26.2 ve 25.7 MPa olarak belirlenmiştir. 125 mm çaplı numunelerde de diğer numunelere benzer şekilde boy/çap oranının artması ile basınç dayanımlarında azalmalar görülmüştür. Boy/çap oranı 0.25, 0.5, 1.0 ve 1.5 olan numunelerin basınç dayanımları, boy/çap oranı 2.0 olduğunda sırasıyla %24.8, %7.2 ve %1.9 oranlarında düşüş göstermiştir. 125 mm çaplı numuneler için boy/çap oranı ve basınç dayanımları arasında da $R^2=0.7881$ olacak şekilde doğrusal bir ilişki olduğu görülmüştür (Şekil 6).



Şekil 6. 125 mm çaplı numunelerde boy/çap oranı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki

150 mm çaplı numunelerde basınç dayanımları 0.5, 1.0, 1.5 ve 2.0 boy/çap oranları için sırasıyla 33.7, 26.9, 25.1 ve 24.5 MPa olarak belirlenmiştir. 150 mm çaplı numunelerde de diğer numunelerde olduğu gibi boy/çap oranının artması ile basınç dayanımları azalmıştır. Boy/çap oranı 0.5, 1.0 ve 1.5 olan numunelerin basınç dayanımları, boy/çap oranı 2.0 olduğunda sırasıyla %27.3, %8.9 ve %2.4 oranlarında düşüş göstermiştir. 150 mm çaplı numuneler için boy/çap oranı ve basınç dayanımları arasındaki ilişki $R^2=0.8071$ olarak tespit edilmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. 150 mm çaplı numunelerde boy/çap oranı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki

Genel olarak tüm numunelerde boy/çap oranı artışı ile basınç dayanımlarında azalmalar meydana gelmiştir [12]. Ortaya çıkan azalmalar incelendiğinde boy/çap oranı 0.5 olan numunelerin basınç dayanımlarının tüm çaplarda boy/çap oranı 2.0 olması durumuna göre yaklaşık %25 oranında azaldığı görülmüştür. Diğer taraftan numunelerin boy/çap oranı 1.0 ve 1.5 olması durumunda boy/çap oranı 2.0 olan numunelere kıyasla basınç dayanımı azalması %10'dan daha az olmuştur. Bu durum beton numunelerde deney esnasında deney cihazı tablası ile beton numunesi arasındaki sürtünme kuvvetinin boy/çap oranı düşük olan numunelerde daha büyük olmasına bağlanmaktadır. Çünkü sürtünme kuvveti etkisiyle boy/çap oranı düşük olan numunelerin basınç dayanımı daha yüksek çıkabilmektedir [2]. Bu etki boy/çap oranı 0.5 olan numunelerde daha belirgin olurken boy/çap oranı 1.0 ve 1.5 olan numunelerde sonuçları daha az etkilemiştir.

Ayrıca numunelerin çapı da basınç dayanımını etkilemiştir. Aynı boy/çap oranlarında çapı küçük olan numunelerin basınç dayanımları daha yüksek çıkmıştır. Örneğin; 50 mm çaplı numunede boy/çap oranı 2.0 iken basınç dayanımı 28.2 MPa olarak bulunmuştur. Aynı boy/çap oranında 75, 100, 125 ve 150 mm çaplı numunelerde ise basınç dayanımları sırasıyla 26.5, 25.9, 25.7 ve 24.5 olarak bulunmuştur. Bu durum küçük boyutlu numunelerde kusurlu bölge bulunma ihtimali daha az olurken, büyük boyutlu numunelerde daha fazla olması ile açıklanmaktadır [2]. Literatürde yer alan diğer çalışmalar da boy/çap oranının azalması ile basınç dayanımlarında azalmalar olduğu gözlenmiştir [18, 26]. Bu anlamda çalışma sonuçlarının literatürde yer alan çalışmalar ile uyumluluk gösterdiği söylenebilir.

Diğer taraftan çalışmada elde edilen sonuçlar ile ASTM C42 [27] standardına göre boy/çap oranı 1-2 arasında olan numuneler için verilen dayanım düzeltme katsayıları Tablo 4'de karşılaştırılmıştır. Tablo 4 incelendiğinde ASTM standardına göre boy/çap oranı 1.0 ve 1.5 olan silindirik numuneler için narinlik etkisine bağlı olarak dayanım düzeltme katsayıları sırasıyla 0.87 ve 0.96 olarak verilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre 0.5, 1.0 ve 1.5 boy/çap oranına bağlı olarak elde edilen dayanım düzeltme katsayıları sırasıyla 0.73-0.77, 0.89-0.95, 0.96-0.98 aralığında değişmektedir. Boy/çap oranı 1.0 olan numunelerde ASTM C42 standardına göre daha yüksek değerler elde edilirken, boy/çap oranı 1.5 olan numuneler için standartta verilen değerlere yakın sonuçların elde edildiği görülmüştür.

Tablo 4. Farklı boy/çap oranları için dayanım düzeltme katsayıları

h/d	Dayanım düzeltme katsayısı					
	ASTM C42	50 mm	75 mm	100 mm	125 mm	150 mm
2.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.5	0.96	0.98	0.96	0.96	0.98	0.98
1.0	0.87	0.95	0.91	0.89	0.93	0.91
0.5	-	0.77	0.75	0.75	0.75	0.73

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, boy/çap oranı değişiminin basınç dayanımına etkisi; farklı çaplarda üretilen ve basınç dayanımına tabi tutulan silindirik numuneler üzerinde deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda sunulmuştur.

- Tüm numunelerde, numunelerin çaplarından bağımsız olarak boy/çap oranı arttıkça basınç dayanımlarında azalmalar gözlenmiştir. Bu azalma boy/çap oranı 0.5'den 2.0'ye doğru arttıkça %25 seviyelerine kadar ulaşmıştır.

- Boy/çap oranı 0.50 olan numunelerde basınç dayanımları tüm çaplarda diğer numunelere oranla daha yüksek çıkmıştır. Boy/çap oranı 1.0, 1.5 ve 2.0 olan numunelerin basınç dayanımları ise birbirlerine oldukça yakın çıkmıştır.

- Aynı boy/çap oranlarında çapı küçük olan numunelerin basınç dayanımları daha yüksek çıkmıştır.

- Boy/çap oranı ve basınç dayanımları arasındaki ilişki incelendiğinde tüm çaplarda boy/çap oranı ve basınç dayanımları arasında %75-%88 arasında değişen oranlarda doğrusal bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Boy/çap oranı ve basınç dayanımları arasındaki en kuvvetli doğrusal ilişki ise %88 ile 100 mm çaplı numunelerde görülmüştür

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %6

Kaynaklar

- [1] T. Erdoğan, Beton, 5th ed. Ankara, Turkey: Odtü Yayıncılık, 2015.
- [2] B. Baradan, H. Yazıcı ve S.Aydın, Beton, 2nd ed. İzmir, Türkiye: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, 2015.
- [3] O. Şimşek, Beton ve Beton Teknolojisi, 5th ed. Ankara, Türkiye: Seçkin Yayıncılık, 2016.
- [4] TS 13515, Complementary Turkish Standard for the implementation of TS EN 206. Ankara, Turkey: TSE, 2019.
- [5] Z. Algın, K. Mermerdaş ve M. S. Zeynepi, Silindire sıkıştırılmış betonda makro sentetik elyaf kullanımının optimum su içeriğine ve betonun dayanım özelliklerine etkisi, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg., 8(2), 992–1004, 2019. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.534055>.
- [6] C. Demirel ve A. Gökdemir, Çeper etkisi oluşmayan farklı biçim ve boyuttaki beton numunelerin basınç dayanımlarının deneysel karşılaştırılması, SDU Int. Technol. Sci., 6(3), 29–48, 2014.
- [7] F. Özcan, Niğde bölgesinde üretilen hazır betonların elastisite modüllerinin belirlenmesi, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg., 7(1), 260–265, 2018. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.386696>
- [8] K. Güçlüer, O. Günaydın, Ö. F. Tekin ve M. F. Şahan, Farklı tipte agrega kullanımının betonun mekanik özelliklerine etkisinin araştırılması, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg., 6(1), 107–114, 2017.
- [9] İ. İ. Atabey, S. Çelikten ve Ü. Yurt, Farklı mineral katkıları yüksek dayanımlı betonlarda metagabro agregalarının kullanılabilirliğinin araştırılması, Acad. Platf. J. Eng. Sci., 8(3), 514–522, 2020. <https://doi.org/10.21541/apjes.708245>.
- [10] Z. P. Bazant, Size effect in blunt fracture: concrete, rock, metal, J. Eng. Mech., 1984. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)07339399\(1984\)110:4\(518\)](https://doi.org/10.1061/(asce)07339399(1984)110:4(518)).
- [11] M. S. Chin, M. A. Mansur, and T. H. Wee, Effects of shape, size, and casting direction of specimens on stress-strain curves of high-strength concrete, ACI Mater. J., 1997. <https://doi.org/10.14359/301>.
- [12] J. R. del Viso, J. R. Carmona, and G. Ruiz, Shape and size effects on the compressive strength of high-strength concrete, Cem. Concr. Res., 2008. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.020>.
- [13] A. Malaikah, Effect of Specimen Size and Shape on the Compressive Strength of High Strength Concrete, Pertanika J. Sci. Technol., 2005. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20141002003>.
- [14] Y. Che, S. Ban, J. Cui, G. Chen, and Y. Song, Effect of specimen shape and size on compressive strength of concrete, Adv. Mater. Res., 2011. <https://doi.org/10.1028/www.scientific.net/AMR.163-167.1375>.
- [15] M. Saridemir, Effect of specimen size and shape on compressive strength of concrete containing fly ash: Application of genetic programming for design, Mater. Des., 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.10.073>.
- [16] I. M. Nikbin, M. Dehestani, M. H. A. Beygi, and M. Rezvani, Effects of cube size and placement direction on compressive strength of self-consolidating concrete, Constr. Build. Mater., 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.008>.
- [17] M. R. Wisnom, Size effects in composites, in Comprehensive Composite Materials II, 2017.
- [18] S. T. Yi, E. I. Yang, and J. C. Choi, Effect of specimen sizes, specimen shapes, and placement directions on compressive strength of concrete, Nucl. Eng. Des., 2006. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2005.08.004>.
- [19] H. Sert, Beton Karot Dayanımları ile Standart Silindire Dayanımları Arasındaki İlişkinin Karot Çapına Bağlı Olarak Belirlenmesi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2011.
- [20] M. Tokyay and M. Özdemir, Specimen shape and size effect on the compressive strength of higher strength concrete, Cem. Concr. Res., 1997. [https://doi.org/10.1016/S00088846\(97\)00104-X](https://doi.org/10.1016/S00088846(97)00104-X).
- [21] TS EN 933-1, Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method. Ankara, Turkey: TSE, 2012.
- [22] TS 802, Design of concrete mixes. Ankara, Turkey, 2016.
- [23] TS 1247, Concrete mixing, casting and maintenance rules (under normal weather conditions). Ankara, Turkey, 2018.

- [24] TS EN 12504-1, Testing concrete in structures - Part 1: Cored specimens - Taking, examining and testing in compression. Ankara, Turkey, 2019.
- [25] TS EN 12390-3, Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens. Ankara, Turkey, 2019.
- [26] A. J. Hamad, Size and shape effect of specimen on the compressive strength of HPLWFC reinforced with glass fibres, J. King Saud Univ. - Eng. Sci., 2017. <https://doi.org/doi:10.1016/j.jksues.2015.09.003>.
- [27] ASTM, C42/C42M -03 Standard Method of Test for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete. 2004.





Kaolin esaslı geopolimer harçlarda silis dumanı ve mikro SiO₂ katkısının dayanım özellikleri üzerine etkisi

The effect of silica fume and micro SiO₂ additive on the strength properties in kaolin based geopolymer mortars

Mehmet Kaya^{1,*} 

¹ Yozgat Bozok Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 66900, Yozgat Türkiye

Özet

Bu çalışmada, kaolin kullanılarak üretilen geopolimer harçlarda, silis dumanı (SD) ve mikro SiO₂ (MS) katkısının dayanım özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Kaolin içerisine ağırlıkça %3, %6 ve %9 oranında SD ve MS ayrı ayrı katılarak bağlayıcı hazırlanmıştır. Bağlayıcılar, ağırlıkça %11, %13, %15 ve %17 sodyum (Na) içeren NaOH ile aktive edilmiştir. Bağlayıcı, kum, NaOH ve sudan oluşan karışım, harç mikseri içerisinde karıştırılıp kalıplara yerleştirildikten sonra 24 saat süre ile 110 °C aktivasyon sıcaklığı uygulanmıştır. Daha sonra kalıptan çıkarılan numuneler 28 güne kadar oda sıcaklığında bekletilmiştir. Numuneler üzerinde birim ağırlık, boşluk oranı, su emme, ultrases geçiş hızı, eğilme ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda, %9 SD ve %11 Na ile %9 MS ve %17 Na içeren numunelerde sırasıyla 21.4 MPa ve 45.3 MPa basınç dayanımı tespit edilmiştir. Ağırlıkça %11 ve %13 Na içeren numunelerde SD ve MS katkısının dayanım üzerinde olumlu etkisi gözlenmemiş, %15 ve %17 Na ile üretilmiş numunelerde ise SD ve MS katkısının dayanımı artırdığı tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Kaolin, Geopolimer, Silis dumanı, Eğilme dayanımı, Basınç dayanımı

1 Giriş

Çimentonun çevreye verdiği olumsuz etkileri azaltmak amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Dünyadaki toplam CO₂ salınımının %7-%10'unun geleneksel portland çimentosundan kaynaklı olması nedeniyle çevre dostu alternatif bir bağlayıcı olarak geopolimer beton önerilmektedir [1-3]. Geopolimerin geleneksel çimentoya kıyasla CO₂ salınımını yaklaşık %20 azalttığı belirtilmektedir [4]. Bazı çalışmalarda, geopolimerin geleneksel betona kıyasla, maliyetinin kabaca eşit olduğu [5, 6], bazı çalışmalarda ise daha düşük olduğu [7] belirtilmektedir. Bunların yanı sıra çimento ile üretilmiş betonlarla kıyaslandığında, geopolimer daha yüksek basınç dayanımı [8, 10] ve daha iyi durabilite [11-16] sağlamaktadır. Geopolimerler, alüminosilikatların alkali veya alkali-silikat çözeltileri ile ortam sıcaklığında veya daha yüksek sıcaklıkta reaksiyonu sonucu oluşur. Geopolimer ve geopolimerleşme üzerine yapılan önemli

Abstract

In this study, the effects of silica fume (SD) and micro SiO₂ (MS) additives on the strength properties of geopolymer mortars produced using kaolin were investigated. The binder was prepared by adding 3%, 6% and 9% by weight of SD and MS into the kaolin separately. The binders were activated with NaOH containing 11%, 13%, 15% and 17% sodium (Na) by weight. The mixture consisting of binder, sand, NaOH and water was mixed in the mortar mixer and placed in the molds, and an activation temperature of 110 °C was applied for 24 hours. Then, the samples that were removed from the mold were kept at room temperature for up to 28 days. Unit weight, void ratio, water absorption, ultrasound pulse velocity, flexural and compressive strength tests were performed on the samples. As a result of the experiments, the compressive strength of 21.4 MPa and 45.3 MPa was determined in samples containing 9% SD and 11% Na, 9% MS and 17% Na, respectively. In samples containing 11% and 13% Na by weight, no positive effect of SD and MS was observed on the strength, and SD and MS additives were found to increase the strength in samples produced with 15% and 17% Na.

Keywords: Kaolin, Geopolymer, Silica fume, Flexural strength, Compressive strength

çalışmalarda, genel olarak aktivatör oranı [17], kür şartları [18], Na₂O/SiO₂, K₂O/SiO₂ ve Si/Al oranı, NaOH ve KOH oranı [19], su miktarı ve kür sıcaklığı gibi faktörlerin etkili olduğu görülmektedir [11, 20].

Bazı çalışmalarda geopolimer üretiminde kaolin kullanılmıştır [21-23]. Kaolinin geopolimer üretiminde bağlayıcı olarak kullanılmasının amacı, ön işlem için enerji gerektirmemesi ve yüksek alümina-silikat içermesidir. Alümino-silikat, geopolimerleşme sürecindeki ana yapıyı oluşturmaktadır [24]. Doğal bir kaynak olan kaolin, genellikle kuvars, illit gibi diğer minerallerle birlikte kaolinit, hematit, götit, gibsit, halloysit, anataz vb. ana minerallerden oluşur [25-27]. Kaolinin hammaddesi Alüminyum-Hidra-Silika (Al₂Si₂O₅(OH)₄)'dır. Farklı mineralleri ise, dikit, halloysit ve nakrit olarak bilinmektedir. Ancak, kaolinit, daha düşük bir çözünme hızına sahiptir ve ana bileşenler arasındaki etkileşimler için belirli bir zaman geçmesi gerekir [28]. Kaolinitin bileşiminde bulunan

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mehmet.kaya@yobu.edu.tr (M. Kaya)

Geliş / Received: 26.02.2021 Kabul / Accepted: 25.03.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.886863

kuvarsın, geopolimerleşme üzerinde olumlu etkisi bulunmaktadır [27]. Son yıllarda çimentoya kıyasla daha az CO₂ salınımı olan kil bazlı geopolimerlerin prefabrik tuğla üretiminde kullanıldığı gözlenmektedir [29]. Geopolimer teknolojisinde kullanılan malzemelerden birisi olan metakaolin, ana puzolaniklerden biri olan mineral kaolinitin hidroksile edilmiş formudur. Metakaolinin ana bileşenleri amorf Al₂O₃ ve SiO₂'dir. [30, 31]. Katılma sürecindeki reaksiyon, kaolin ve metakaolin için benzerdir [28]. Aradaki tek fark kaolin, metakaoline kıyasla daha fazla alkali saldırıya maruz kalır. Metakaolinin reaksiyon yüzey alanı kaolinden daha fazladır ve daha hızlı sertleşebilme özelliğine sahiptir [32]. Kaolinin üretimi sırasında çıkan atıkların kalsinasyonu ile de geopolimer üretimi yapılmaktadır [33]. SD, silikon ve ferrosilikon alaşımlarının üretimi sırasında yüksek saflıkta kuvarsın elektrikli fırınlarda kömür yardımıyla indirgenmesi sonucu oluşan bir yan üründür. Aşırı inceliği ve yüksek silika içeriği nedeniyle, silis dumanı oldukça etkili bir puzolanik malzemedir. Beton üretiminde betonun özelliklerini iyileştirmek için silis dumanı kullanılır. Basınç dayanımını, bağ dayanımını ve aşınma direnci artırır. Geçirgenliği azaltır ve bu nedenle çeliğin korozyondan korunmasına yardımcı olur [34]. Silis dumanı C-S-H jeli oluşumunu artırır. Aynı zamanda bu puzolanik jel Al ve Cl gibi alkali iyonlarla olan reaksiyona katkıda bulunur [35]. Endüstriyel atık olan silis dumanı, son yıllarda geopolimer üretiminde, uçucu kül, metakaolin, yüksek fırın cürufu, pirinç kabuğu külü gibi endüstriyel atıklarla birlikte kullanılmaktadır. Geopolimer dayanım ve dayanıklılık özelliklerini artırmak için uçucu kül [36-37] ve metakaolin [38] gibi bağlayıcılara nano parçacık ilave edilmektedir. Diğer taraftan, geopolimer özelliklerinin iyileştirilmesinde nano SiO₂ önemli rol oynar. Si/Al oranını değiştirerek alümina-silikat jel gelişimine yardım eder [39]. Ayrıca, geniş özgül yüzey alanına sahip iyi bir filtre görevi görür ve mukavemetin geliştirilmesine katkıda bulunur [40, 41].

Bu çalışmada çimentonun aksine, herhangi bir enerji ihtiyacı olmadan doğal kaynaklardan elde edilen kaolin, geopolimer üretiminde bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Doğal bir silis kaynağı olan SD ile nano parçacıklara göre daha ekonomik olan MS'nin kaolin esaslı geopolimerlerde fiziksel özellikler ve dayanım özelliklerine etkisi incelenmiştir.

2 Materyal ve metot

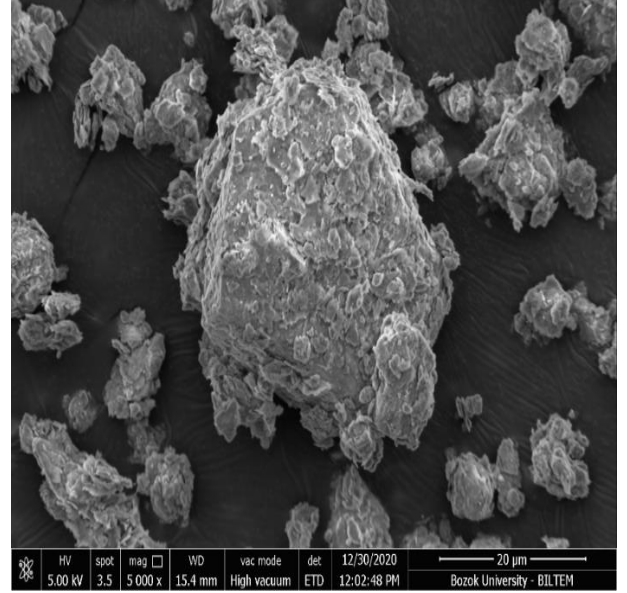
2.1 Materyal

Bu çalışmada Balıkesir'de faaliyet gösteren Utelka Firması'ndan tedarik edilen kaolin kullanılmıştır. Kaolinin taramalı elektrom mikroskopu (SEM) görüntüsü Şekil 1'de, SD'nin SEM görüntüsü Şekil 2'de verilmiştir. Silis dumanının camsı küresel yapıda olduğu görülmektedir. Kaolinin ise yaklaşık 30 µm ve daha küçük düzensiz taneciklerden oluştuğu gözlenmektedir. Kaolin ve SD'nin kimyasal içeriği Tablo 1'de verilmiştir.

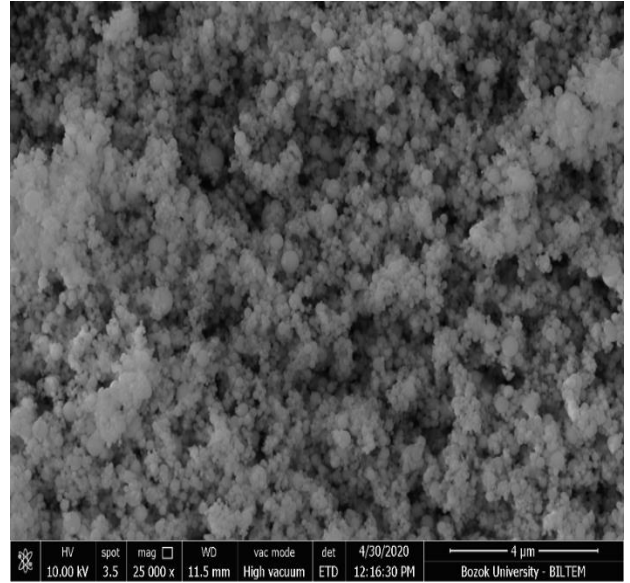
Çalışmada kullanılan MS, İzmir'de faaliyet gösteren Ege Nanotek Kimya Sanayi firmasından temin edilmiştir. 0-63 µm arasında tane büyüklüğüne sahip MS kullanılmıştır. Aktivatör olarak kullanılan NaOH Balıkesir'de faaliyet gösteren Karan Kimya Firması'ndan temin edilmiştir

Tablo 1. Kaolin ve SD'nin kimyasal içeriği(%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
Kaolin	70.32	18.87	1.44	0.58	0.32	1.33	0.04	0.87	0.1
SD	93.9	0.01	1.04	0.72	1	0.43	0.77	1.1	0.08



Şekil 1. Kaolinin SEM görüntüsü



Şekil 2. SD'nin SEM görüntüsü

Harç karışımlarında şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Çalışmada, en büyük tane çapı 4 mm ve özgül ağırlığı 2.74 g/cm³ olan bazalt agregası kullanılmıştır.

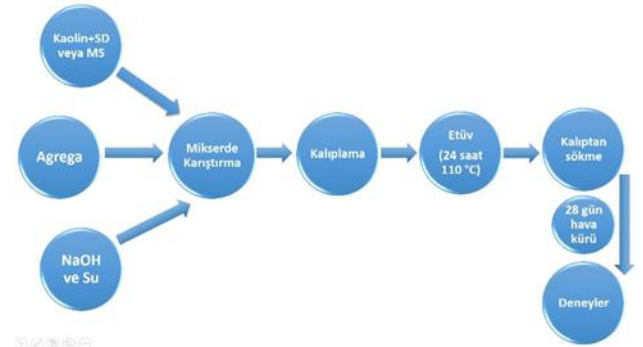
2.2 Metot

Numunelerin üretimi ile ilgili şema Şekil 3'te verilmiştir. Çalışmada kaolin içerisine ağırlıkça %3, %6 ve %9 oranında SD ve MS ayrı ayrı ilave edilmiştir. Geopolimer harçlarda,

dayanım özelliklerinin %10 sodyum (Na) üzerinde belirgin olarak artış gösterdiği bilinmektedir [8,9,11,46]. Bu nedenle, kaolin+SD ve kaolin+MS den oluşan bağlayıcı, ağırlıkça %11, %13, %15 ve %17 sodyum (Na) içeren NaOH ile aktive edilmiştir. Likit/bağlayıcı oranı 0.50, bağlayıcı/kum oranı ise 1/3 olarak belirlenmiştir. Bağlayıcı, agrega, NaOH ve sudan oluşan karışım standart çimento mikserinde karıştırıldıktan sonra 40 mm×40 mm×160 mm boyutlarındaki standart kalıplara yerleştirilmiştir. Sıcaklığın dayanım gelişiminde önemli olduğu bilinmektedir [8,11,47]. Bu nedenle numuneler etüv içerisinde 110 °C’de, 24 saat süre ile aktivasyon sıcaklığına maruz bırakılmıştır. Etüvden çıkarılan numunelere 28 güne kadar 22±2 °C oda sıcaklığında hava kuru uygulanmıştır. Daha sonra numuneler üzerinde birim ağırlık, su emme ve boşluk oranı, TS-EN 12504-4 standardına göre ultrasonik atımlı dalga hızının tayini deneyi [42], TS EN 1015 -11 standardına göre eğilme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır [43]. Geopolimer numunelerin karışım oranları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Geopolimer numunelerin karışım oranları

No	Numune Kodu	Na %	Kaolin (g)	SD (g)	MS (g)	Likit/bağlayıcı
1	S0-11	11	450	0	0	0.5
2	SD3-11	11	436.5	13.5	0	0.5
3	SD6-11	11	423	27.0	0	0.5
4	SD9-11	11	409.5	40.5	0	0.5
5	S0-13	13	450	0	0	0.5
6	SD3-13	13	436.5	13.5	0	0.5
7	SD6-13	13	423	27.0	0	0.5
8	SD9-13	13	409.5	40.5	0	0.5
9	S0-15	15	450	0	0	0.5
10	SD3-15	15	436.5	13.5	0	0.5
11	SD6-15	15	423	27.0	0	0.5
12	SD9-15	15	409.5	40.5	0	0.5
13	S0-17	17	450	0	0	0.5
14	SD3-17	17	436.5	13.5	0	0.5
15	SD6-17	17	423	27.0	0	0.5
16	SD9-17	17	409.5	40.5	0	0.5
17	MS3-11	11	436.5	0	13.5	0.5
18	MS6-11	11	423	0	27.0	0.5
19	MS9-11	11	409.5	0	40.5	0.5
20	MS3-13	13	436.5	0	13.5	0.5
21	MS6-13	13	423	0	27.0	0.5
22	MS9-13	13	409.5	0	40.5	0.5
23	MS3-15	15	436.5	0	13.5	0.5
24	MS6-15	15	423	0	27.0	0.5
25	MS9-15	15	409.5	0	40.5	0.5
26	MS3-17	17	436.5	0	13.5	0.5
27	MS6-17	17	423	0	27.0	0.5
28	MS9-17	17	409.5	0	40.5	0.5

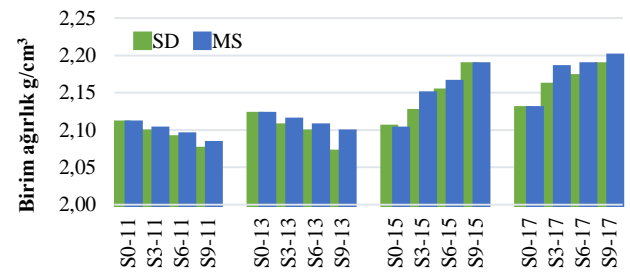


Şekil 3. Numune üretim şeması

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Birim ağırlık

Numunelerin birim ağırlıkları Şekil 4’te verilmiştir. Geopolimer numunelerin birim ağırlıkları 2.07 g/cm³ ile 2.20 g/cm³ arasında değişmektedir. En düşük birim ağırlık %9 SD ve %11-%13 Na içeren geopolimer numunelerde 2.07 g/cm³, en yüksek birim ağırlık ise %9 MS ve %17 Na içeren numunede 2.20 g/cm³ olarak tespit edilmiştir. %11 ve %13 Na içeren numunelerde SD ve MS ilave edilmesi ile numunelerin birim ağırlıklarında azalma, %15 ve %17 Na içeren numunelerin birim ağırlıklarında artış gözlenmiştir. MS içeren numunelerin birim ağırlıkları SD içeren numunelerin birim ağırlıklarından daha büyüktür. Fakat bu fark fazla belirgin değildir. %11 Na ve sadece kaolin ile üretilen numunelere kıyasla %17 Na ve %9 SD ve MS içeren numunelerin birim ağırlıkları %4 artış göstermiştir. Metakaolin ve SD kullanılarak geopolimer üretilen bir çalışmada birim ağırlığın 2.36 kg/dm³, %10 SD ilave edilmiş numunelerde ise birim ağırlığın 2.35 kg/dm³ olduğu belirtilmektedir [31]. Doğal kil kullanılarak geopolimer üretilen başka bir çalışmada ise 13 M NaOH miktarında 2179.8 kg/m³ birim ağırlık tespit edilmiştir [44].

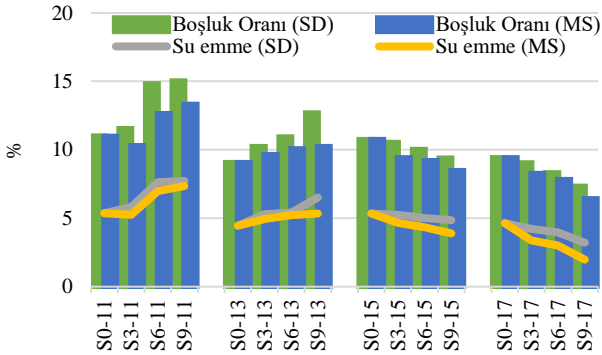


Şekil 4. Numunelerin birim ağırlıkları

3.2 Su emme ve boşluk oranı

Numunelerin boşluk oranı ve su emme oranları Şekil 5’te gösterilmiştir. Boşluk oranları %6.23 ile %14.84 arasında, su emme oranları ise %1.98-%7.73 arasında değişiklik göstermektedir. SD içeren numunelerin boşluk oranları ve su emme oranları MS içeren numunelerden daha fazladır. %11 ve %13 Na içeren numunelerde SD ve MS ilavesi ile birlikte boşluk oranı ve su emme oranlarında artış gözlenmiştir.

Buna karşılık %15 Na ve %17 Na içeren numunelerde ise SD ve MS oranının artışı ile birlikte boşluk oranı ve su emme oranlarında azalma olduğu görülmektedir. Numunelerde aktivatör oranının artışı ile birlikte boşluk oranı ve su emme oranlarının azaldığı gözlenmektedir. %11 Na içeren ve sadece kaolin ile üretilen numunelere kıyasla %17 Na ve %9 SD içeren numunelerin boşluk oranları %33, su emme oranları ise %61 azalma göstermiştir. Benzer şekilde %17 Na ve %9 MS içeren numunelerin boşluk oranları %42, su emme oranlarında ise %63 azalma görülmüştür. SD taneciklerinin kaolin taneciklerinden daha küçük olması ve SD ile MS' nin %17 Na gibi yüksek aktivatör içeriğinde karışım içerisinde bağlayıcılık özelliğini artırması boşluk oranının ve su emme oranının azalmasına sebep olmuştur. Uçucu kül ile geopolimer üretilen bir çalışmada, boşluk oranlarının %5.4 ile %10.6, su emme oranlarının ise %2.7 ile %4.9 arasında değiştiği gözlenmiştir [39]. Uysal ve arkadaşları, metakaolin tabanlı geopolimerlerde boşluk oranını %16.38, su emme oranını %8.35 olarak tespit etmişler, %10 SD katkısının boşluk oranını %15.81 su emme oranını ise %8.03'e düşürdüğünü belirlemişlerdir [31]. Meassaoud ve arkadaşları ise kil tabanlı geopolimerlerde en düşük boşluk oranı ve su emme oranı 13 M NaOH oranının sağladığını belirtmişlerdir [44].

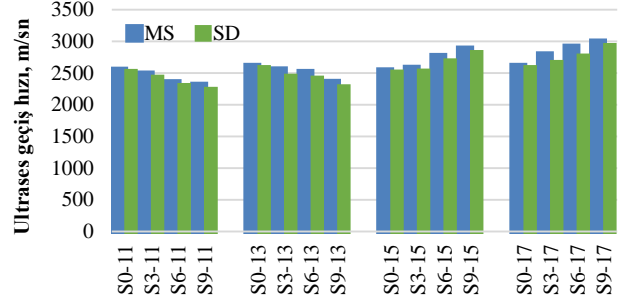


Şekil 5. Numunelerin boşluk oranı ve su emme oranları

3.3 Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini deneyi

Numunelerin ultrases geçiş hızları Şekil 6'da verilmiştir. Ultrases geçiş hızları 2235 m/s ile 2929 m/s arasında değişmektedir. MS içeren numunelerin ultrases geçiş hızları SD içeren numunelerden daha fazladır. %11 ve %13 Na içeren numunelerde SD ve MS ilavesi ile birlikte ultrases geçiş hızlarında azalma gözlenmiştir. Buna karşılık %15 Na ve %17 Na içeren numunelerde ise SD ve MS oranının artışı ile birlikte ultrases geçiş hızlarında artış olduğu görülmektedir. %11 Na içeren ve sadece kaolin ile üretilen geopolimer numunelere kıyasla %11 Na, %9 SD içeren numunelerin ultrases geçiş hızları %11, %9 MS içeren numuneler ise %9 azalma göstermiştir. %17 Na içeren ve sadece kaolin ile üretilen numunelere kıyasla %17 Na, %9 SD içeren numunelerin ultrases geçiş hızları %16, %9 MS içeren numunelerde ise %15 artış gözlenmiştir. Bor katkılı metakaolin tabanlı geopolimer üretilen bir çalışmada 28 günlük numunelerin ultrases geçiş hızları 3633 m/s olarak tespit edilmiştir [45]. Uçucu kül esaslı ve çimento katkılı

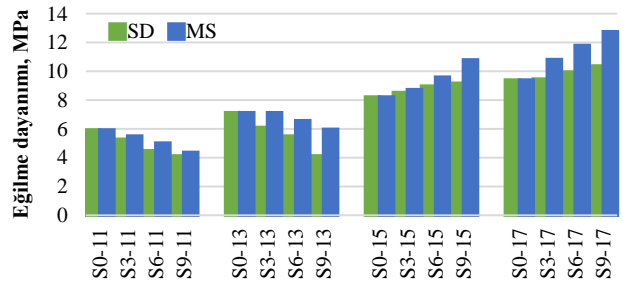
geopolimerlerde ultrases geçiş hızlarının 2842 m/sn ile 3478 m/sn arasında değiştiği tespit edilmiştir [46]. Geopolimer üretilen başka bir çalışmada ise 100 °C' de kür edilen numunelerden C sınıfı uçucu kül içeren 28 günlük harç numunelerde ultrases geçiş hızının 1600 m/sn, F sınıfı uçucu kül içeren numunelerde ise 2514 m/sn olarak tespit edilmiştir. Boşluk oranının azalması ile ultrases geçiş hızının arttığı bilinmektedir [47].



Şekil 7. Numunelerin ultrases geçiş hızları

3.4 Eğilme ve basınç dayanımı deneyleri

Numunelerin eğilme dayanımları Şekil 7'de verilmiştir. Eğilme dayanımları 3.9 MPa ile 12.5 MPa arasında değişmektedir. MS içeren numunelerin eğilme dayanımları SD içeren numunelerden daha fazladır. %11 ve %13 Na içeren numunelerde SD ve MS ilavesi ile birlikte eğilme dayanımlarında azalma gözlenmiştir. Buna karşın %15 Na ve %17 Na içeren numunelerde ise SD ve MS oranının artışı ile birlikte eğilme dayanımlarında artış olduğu görülmektedir. Sadece kaolin içeren numunelerle kıyaslandığında %11 Na ile üretilen ve %9 SD içeren numunelerin eğilme dayanımı %23, MS içeren numunelerin eğilme dayanımları ise %27 azalma göstermiştir. Buna karşılık, %17 Na ile üretilen ve sadece kaolin içeren numunelere kıyasla %17 Na ve %9 SD içeren numunelerin eğilme dayanımı %11, %17 Na ve %9 MS içeren numunelerin eğilme dayanımı ise %37 artış göstermiştir.

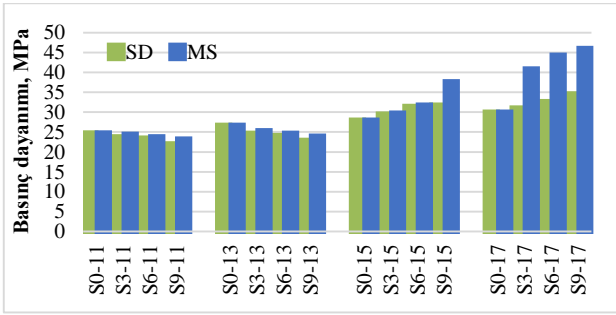


Şekil 7. Numunelerin eğilme dayanımları

Uçucu kül ve %15 çimento katkısı ile geopolimer üretilen bir çalışmada %18 Na içeriğine sahip numunelerde 10.2 MPa eğilme dayanımının tespit edilmiştir [46]. F sınıfı uçucu kül ile geopolimer üretilen başka bir çalışmada ise 2.2 MPa ile 12.4 MPa arası eğilme dayanımı tespit edilmiştir [47]. Atış ve arkadaşları F sınıfı uçucu kül içeren geopolimerlerde 24 saat 105 °C aktivasyon sıcaklığında, %10 Na oranında 7 MPa,

%18 Na oranında ise 14.3 MPa eğilme dayanımı tespit etmişlerdir [8]. Metakaolin tabanlı geopolimer üretilen bir çalışmada 10.4 MPa olan 28 günlük eğilme dayanımının %10, %20, %30 ve %40 SD ikamesi ile 13.2 MPa, 13.5 MPa, 10.7 MPa ve 10.4 MPa gibi değerler ile artış azaldığını tespit etmişlerdir. Aşırı SD ikamesinin geopolimer özelliklerini olumsuz etkilediğini belirtmişlerdir [31].

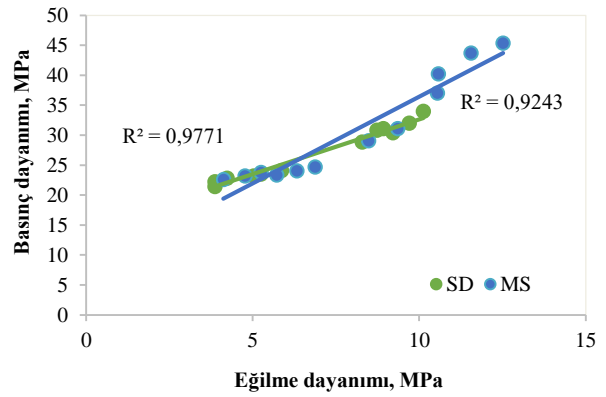
Numunelerin basınç dayanımları Şekil 8’ de verilmiştir. Basınç dayanımları 21.4 MPa ile 45.3 MPa arasında değişmektedir. MS içeren numunelerin basınç dayanımları SD içeren numunelerden daha fazladır. %11 ve %13 Na içeren numunelerde SD ve MS ilavesi ile birlikte basınç dayanımlarında azalma gözlenmiştir. Buna karşılık %15 Na ve %17 Na içeren numunelerde ise SD ve MS oranının artışı ile birlikte basınç dayanımlarında artış olduğu görülmektedir. %11 Na içeren ve sadece kaolin ile üretilen numunelerin basınç dayanımına kıyasla, %11 Na ve %9 SD içeren numunelerin basınç dayanımları %8, %11 Na ve %9 MS içeren numunelerin basınç dayanımı ise %6 azalma göstermiştir. Buna karşılık %17 Na içeren ve sadece kaolin ile üretilen numunelere kıyasla, %17 Na ile üretilen %9 SD içeren numunelerde basınç dayanımı %16, MS ile üretilen numunelerde ise %54 artış göstermiştir. Yüksek aktivatör oranlarında SD ve MS ilavesinin basınç dayanımındaki etkisi belirgin şekilde görülmektedir.



Şekil 8. Numunelerin basınç dayanımları

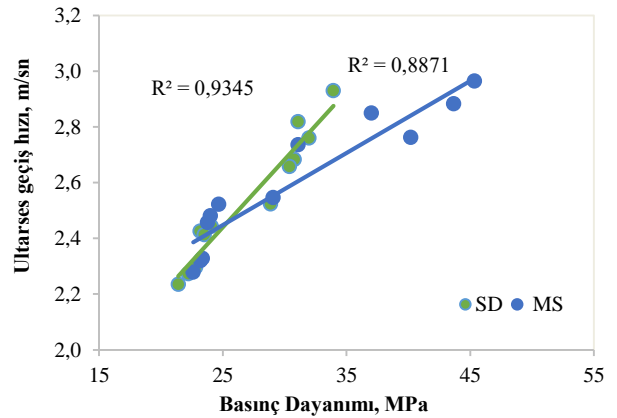
Atık kazan altı külü atığı ve pomza elek altı atığı ile geopolimer üretilen bir çalışmada, NaOH miktarının artırılması ile basınç dayanımında artış olduğu gözlenmiştir [48]. Metakaolinin sodyum silikat ve NaOH ile aktive edildiği bir çalışmada 6 M-10 M arası NaOH’un basınç dayanımını artırdığı, 10M-14 M aralığında basınç dayanımının azaldığı belirtilmektedir. NaOH içeriğinin artırılması, alümina-silikatın çözünme süreci ve geopolimerleşmenin ilerlemesine yardımcı olmaktadır. Yüksek NaOH içeriğinde aşırı Na⁺ iyonları sebebiyle geopolimerin yapısı zayıflamaktadır [49]. %98.9 SiO₂ içeren nano kum ve kaolin karışımı ile geopolimer üretilen bir çalışmada, nano silika miktarının %2.5’tan %5’e çıkarılması ile basınç dayanımının 60.8 MPa’ dan 21.5 MPa’ a indiği belirtilmektedir [41]. Nano tanecikler, Si/Al oranını değiştirerek alümina-silikat jel gelişimine yardımcı olmakta, geopolimeri iyileştirmede önemli bir rol oynamaktadır [38]. Metakaoline SD ilave edilen bir çalışmada ise, %7’ye kadar SD ilavesinin basınç dayanımını artırdığı %7-%10 aralığında ise azalttığı belirtilmektedir [35]. Nmiri ve arkadaşları, metakaolin tabanlı geopolimerlerde 33.7 MPa basınç dayanımını %2 SD

ikamesi ile 20.4 MPa’ a indiğini %6 SD ikamesi ile 35 MPa’ a çıktığını tespit etmişlerdir. Bu durumun reaksiyon için gerekli aktivatörün yetersizliğinden kaynaklandığını belirtmişlerdir [50]. Genel olarak SiO₂/Al₂O₃ oranının basınç dayanımı üzerinde etkili olduğu bilinmektedir. Bazı çalışmalarda SiO₂/Al₂O₃ oranının 3.4 ün altında olmasının basınç dayanımını azaltıcı, üstünde olmasının ise basınç dayanımını artırıcı etki yaptığı belirtilmektedir [51, 52]. Bu çalışmada SD ve MS içermeyen numunelerde katı SiO₂/Al₂O₃ oranı 3.72’ tir. %9 SD ilavesi ile bu oranın 11.84’e ulaştığı, bu durumda aktivatör oranının SiO₂/Al₂O₃ oranından daha etkili olduğu görülmektedir [50, 53]. NaOH içeriğinin artırılması ile Si ve Al’in kaolin parçacıklarından çözümlere süzülmesini artırmakta ve N-A-S-H jel oluşumuna yardımcı olmaktadır [10, 54]. Numunelerin eğilme dayanımları ve basınç dayanımları arasındaki ilişki Şekil 9’ da verilmiştir.



Şekil 9. Numunelerin eğilme ve basınç dayanımları arasındaki ilişki

SD içeren numunelerin eğilme ve basınç dayanımları arasında R²= 0.97, MS ile üretilen numunelerin eğilme ve basınç dayanımları arasında ise R²=0.92 olan bir ilişki bulunmaktadır. Numunelerin ultrases geçiş hızları ile basınç dayanımları arasında ilişki Şekil 10’ da verilmiştir.



Şekil 10. Numunelerin ultrases geçiş hızları ile basınç dayanımları arasındaki ilişki

SD içeren numunelerin ultrases geçiş hızları ve basınç dayanımları arasında $R^2=0.93$, MS ile üretilen numunelerin ultrases geçiş hızları ile basınç dayanımları arasında ise $R^2=0.88$ olan bir ilişki bulunmaktadır. Geopolimer harçlarda eğilme-basınç dayanımı, basınç dayanımı-ultrases geçiş hızı arasında lineer bir ilişki olduğu bilinmektedir [46-47]. Sodyum karbonat (Na_2CO_3) ile aktive edilmiş ve kuru kür uygulanmış diatomitli harçlarda eğilme ve basınç dayanımı arasında $R^2=0.86$ olan bir ilişki tespit edilmiştir [55].

4 Sonuçlar

Kaolin içerisine SD ve MS ilave edilmesi ile üretilen geopolimer harçlar üzerinde yapılan deneyler sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- %11 Na ve %13 Na içeren numunelerde SD ve MS ilavesi ile birim ağırlık değerlerinde azalma, su emme ve boşluk oranlarında artış gözlenmiştir. % 15 Na ve %17 Na içeren numunelerde ise SD ve MS ilavesi ile birim ağırlık değerlerinde artış, su emme ve boşluk oranlarında azalma tespit edilmiştir.
- %11 Na ve %13 Na içeren numunelerde SD ve MS ilavesi ile ultrases geçiş hızlarında, eğilme ve basınç dayanımlarında azalma görülmüştür. Buna karşılık % 15 Na ve %17 Na içeren numunelerde SD ve MS ilavesi ile ultrases geçiş hızlarında, eğilme ve basınç dayanımlarında artış gözlenmiştir.
- %17 Na içeren ve sadece kaolin ile üretilen geopolimer numunelerde 29.3 MPa olan basınç dayanımı, %9 SD ilavesi ile 33.9 MPa, %9 MS ilavesi ile 45.3 MPa' a yükselmiştir.
- Basınç dayanımı üzerinde, aktivatör oranındaki artışın, SD ve MS oranındaki artıştan daha etkili olduğu gözlenmiştir.
- Kaolin esaslı geopolimer harçlarda, fiziksel ve mekanik özelliklere, MS ilavesinin SD ilavesinden daha etkili olduğu tespit edilmiştir.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %4

Kaynaklar

- [1] S. A. Miller, A. Horvath and P. J. M. Monteiro, Readily implementable techniques can cut annual CO_2 emissions from the production of concrete by over 20%, Environmental Research Letters,11, 074029, 2016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074029>
- [2] A. Hasanbeigi, C. Menke, and L. Price, The CO_2 abatement cost curve for the Thailand cement industry. Journal of Cleaner Production. 18 (15), 1509-1519, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.06.005>
- [3] L. N. Assi, K. Carter, E. Deaver, P. Ziehl, Review of availability of source materials for geopolimer/sustainable concrete, Journal of Cleaner Production, 263, 2020, 121477. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121477>
- [4] L. N. Assi, K. Carter, E. Deaver, R. Anay, and P. Ziehl, Sustainable concrete: building a greener future. Journal

- of Cleaner Production, 198, 1641-1651, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.123>.
- [5] J. Thaarrini, and S. Dhivya, Comparative study on the production cost of geopolimer and conventional concretes. International Journal of Civil Engineering Research, 7(2), 117-124, 2016
- [6] B. J. Mathew, M. Sudhakar, and C. Natarajan, Strength, economic and sustainability characteristics of coal ash -GGBS based geopolimer concrete. International Journal of Computational Engineering Research, 3(1), 207-212, 2013
- [7] B. C. McLellan, R. P. Williams, J. Lay, A. van Riessen, and G. D. Corder, Costs and carbon emissions for geopolimer pastes in comparison to ordinary portland cement. Journal of Cleaner Production, 19, 9(10),1080-1090, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.02.010>
- [8] C. D. Atiş, E. B. Görür, O. Karahan, C. Bilim, S. İlkentapar, and E. Luga, Very high strength (120 MPa) class F fly ash geopolimer mortar activated at different NaOH amount, heat curing temperature and heat curing duration. Construction and Building Materials, 96, 673-678, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.089>
- [9] İ. İ. Atabey, O. Karahan, C. Bilim, and C. D. Atiş, Very high strength Na_2SiO_3 and NaOH activated fly ash based geopolimer mortar, Cement Wapno Beton, 25, 292-305, 2020. <https://doi.org/10.32047/CWB.2020.25.4.4>
- [10] A. M. Al Bakri, H. Kamarudin, M. Bnhussain, I. K. Nizar, A. Rafiza, and Y. Zarina, Microstructure of different NaOH molarity of fly ash-based. Journal of Engineering and Technology Research, 3(2), 44-49, 2011.
- [11] M. Kaya, M. Uysal, K. Yılmaz, and C. D. Atiş, Behaviour of geopolimer mortars after exposure to elevated temperatures. Materials Science, 24, 428-436, 2018. <https://doi.org/10.5755/j01.ms.24.4.18829>
- [12] D. L. Y Kong, and J. G. Sanjayan, Effect of elevated temperatures on geopolimer paste, mortar and concrete, Cement and Concrete Research, 40, 2, 334-339, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.10.017>
- [13] Y. Fu, L. Cai, W. Yonggen, Freezethaw cycle test and damage mechanics models of alkali-activated slag concrete, Construction and Building Materials. 25, 3144-3148. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.006>
- [14] M. A. M. Ariffin, M. A. R. Bhutta, M. W. Hussin, M. M. Tahir, and N. Aziah, Sulfuric acid resistance of blended ash geopolimer concrete. Construction and Building Materials, 43, 80-86, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.018>
- [15] S. Çelikten, M. Saridemir, and İ. Ö. Deneme, Mechanical and microstructural properties of alkaliactivated slag and slag+ fly ash mortars exposed to high temperature. Construction and Building Materials, 217, 50-61, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.055>

- [16] Ü. Yurt, B. Dündar, ve E. Çınar, Jeopolimer betonlarda sülfürik asit etkisinin araştırılması, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 8 (2), 1548- 1561, 2020. <https://doi.org/10.29130/dubited.644176>
- [17] X. Hua, J. S. J. van Deventer, The effect of alkali metals on the formation of geopolymeric gels from alkali-feldspars, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 216, 27–44, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(02\)00499-5](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(02)00499-5)
- [18] D. S. Perera, O. Uchida, E. R. Vance, K. S. Finnie, Influence of curing schedule on the integrity of geopolymers. Journal of Materials Science, 42, 3099–3106, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0533-6>
- [19] K. Divya, and C. Rubina, Mechanism of geopolymerisation and factors influencing its development: A review. Journal of Materials Science, 42, 729–746, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0401-4>
- [20] S. Çelikten ve İ. İ. Atabey, Su içeriği ve ısıl kür süresinin atık bazalt tozu esaslı jeopolimer harçların fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10(1): 328- 332, 2021. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.836998>
- [21] M. Naghsh, K. Shams, Synthesis of a kaolin-based geopolymer using a novel fusion method and its application in effective water softening, Applied Clay Science, 146, 15, 238-245, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.06.008>
- [22] F. N. Okoye, J. Durgaprasad, N. B. Singh, Mechanical properties of alkali activated flyash/Kaolin based geopolymer concrete, Construction and Building Materials. 98, 15, 685-691, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.009>
- [23] W. Wang, H. Liu, and W Gu, A novel fabrication approach for improving the mechanical and sound absorbing properties of porous sound-absorbing ceramics. Journal of Alloys and Compounds. 695, 2477-2482, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.11.147>
- [24] H. Xu and J. S. J. van Deventer, Geopolymerisation of alumino-silicate minerals. International Journal of Mineral Processing, 59 (3), 247-266, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(99\)00074-5](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(99)00074-5)
- [25] F. Zibouche, H. Kerdjoudj, L. J.-B d'Espinose, and H. van Damme, Geopolymers from Algerian metakaolin. Influence of secondary minerals. Applied Clay Science, 43 (3-4), 453-458, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.11.001>
- [26] Z. Zhang, H. Wang, X. Yao, and Y. Zhu, Effects of halloysite in kaolin on the formation and properties of geopolymers. Cement and Concrete Composites, 34(5), 709-715, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.02.003>
- [27] C. H. Rüscher, A. Schulz, M. H. Gougazeh, and A. Ritzmann, Mechanical strength development of geopolymer binder and the effect of quartz content, Ceramic Engineering and Science Proceedings, 2013. <http://dx.doi.org/10.1002/9781118807743.ch2>
- [28] C.Y. Heah, H. Kamarudin, A. M. Mustafa Al Bakri, M. Luqman, I. Khairul Nizar, Y. M. Liew, Potential application of kaolin without calcine as greener concrete: A review. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 5(7), 1026-1035, 2011.
- [29] A. Heath, K. Paine, and M. McManus, Minimising the global warming potential of claybased geopolymers. Journal of Cleaner Production, 78, 75-83, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.046>
- [30] P. Duxson, G. C. Lukey, and J. S. J. Van Deventer, Physical evolution of na-geopolymer derived from metakaolin up to 1000 degrees. Journal of Materials Science, 42, 3044–3054, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0535-4>
- [31] M. Uysal, M. M. Al-Mashhadani, Y. Aygörmez, and O. Canpolat, Effect of using colemanite waste and silica fume as partial replacement on the performance of metakaolin-based geopolymer mortars. Construction and Building Materials, 176, 271-282, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.034>
- [32] J. Davidovits, Geopolymer chemistry and application, 2nd ed, Institute Geopolymere, Saint-Quentin, 2008
- [33] S. Prasanphan, A. Wannagon, T. Kobayashi, and S. Jiemsirilars, Reaction mechanisms of calcined kaolin processing waste-based geopolymers in the presence of low alkali activator solution, Construction and Building Materials, 221, 409-420, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.116>
- [34] R. Bajpai, K. Choudhary, A. Srivastava, K. S. Sangwan, M. Singh, Environmental impact assessment of fly ash and silica fume based geopolymer concrete, Journal of Cleaner Production, 254, 120147,2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120147>
- [35] H. M. Khater, Effect of silica fume on the characterization of the geopolymer materials, Khater International Journal of Advanced Structural Engineering, 5:12, 2013.
- [36] P. S. Deb, P. K. Sarker, and S. Barbhuiya, Effects of nano-silica on the strength development of geopolymer cured at room temperature. Construction and Building Materials, 101, 675-683, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.044>
- [37] U. Durak, O. Karahan, B. Uzal, S. İlkentapar, and C. D. Atış, Influence of nano SiO₂ and nano CaCO₃ particles on strength, workability, and microstructural properties of fly ash-based. Structural Concrete, 22(S1),E352-E367, 2021. <https://doi.org/10.1002/suco.201900479>
- [38] K. W. Lo, K. L. Lin, T. W. Cheng, Y. M. Chang, and J. Y. Lan, Effect of nano-SiO₂ on the alkali-activated characteristics of spent catalyst metakaolin-based geopolymers. Construction and Building Materials, 143, 455-463, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.152>
- [39] M. Sivasakthi, R. Jeyalakshmi, N. P. Rajamane, and R. Joseb, Thermal and structural micro analysis of micro silica blended fly ash based geopolymer composites.

- Journal of Non-Crystalline Solids. 499, 117-130, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.07.027>
- [40] E. D. Rodriguez, S. A. Bernal, J. L. Provis, J. Paya, J. M. Monzo, and M. V. Borrachero, Effect of nanosilica-based activators on the performance of an alkali-activated fly ash binder, *Cement and Concrete Composites*, 35 (1), 1-11, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.025>
- [41] M. F. Zawrah, S. E. Abo Sawan, R. M. Khattab, and A. A. Abdel-Shafi, Effect of nano sand on the properties of metakaolin-based geopolymer: Study on its low rate sintering. *Construction and Building Materials*, 246, 11848620, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118486>
- [42] TS-EN 12504-4. Beton deneyleri - Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini, Ankara, Türk Standardları Enstitüsü, 2012
- [43] TS EN 1015 -11, Kagir harcı - Deney metotları - Bölüm 11: Sertleşmiş harcın basınç ve eğilme dayanımının tayini, Türk Standardları Enstitüsü, 2013
- [44] I. B. Messaoud, N. Hamdi, and E. Srasra, Physicochemical characterization of geopolymer binders and foams made from Tunisian clay. *Hindawi, Advances in Materials Science and Engineering*, 9392743, 8, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/9392743>
- [45] A. Celik, K. Yilmaz, O. Canpolat, M. M. Al-mashhadani, Y. Aygörmmez, and M. Uysal, High-temperature behavior and mechanical characteristics of boron waste additive metakaolin based geopolymer composites reinforced with synthetic fibers. *Construction and Building Materials*, 187, 1190-1203, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.062>
- [46] M. Kaya, F. Köksal. Effect of cement additive on physical and mechanical properties of high calcium fly ash geopolymer mortars, *Structural Concrete*, 22(S1), E452-E465, 2021. <https://doi.org/10.1002/suco.202000235>
- [47] M. Kaya, M. Uysal, K. Yilmaz, O. Karahan, and C. D. Atiş, Mechanical properties of class C and F fly ash geopolymer mortars, *Gradevinar*, 72 (4), 297- 309, 2020. <https://doi.org/10.14256/JCE.2421.2018>
- [48] N. Doğan-Sağlamtimur and A. Bilgil, Atık kazan altı külü ve pomza elek altı atığından geopolimer yapı malzemesi üretimi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(2): 590-599, 2018. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.443221>
- [49] M. Rowles, and B. O'Connor, Chemical optimisation of the compressive strength of aluminosilicate geopolymers synthesized by sodium silicate activation of metakaolinite, *Journal of Materials Chemistry*, 13 1161–1165, 2003. <https://doi.org/10.1039/B212629J>
- [50] A. Nmiri, M. Duc, N. Hamdi, O. Yazoghli-Marzouk, and E. Srasra, Replacement of alkali silicate solution with silica fume in metakaolin-based geopolymers. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 26 (5), 555, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12613-019-1764-2>
- [51] P. De Silva, K. Sagoe-Crenstil, and V. Sirivivatnanon, Kinetics of geopolymerization: role of Al₂O₃ and SiO₂, *Cement and Concrete Research*, 37 (4), 512-518, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.01.003>
- [52] C. K. Ma, A. Z. Awang, and W. Omar, Structural and material performance of geopolymer concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 186, 90-102, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.111>
- [53] İ. İ Atabey, O. Karahan, C. Bilim, and C. D. Atiş. The influence of activator type and quantity on the transport properties of class F fly ash geopolymer, *Construction and Building Materials*. 264: 120268, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120268>
- [54] U. Rattanasak, P. Chindapasirt, Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer, *Minerals Engineering*, 22(12), 2009. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.03.022>
- [55] M. Saridemir, Alkali ile aktive edilmiş öğütülmüş diatomitli harçların dayanım özellikleri. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(2): 124-134, 2016. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.294970>





Mevcut okul türü bir binanın deprem performansının 2007 ve 2018 deprem yönetmeliklerine göre değerlendirilmesi

An evaluation on seismic performance of an existing school building according to the 2007 and 2018 Turkish Seismic Codes

Mehmet Yalın¹ , Hakan Ulutaş^{2,*} 

¹ İnşaat Yüksek Mühendisi, 07190, Antalya, Türkiye

² Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 15030, Burdur, Türkiye

Özet

Bu çalışmada, boyuna donatıları nervürsüz (düz) donatı çeliği ile düzenlenmiş, perdeli çerçevesel taşıyıcı sisteme sahip mevcut okul türü bir binanın Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY-2007) ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018)'nin her ikisine göre de deprem performansı belirlenmiş elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. TBDY (2018)'e göre betonarme elemanların boyuna donatıları nervürsüz (düz) donatı çeliği ile düzenlenmişse, donatı çeliği birim şekildeğiştirme talebi ve plastik dönme talebi 1,5 ile çarpılarak arttırılması gerekmektedir. DBYBHY (2007)'de bu koşul bulunmadığından iki yönetmeliği kıyaslamak için nervürsüz donatıya sahip mevcut okul türü bir binanın seçilmesi yönetmelikleri kıyaslamak adına daha uygun olacağı düşünülmüştür. Analizler doğrusal elastik olmayan değerlendirme yöntemi kullanılarak yapılmıştır. İki yönetmeliğin performans sonuçları kıyaslandığında yönetmelikler arasındaki uyumsuzluğun 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan depremler için olduğu tespit edilmiştir. 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan depremler için binanın Y doğrultusu DBYBHY (2007)'e göre hedef performans seviyesini sağlıyorken, TBDY 2018'e göre hedef performans seviyesini sağlayamadığı belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Performans analizi, Doğrusal elastik olmayan yöntem, DBYBHY 2007 ve TBDY 2018 yönetmeliklerinin kıyaslanması

1 Giriş

Ülkemizde, binaları depreme karşı güvenli inşa etmek amacıyla ilk olarak 1940 yılında "Zelzele Mıntıklarında Yapılacak İnşaata Ait İtalyan Yapı Talimatnamesi" hazırlanmıştır. Zaman içinde yapılan bilimsel çalışmalar ve teknolojik imkânların çoğalması ile mevcut yönetmeliklerin eksiklikleri görülmüş ve bu yönetmeliklerin güncellenme ihtiyacı doğmuştur. Ülkemizde, 2018 yılına kadar dokuz kez değişen deprem yönetmeliği son olarak Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY, 2018) [1] adıyla 2019 yılında yürürlüğe girmiştir.

Mevcut binaların performanslarının belirlenmesi konusu ilk kez Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında

Abstract

In this study, the seismic performance of an existing school-type building with a wall-framed system with longitudinal reinforcements arranged with non-ribbed reinforcement steel was determined according to both Turkish Seismic Code (TSC-2007) and Turkish Seismic Code (TSC-2018) and the two codes were compared based on the results. According to the TSC (2018), if the longitudinal reinforcement of the reinforced concrete elements is arranged with non-ribbed reinforcement steel, this steel should be multiplied by the strain request and the plastic rotation request by 1.5 needs to be increased. Since there was no such requirement in TSC (2007), it was thought that it would be more appropriate to choose an existing school-type building with non-ribbed reinforcement to compare the two regulations. Analyses were carried out using the non-linear elastic evaluation method. The comparison between the performance results of the two regulations illustrated that the incompatibility between the regulations is for earthquakes with a 2% probability of exceeding in 50 years. It has been determined that while the Y direction of the building has achieved the target performance level according to TSC (2007) for earthquakes with a probability of exceeding 2% in 50 years, it cannot achieve the target performance level according to TSC (2018)

Keywords: Performance analysis, Nonlinear method, Comparison of TSC 2007 and TSC 2018 regulations

Yönetmelik 2007 (DBYBHY 2007) [2]'de yer almıştır. Mevcut bina sistemlerinin deprem performanslarının belirlenmesi konusu TBDY (2018) [1]'de de yer almış fakat DBYBHY (2007) [2]'e göre değerlendirme esaslarında bazı değişikliklere gidilmiştir. Literatürde yönetmelikte meydana gelen değişikliğin bina deprem davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için çalışmalar yayınlanmaya başlanmıştır. Karaca vd. [3], Niğde İl merkezinde bulunan ve TBDY (2018) [1]'e göre tasarlanan 5 adet betonarme binayı 2007 ve 2018 deprem yönetmeliklerine göre yapısal tasarım bağlamda karşılaştırmıştır. Yapılan analizler sonucu 2018 deprem yönetmeliğine göre tasarlanacak bir binada daha fazla beton kullanılması gerektiği, ancak donatı miktarında

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: hakannulutas@gmail.com (H. Ulutaş)

Geliş / Received: 14.03.2021 Kabul / Accepted: 21.04.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.911167

genelde azalma eğilimi olduğunu gözlemlenmiştir. Severcan vd. [4], 8 katlı mevcut betonarme bir binanın deprem performansını DBYBHY (2007) [2] ve Eurocode 8 [5]'e göre statik itme analizi kullanılarak belirlemiştir. Yapılan değerlendirme sonucu eleman performans düzeylerinin özellikle düşey taşıyıcı elemanlarda birbirine yakın olduğu ancak DBYBHY (2007) [2]'nin Eurocode 8 [5]'e göre daha güvenli tarafta kaldığı görülmüştür. Ulutaş [6], 2007 ve 2018 deprem yönetmeliklerini kesit hasar sınırları bakımından kıyaslamıştır. Yapılan inceleme sonucu 2018 deprem yönetmeliğinin deprem güvenliği açısından 2007 deprem yönetmeliğine göre daha güvenli tarafta kaldığı sonucuna varmıştır. Ünsal vd. [7], yapı yüksekliğinin taban kesme kuvveti ve tepe yerdeğiştirme üzerindeki etkisini DBYBHY (2007) [2] ve TBDY (2018) [1] yönetmeliklerine göre incelemişlerdir. İki yönetmeliğe göre elde edilen taban kesme kuvveti değerlerinin yakın olması halinde, TBDY (2018) [1] esas alınarak elde edilen maksimum yerdeğiştirmesinin DBYBHY (2007) [2] esas alınarak elde edilen maksimum yerdeğiştirme değerlerinden çok daha büyük olduğunu gözlemlenmişlerdir. Dalyan ve Şahin [8], mevcut 5 katlı betonarme konut türü bir binanın doğrusal olmayan artımsal itme analizi yöntemiyle, DBYBHY (2007) [2] ve TBDY (2018) [1] yöntemlerinin her ikisine göre de taşıyıcı sisteminin performans analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak irdelenmiştir. Sarı [9], mevcut konut türü bir binanın TBDY (2018) [1] ve DBYBHY (2007) [2] yönetmeliklerine göre deprem performansını statik itme analiziyle belirlemiştir. İncelenen konut türü binanın her iki yönetmeliğe göre de hedef performans seviyesini sağladığını belirlemiştir. Ayaz [10], DBYBHY (2007) [2]'e göre güçlendirilmiş bir binanın, TBDY (2018) [1]'e göre doğrusal olmayan davranışını incelemiştir. Binanın DD-1 ve DD-3 deprem düzeylerine göre performans analizlerini yaparak TBDY (2018) [1]'in şartlarını sağlandığını tespit etmiştir. Eldemir [11] yapmış olduğu tez çalışmasında, DBYBHY (2007) [2] ve TBDY (2018) [1] yönetmeliklerini mevcut yapıların sismik davranış özellikleri açısından karşılaştırmıştır. Yapılan çalışma sonucu her iki yönetmelikle elde edilen çatı katı ötelenme oranları, deplasman profilleri ve görelî kat ötelenme oranlarında farklılıklar olduğunu belirlemiştir. Nemutlu [12] yaptığı tez çalışmasında, TBDY (2018) [1] ve DBYBHY (2007) [2] yönetmeliklerini deprem hesapları açısından Amerikan deprem yönetmeliği (ASCE 7-16) [13] ile karşılaştırmıştır. Elci vd. [14], 2007 ve 2018 deprem yönetmeliklerini betonarme kolonların deprem performansının değerlendirilmesi bakımından kıyaslamışlardır. Yönetmeliklerin kıyaslanması için deneysel ve teorik bir çalışma yapmışlardır. Çalışma sonucunda, 2018 deprem yönetmeliğinin 2007 deprem yönetmeliğine göre daha güvenli tarafta kalan deformasyon limitleri verdiğini belirlemiştir.

Bu çalışmada, boyuna donatıları nervürsüz (düz) donatı çeliği ile düzenlenmiş, perdeli çerçeve taşıyıcı sisteme sahip mevcut okul türü bir binanın DBYBHY (2007) [2] ve TBDY (2018) [1] deprem yönetmeliklerinin her ikisine göre de deprem performansı belirlenmiş iki yönetmeliğe göre elde edilen bu sonuçlar kıyaslanmıştır. Seçilen okul binasının

boyuna donatılarının nervürsüz (düz) donatı çeliği ile düzenlenmiş olmasına özellikle dikkat edilmiştir. Çünkü TBDY (2018) [1] yönetmeliğine göre betonarme elemanların boyuna donatıları nervürsüz (düz) donatı çeliği ile düzenlenmişse, donatı çeliği birim şekildeğiştirme talebi ve plastik dönme talebi 1,5 ile çarpılarak artırılması gerekmektedir. DBYBHY (2007) [2]'de bu koşul bulunmadığından iki yönetmeliği kıyaslamak için nervürsüz donatıya sahip mevcut okul türü bir binanın seçilmesi yönetmelikleri kıyaslamak adına daha uygun olacaktır. Analizler doğrusal elastik olmayan değerlendirme yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Kesitlerin moment eğrilik analizleri ve plastik mafsallık özellikleri ile binanın itme analizleri için SAP 2000 [15] programından faydalanılmıştır.

2 Materyal ve metod

Mevcut binaların deprem güvenliğinin belirlenmesi için DBYBHY (2007) [2] ve TBDY (2018) [1]'de doğrusal elastik ve doğrusal elastik olmayan değerlendirme yöntemi olmak üzere iki tip yöntemden bahsedilmektedir. Belirtilen bu iki yöntemden doğrusal olan değerlendirme yönteminde dayanım esaslı yaklaşım ile çözümleme yapılırken, doğrusal olmayan değerlendirme yönteminde, şekildeğiştirme ve yer değiştirme esaslı yaklaşım ile çözümleme yapılmaktadır.

Bu çalışmada, 2007 deprem yönetmeliğine göre yapılan çözümler doğrusal olmayan değerlendirme yöntemlerinden artımsal eşdeğer deprem yükü yöntemiyle, 2018 deprem yönetmeliğine göre yapılan çözümler ise artımsal eşdeğer deprem yükünün 2018 deprem yönetmeliğinde karşılığı olan tek modlu itme yöntemi ile yapılmıştır.

2.1 Kesit hasar sınırları, hasar durumları ve hasar bölgeleri

2.1.1 DBYBHY 2007'e göre kesit hasar sınırları, hasar durumları ve hasar bölgeleri

DBYBHY (2007) [2]'de sünek elemanlar için kesit düzeyinde Minimum Hasar Sınırı (MN), Güvenlik Sınırı (GV) ve Göçme Sınırı (GÇ) olmak üzere üç hasar durumu ve hasar sınırı tanımlanmıştır. Doğrusal elastik olmayan analiz sonucu taşıyıcı elemanlarda meydana gelen şekil değiştirmelerin Tablo 1'de verilen birim şekildeğiştirme üst sınırları ile kıyaslanmasıyla kesitin hasarı belirlenmiş olur.

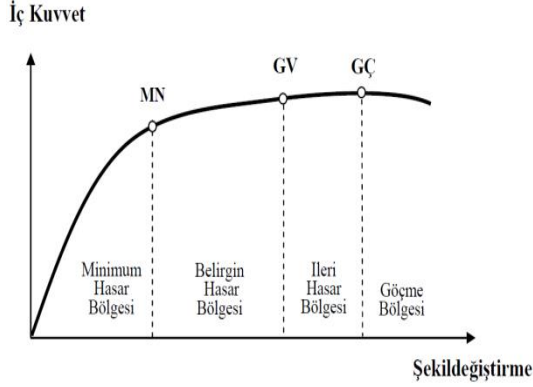
Tablo 1. Beton ve donatı şekildeğiştirme üst sınırları

Kesit hasar sınırı	Beton şekildeğiştirme üst sınırları	Donatı çeliği şekildeğiştirme üst sınırları
MN	$(\epsilon_{cu}) = 0.0035$	$(\epsilon_s) = 0.010$
GV	$(\epsilon_{cg}) = 0.0035 + 0.01 (\rho_s/\rho_{sm}) \leq 0.0135$	$(\epsilon_s) = 0.040$
GÇ	$(\epsilon_{cg}) = 0.004 + 0.014 (\rho_s/\rho_{sm}) \leq 0.018$	$(\epsilon_s) = 0.060$

Tablo 1'de geçen ϵ_{cg} , etriyenin en dış lifindeki beton basınç birim şekildeğiştirmesini; ϵ_{cu} , kesitin en dış lifindeki beton basınç birim şekildeğiştirmesini; ϵ_s , donatı çeliği birim şekildeğiştirmesini; ρ_s , kesitte bulunan enine donatının hacimsel oranını; ρ_{sm} ise DBYBHY (2007) [2]'e göre kesitte

bulunması gereken enine donatının hacimsel oranını ifade etmektedir.

Elemanın kritik kesitlerinin hasarına bakılarak hangi hasar bölgesinde kaldığına karar verilir. DBYBHY (2007) [2]'de verilen hasar sınırları ve hasar bölgeleri Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. DBYBHY (2007) [2]'de verilen kesit hasar sınırları ve hasar bölgeleri

2.1.2 TBDY 2018'e göre kesit hasar sınırları, hasar durumları ve hasar bölgeleri

TBDY (2018) [1]'de sünek elemanlar için kesit düzeyinde Sınırlı Hasar (SH), Kontrollü Hasar (KH) ve Göçme Öncesi Hasar (GÖ) olmak üzere üç hasar durumu ve hasar sınırı tanımlanmıştır. Doğrusal elastik olmayan analiz sonucu taşıyıcı elemanlarda meydana gelen plastik dönmelerin Tablo 2'de yığılı plastik davranış modeli için verilen plastik dönme üst sınırları ile kıyaslanmasıyla kesitin hasarı belirlenmiş olur.

Tablo 2. Plastik dönme üst sınırları

Hasar sınırı	Plastik dönme üst sınırları (θ_p)
GÖ	$\theta_p^{(GÖ)} = \frac{2}{3} \left((\phi_u - \phi_y) L_p \left(1 - 0.5 \frac{L_p}{L_s} \right) + 4.5 \phi_u d_b \right)$
KH	$\theta_p^{(KH)} = 0.75 \theta_p^{(GÖ)}$
SH	$\theta_p^{(SH)} = 0$

Burada; ϕ_u , kesitteki göçme öncesi toplam eğriliği; ϕ_y , plastik mafsallardaki etkin akma eğriliğini; L_s , kesme açıklığını; L_p , plastik mafsallardaki boyunu; d_b ise düğüm noktasındaki donatıların ortalama çapını ifade etmektedir. ϕ_u , Denklem (1)'de verilen beton ve donatı çeliği birim şekil değiştirmeleri ve kesite etkileyen aksel kuvvet dikkate alınarak yapılan analizden elde edilmektedir.

$$(\epsilon_s)^{(GÖ)} = 0.4 \epsilon_{su} \quad (1.a)$$

$$(\epsilon_c)^{(GÖ)} = 0.0035 + 0.04 \sqrt{\omega_{we}} \leq 0.018 \quad (1.b)$$

Denklem (1.a)'da verilen ϵ_{su} , maksimum dayanıma karşı gelen donatı birim uzamasını ifade etmekte olup S220 donatı sınıfı için 0.12, S420 donatı sınıfı için 0.08 alınmaktadır. Denklem (1.b)'de verilen ω_{we} ise etkin sargı donatısının

mekanik donatı oranını ifade etmekte olup dikdörtgen kesitler için Denklem (2) ile elde edilmektedir.

$$\omega_{we} = \alpha_{se} * \rho_{sh,min} * \frac{f_{ywe}}{f_{ce}} \quad (2)$$

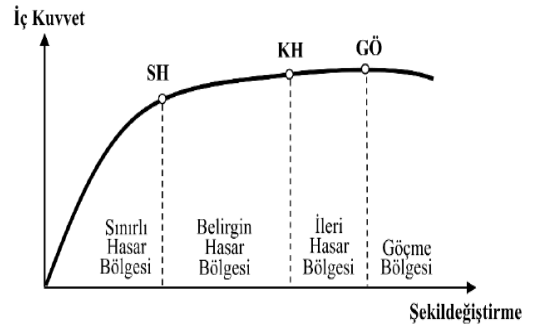
Denklem (2)'de verilen $\rho_{sh,min}$ dikdörtgen kesitte iki yatay doğrultuda hacimsel enine donatı oranının küçük olanını; f_{ywe} , enine donatının ortalama (beklenen) akma dayanımı; f_{ce} beton ortalama (beklenen) basınç dayanımını; α_{se} ise sargı donatısı etkinlik katsayısını ifade etmektedir. $\rho_{sh,min}$ Denklem (3) ile α_{se} ise Denklem (4) ile elde edilmektedir.

$$\rho_{sh} = \frac{A_{sh}}{b_k s} \quad (3)$$

$$\alpha_{se} = \left(1 - \frac{\sum \alpha_i^2}{6 b_o h_o} \right) \left(1 - \frac{s}{2 b_o} \right) \left(1 - \frac{s}{2 h_o} \right) \quad (4)$$

Burada; A_{sh} ve ρ_{sh} sırasıyla göz önüne alınan doğrultuda enine donatının alanını ve hacimsel oranını, b_k dik doğrultudaki çekirdek boyutunu, s enine donatı aralığını, b_o ve h_o sargı donatısı eksenlerinden ölçülen sargılı beton boyutlarını, α_i bir etriye kolu veya çiroz tarafından mesnetlenen boyuna donatıların eksenleri arasındaki uzaklığı göstermektedir.

TBDY (2018) [1]'de verilen hasar sınırları ve hasar bölgeleri Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. TBDY (2018) [1]'de verilen kesit hasar sınırları ve hasar bölgeleri

2.2 Performans seviyeleri

2.2.1 DBYBHY 2007'e göre performans seviyeleri

DBYBHY [2]'de Hemen Kullanım (HK) performans düzeyi, Can Güvenliği (CG) performans düzeyi ve Göçme Öncesi (GÖ) performans düzeyi olmak üzere 3 performans düzeyi verilmiştir. GÖ performans düzeyini sağlayamayan binalar Göçme Durumu'ndadır. Çalışma kapsamında okul türü bir bina incelendiğinden, DBYBHY (2007) [2]'e göre binanın 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan depremler için hedef performans seviyesi HK, 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan depremler için ise CG'dir. DBYBHY (2007) [2]'e göre betonarme binaların HK ve CG performans seviyelerini sağlamaları için gerekli koşullar Tablo 3'te verilmiştir. Gevrek olarak hasar gören elemanlar Tablo 3'e dâhil edilmemeli, bu elemanlar güçlendirilmelidir.

Tablo 3. DBYBHY (2007) [2]'de verilen performans seviyesi koşulları

Performans seviyesi	Koşul
HK	❖ Yapılan analiz sonucu her bir katın her bir doğrultusunda, Belirgin Hasar Bölgesi'ndeki kirişlerin sayısı ilgili doğrultudaki toplam kiriş sayısına oranı en fazla 0.1 olabilir.
	❖ İleri Hasar Bölgesi ve Göçme Bölgesine geçen kiriş olmamalıdır.
	❖ Belirgin Hasar Bölgesi, İleri Hasar Bölgesi ve Göçme Bölgesine geçen düşey taşıyıcı eleman olmamalıdır.
CG	➢ Yapılan analiz sonucu her bir katın her bir doğrultusunda, İleri Hasar Bölgesi'ndeki kirişlerin sayısı ilgili doğrultudaki toplam kiriş sayısına oranı en fazla 0.3 olabilir.
	➢ İleri Hasar Bölgesi'ndeki kolonların, her bir katta kolonlar tarafından taşınan kesme kuvvetine oranı normal katlarda 0.2'den daha az olmalıdır. Bu oran en üst katta en fazla 0.4 olabilir.
	➢ Göçme bölgesine geçen düşey taşıyıcı eleman olmamalıdır.
	➢ Herhangi bir katta, iki ucu birden Minimum Hasar Sınırını aşan düşey elemanların taşıdığı kesme kuvvetlerinin, o kattaki tüm düşey elemanlar tarafından taşınan kesme kuvvetine oranı en fazla 0.3 olmalıdır.

2.2.2 TBDY 2018'e göre performans seviyeleri

TBDY (2018) [1]'de Kesintisiz Kullanım(KK) performans düzeyi, Sınırlı Hasar (SH) performans düzeyi, Kontrollü Hasar (KH) performans düzeyi ve Göçmenin Önlenmesi (GÖ) performans düzeyi olmak üzere 4 performans düzeyi verilmiştir. Göçmenin Önlenmesi performans düzeyini sağlayamayan binalar Göçme Durumundadır.

Tablo 4. TBDY (2018) [1]'de verilen performans seviyesi koşulları

Performans seviyesi	Koşul
SH	❖ Yapılan analiz sonucu her bir katın her bir doğrultusunda, Belirgin Hasar Bölgesi'ndeki kirişlerin sayısı ilgili doğrultudaki toplam kiriş sayısına oranı en fazla 0.2 olabilir.
	❖ İleri Hasar Bölgesi ve Göçme Bölgesine geçen kiriş olmamalıdır.
	❖ Belirgin Hasar Bölgesi, İleri Hasar Bölgesi ve Göçme Bölgesine geçen düşey taşıyıcı eleman olmamalıdır.
KH	➢ Yapılan analiz sonucu her bir katın her bir doğrultusunda, İleri Hasar Bölgesi'ndeki kirişlerin sayısı ilgili doğrultudaki toplam kiriş sayısına oranı en fazla 0.35 olabilir.
	➢ İleri Hasar Bölgesi'ndeki kolonların, her bir katta kolonlar tarafından taşınan kesme kuvvetine oranı normal katlarda 0.2'den daha az malıdır. Bu oran en üst katta en fazla 0.4 olabilir.
	➢ Göçme bölgesine geçen düşey elemanlar olmamalıdır.
	➢ Herhangi bir katta, iki ucu birden Belirgin Hasar Sınırını aşan düşey elemanların taşıdığı kesme kuvvetlerinin, o kattaki tüm düşey elemanlar tarafından taşınan kesme kuvvetine oranı en fazla 0.3 olmalıdır.

TBDY (2018) [1]'e göre incelenen binanın 50 yılda aşılma olasılığı %50 olan depremler (DD-3 deprem düzeyi) için hedef performans seviyesi SH, 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan depremler (DD-1 deprem düzeyi) için hedef performans seviyesi (KH)'dir. TBDY (2018) [1]'e göre betonarme binaların SH ve KH performans seviyelerini sağlamaları için gerekli koşullar Tablo 4'te verilmiştir. Gevrek olarak hasar gören elemanlar Tablo 4'e dâhil edilmemeli, bu elemanlar güçlendirilmelidir.

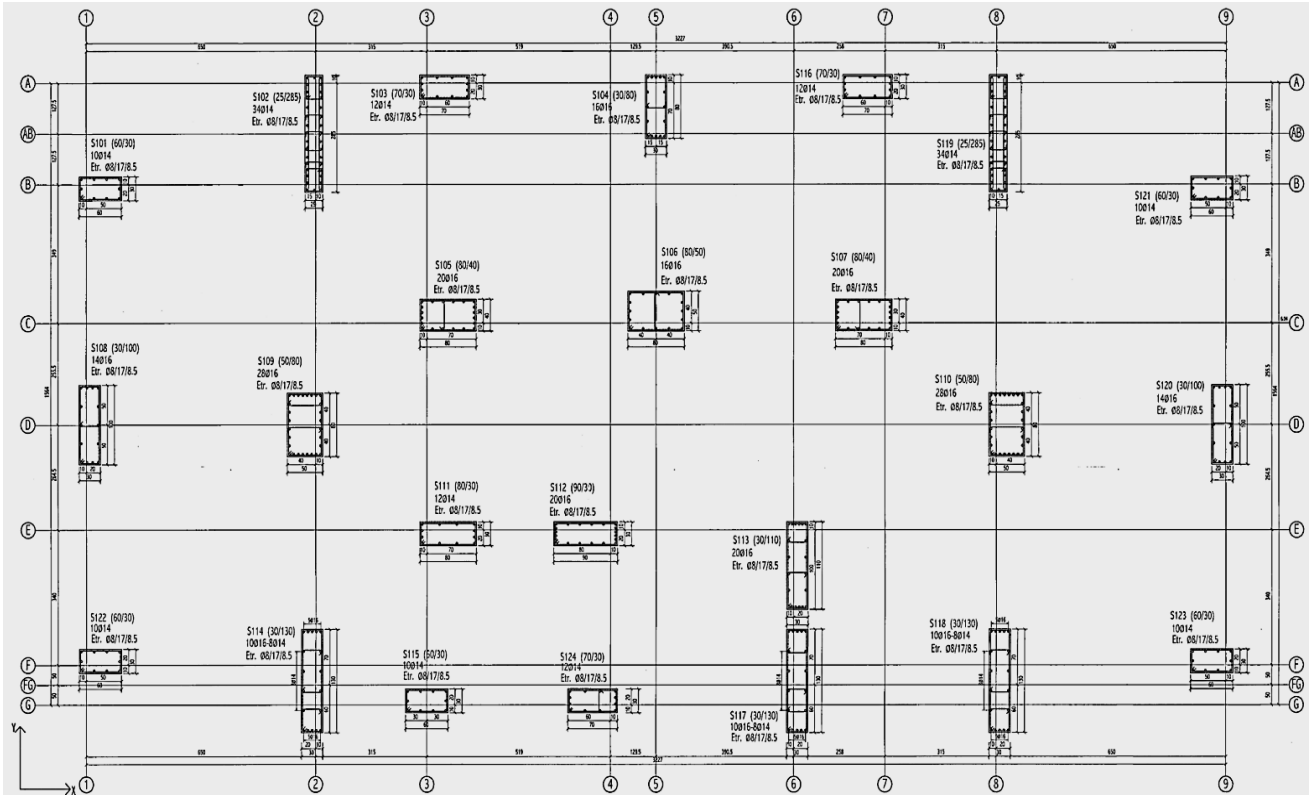
3 Mevcut okul türü bir binanın deprem performansının değerlendirilmesi

Çalışma kapsamında, 1986 yılında inşa edilen 4 katlı bir okul binası incelenecektir. Binanın her bir katında 22 adet kolon ve 2 adet perde duvar bulunmaktadır. Binanın tüm katlarının, kolon aplikasyon planı Şekil 3'te verilmiştir. Bina genel bilgileri aşağıda verilmiştir.

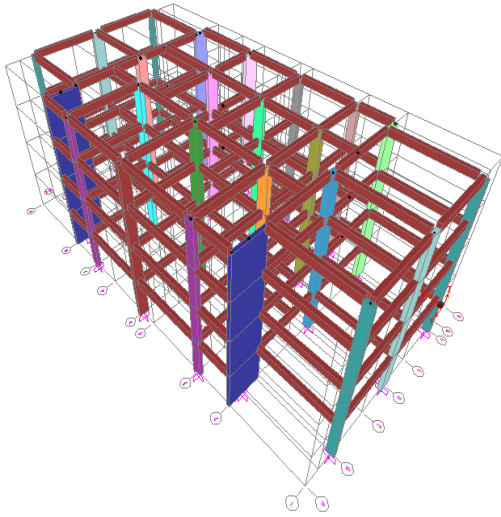
- Beton sınıfı: C14
 - Donatı sınıfı: S220
 - Kat yüksekliği: 3.3 m
 - Yerel zemin sınıfı: DBYBHY 2007 [2]'e göre: Z3, TBDY 2018 [1]'e göre: ZD
 - Bina deprem parametreleri:
 - DBYBHY 2007'ye göre: etkin yer ivmesi A_0 : 0.3g
 - TBDY 2018'e göre,
 - DD-1 için S_{D5} : 1.138; S_{D1} :0.567
 - DD-2 için S_{D5} : 0.726 S_{D1} :0.327
 - DD-3 için S_{D5} : 0.338; S_{D1} :0.134
 - Bina düşey yükleri
 - Döşeme sabit yükü=5.25 kN/m²
 - Döşeme hareketli yükü
- Normal döşemelerde: 3.5 kN/m²
Koridorlarda: 5 kN/m²
➢ İç ve dış duvar yükleri (sıva dahil): 5 kN/m

Bina taşıyıcı sistemi SAP 2000 [15] programı kullanılarak modellenmiştir. Bina taşıyıcı sisteminin 3 boyutlu modeli Şekil 4'te verilmiştir. 2 farklı yönetmelik için performans değerlendirilmesi yapılacağından 2 farklı Sap 2000 dosyası oluşturulmuştur. DBYBHY 2007 [2] esaslarına göre oluşturulan Sap 2000 modeli, Okul model_2007, TBDY 2018 [1]' esaslarına göre oluşturulan Sap 2000 modeli ise Okul model_2018 olarak isimlendirilmiştir.

Okul model_2018 Sap 2000 [15] modelinde kiriş, kolon ve betonarme perdelerin etkin kesit rijitlik çarpanları sırasıyla 0.35, 0.7 ve 0.5 alınmıştır. Okul model_2007 Sap 2000 [15] modelinde ise kirişlerin etkin kesit rijitlik çarpanları 0.4 alınmıştır. Düşey taşıyıcıların etkin kesit rijitlik çarpanlarının belirlenmesi için ise bina öncelikle düşey yükler altında analiz yapılmış ve düşey taşıyıcı elemanlara etkiyen eksenel yükler belirlenmiştir. Düşey taşıyıcıların etkin kesit rijitlik çarpanları elde edilen bu eksenel yüklere göre belirlenmiştir. Düşey taşıyıcı elemanların etkin kesit rijitlik çarpanları 0.4 ile 0.62 aralığında çıkmıştır.



Şekil 3. Mevcut okul binasının kolon aplikasyon planı



Şekil 4. Binanın 3 boyutlu taşıyıcı sistem modeli

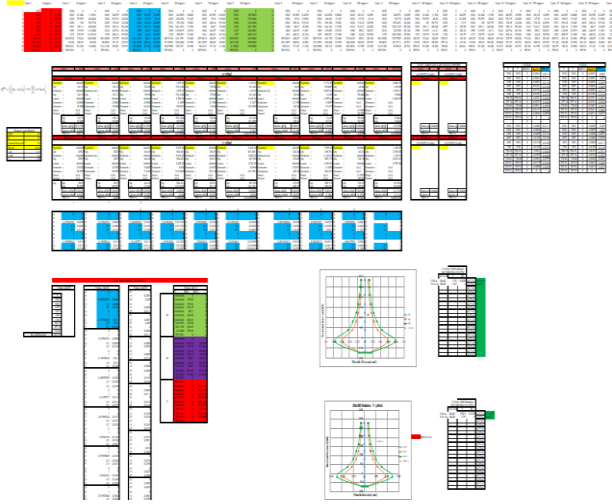
Statik itme analizlerinde yapılan kabuller aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Doğrusal olmayan davranış modeli olarak 'Yığılı Plastik Davranış Modeli' kullanılmıştır.
- Plastik şekilleştirmelerin düzgün yayılı olarak gerçekleştiği kabul edilmiştir.
- Plastik mafsallı boyu (L_p), kesitin çalışan doğrultudaki boyutunun yarısı olarak alınmıştır.

- Plastik mafsallar kolon ve kirişlerde net açıklıklarının iki ucuna, perdelerde ise alt uçlara koyulmuştur.
- Kolon ve perdelerde plastikleşmenin aksel kuvvet ve iki eksenli eğilme momenti (P-M2-M3) etkisinde gerçekleştiği, kirişlerde tek eksenli (M3) gerçekleştiği kabul edilmiştir.
- Kesme açıklığı (L_s), kolon ve kirişlerde açıklığın yarısı, perdelerde ise her katın tabanından son katta bulunan perdenin tepesine olan uzaklığın yarısı olarak hesaplanmıştır.

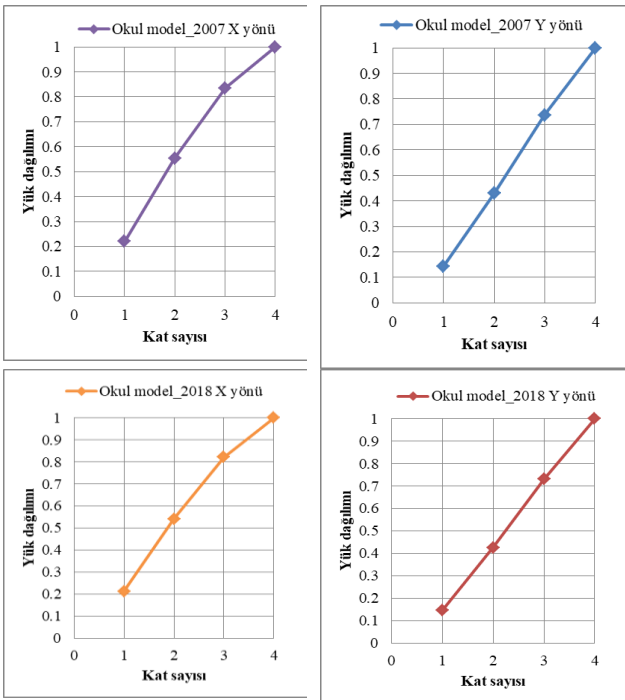
Binanın taşıyıcı eleman kesitlerinde oluşacak hasarların belirlenebilmesi için elemanların uçlarına atanacak plastik mafsallın özelliklerinin tanımlanması gerekmektedir. Taşıyıcı elemanların plastik mafsallı özelliklerinin tanımlanabilmesi için ise kesitlerin karşılıklı etkileşim diyagramlarının (akma yüzeyleri) ve moment eğrilik bağıntılarının elde edilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada kesitlerin akma yüzeyleri ve moment-eğrilik bağıntıları SAP 2000 [15] programının Section Designer bölümü kullanılarak elde edilmiştir. 2007 ve 2018 deprem yönetmeliklerine göre kesit hasar sınırların belirlenmesi için ise moment eğrilik analizlerinden elde edilen veriler Excel formatında oluşturulan bir dosya aktarılmıştır. Her bir kesitin plastik mafsallı özellikleri, söz konusu Excel yardımıyla SAP 2000 [15] programına aktarılacak üzere oluşturulmuştur. Oluşturulan Excel'in 2018 deprem yönetmeliği için hazırlanan görüntüsü Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Kesitlerin plastik mafsal özelliklerinin belirlenmesi için oluşturulan Excel'in görüntüsü

Her bir kesite plastik mafsallar atandıktan sonra tek modlu itme analizinin tanımlanabilmesi için deprem doğrultusunda hakim titreşim mod şekli ile orantılı olacak şekilde yük dağılımının belirlenmesi gerekmektedir. Katlara uygulanacak yük dağılımı, ilgili doğrultunun mod şekli genliği ile katlara ait kütlelerin çarpımıyla elde edilen değerlere göre yapılır. Katlara uygulanacak yük dağılımının belirlenmesi için Okul Model_2007 ve Okul Model_2018 SAP 2000 dosyaları modal analize tabi tutulmuştur. Modal analiz sonucu elde edilen mod şekli genlikleri kat kütleleri ile çarpılarak ilgili doğrultu için katlara uygulanacak yük dağılımları belirlenmiştir (Şekil 6). Elde edilen yükler kat kütle merkezine uygulanmıştır.



Şekil 6. Kat hizalarına etkiyen yatay yük dağılımları

TBDY 2018 [1]'e göre itme analizinden önce, statik düşey yüklerin taşıyıcı sisteme doğrusal olmayan statik hesap ile uygulanması gerekmektedir. Statik düşey yükler Denklem (5) ile hesaplanmaktadır. Doğrusal olmayan statik hesap ile bulunan iç kuvvet ve şekildeğiştirmeler yatay deprem hesabının başlangıç değerleri olarak göz önüne alınmalıdır.

$$G + nQ + 0.3E_d^{(Z)} \quad (5)$$

Burada G sabit yük etkisini, Q hareketli yük etkisini, n hareketli yük azaltma katsayısını, $E_d^{(Z)}$ ise Denklem (6) ile elde edilen düşey deprem etkisini ifade etmektedir.

$$E_d^{(Z)} = 2/3 * S_{DS} * G \quad (6)$$

TBDY 2018'e göre mevcut okul türü binaların, DD-1 deprem düzeyi için Kontrolü Hasar (KH) ve DD-3 deprem düzeyi için Sınırlı Hasar (SH) hedef performans seviyelerini sağlamaları gerekmektedir. Bu yüzden 2 farklı deprem düzeyine göre itme analizi gerçekleştirmek gereklidir. Denklem (6)'da yer alan S_{DS} katsayısı da deprem düzeyine bağlı olarak değiştiğinden Okul Model_2018 SAP 2000 dosyası Okul Model_2018_DD1 ve Okul Model_2018_DD3 olmak üzere iki farklı dosya halinde kaydedilmiştir. Okul Model_2018_DD1; DD1 deprem düzeyine göre oluşturulan SAP 2000 dosyasını, Okul Model_2018_DD3; DD-3 deprem düzeyine göre oluşturulan SAP 2000 dosyasını ifade etmektedir.

DD1 için S_{DS} değeri 1.138, DD3 için ise 0.338 olarak, Denklem (5)'de yerine koyulmuş ve itme analizlerinin başlangıç adımı her iki deprem düzeyi için elde edilmiştir. Elde edilen statik düşey yüklemeye Okul Model_2018_DD1 Sap 2000 dosyası için Denklem (7.a)'da, Okul Model_2018_DD3 Sap 2000 dosyası için ise Denklem (7.b)'de verilmiştir. İncelenen bina okul türü olduğundan Denklem (5) yer alan katsayısı 0.6 alınmıştır.

$$1.2276G + 0.6Q \quad (7.a)$$

$$1.0676G + 0.6Q \quad (7.b)$$

DBYBHY 2007 [2]'e göre yapılacak olan doğrusal olmayan statik analizde Denklem (5)'de yer alan düşey deprem etkisi dikkate alınmamaktadır. DBYBHY 2007'e göre yapılacak olan itme analizlerinin başlangıç adımı olan doğrusal olmayan statik analiz bağıntısı Denklem (8)'de verilmiştir.

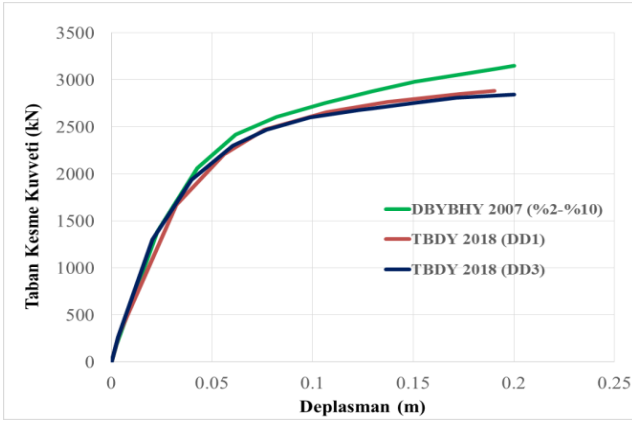
$$G + 0.6Q \quad (8)$$

Denklem (7) ve Denklem (8) ile bulunan G ve Q yüklerinin önündeki katsayılar, ilgili SAP 2000 dosyasının statik düşey yüklemesine 'Scale Factor' olarak yansıtılmıştır

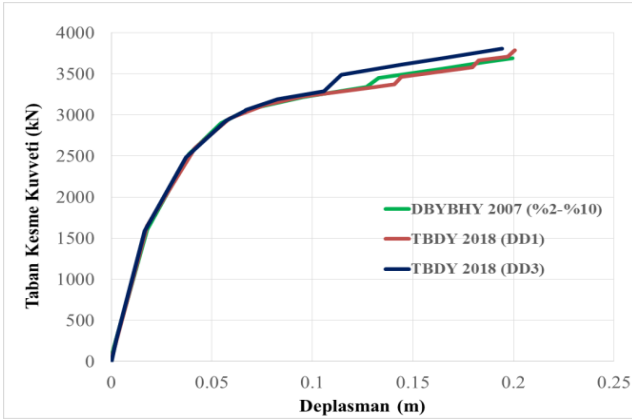
DBYBHY 2007 [2]'e göre mevcut okul türü binaların, 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan depremler için Hemen Kullanım (HK) ve 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan depremler için Can Güvenliği (CG) hedef performans seviyelerini sağlamaları gerekmektedir. Bu yüzden 2 aşılma

olasılığın göre itme analizi gerçekleştirmek gereklidir. Bunun için *Okul Model_2007 SAP 2000* dosyası 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan depremler için *Okul Model_2007_%2* olarak, 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan depremler için ise *Okul Model_2007_%10* olmak üzere iki farklı dosya halinde kaydedilmiştir.

Tüm modellerin statik itme analizi verileri tanımlandıktan sonra bu modellerin her birinin iki doğrultuda ayrı ayrı itme analizi yapılmıştır. Analizlerin sonucunda X ve Y doğrultusuna ait 6 adet kapasite eğrisi elde edilmiştir. X yönü için yapılan statik itme analizi sonucu elde edilen kapasite eğrileri Şekil 7.a'da, X yönü için yapılan statik itme analizi sonucu elde edilen kapasite eğrileri Şekil 7.b'de verilmiştir

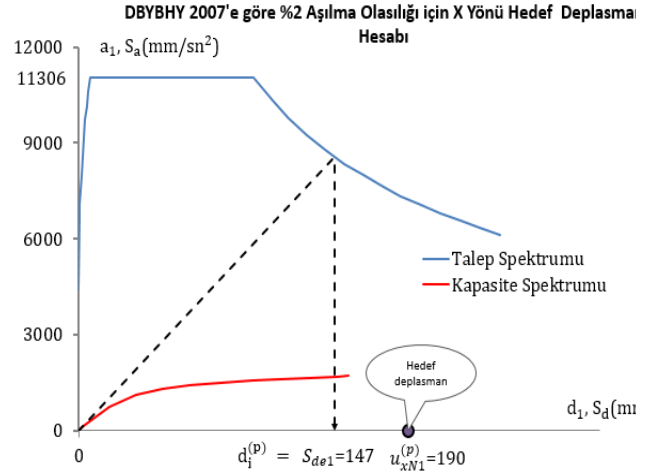


Şekil 7.a Tüm modellerin X yönü kapasite eğrileri

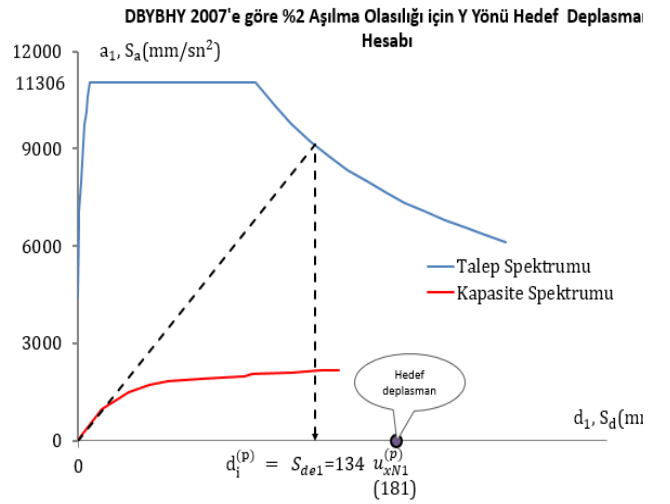


Şekil 7.b Tüm modellerin Y yönü kapasite eğrileri

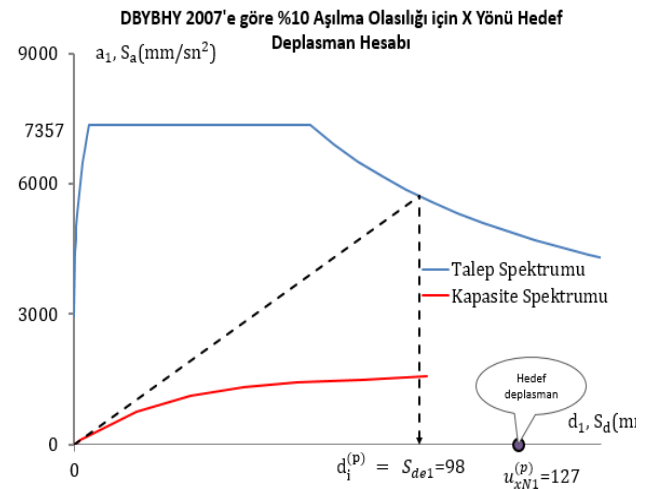
Statik itme yöntemiyle deprem performansı belirlenecek olan binaların hedef yerdeğiştirme istemi X ve Y yönü için ayrı ayrı belirlenmelidir. Her bir modelin Hedef yerdeğiştirme istemlerinin belirlenmesi için Excel formatında bir dosya oluşturulmuştur. İncelenen binanın tüm modellerinin hedef yerdeğiştirme istemlerinin belirlenmesinde kullanılan grafikler Şekil 8'de verilmiştir.



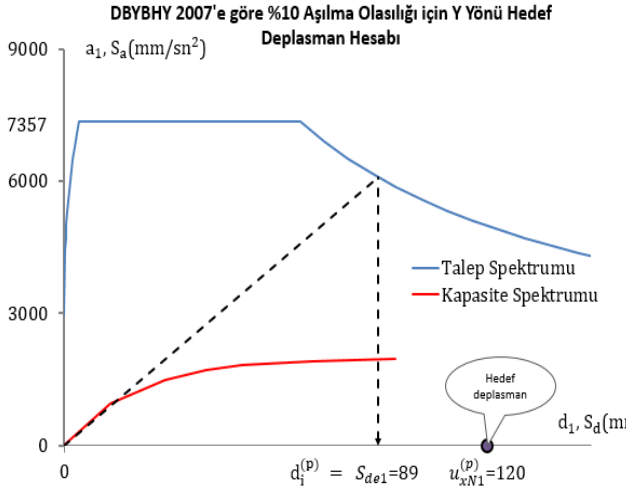
Şekil 8.a. DBYBHY 2007 [2]'e göre %2 aşılma olasılığı için X yönü hedef deplasman hesabı



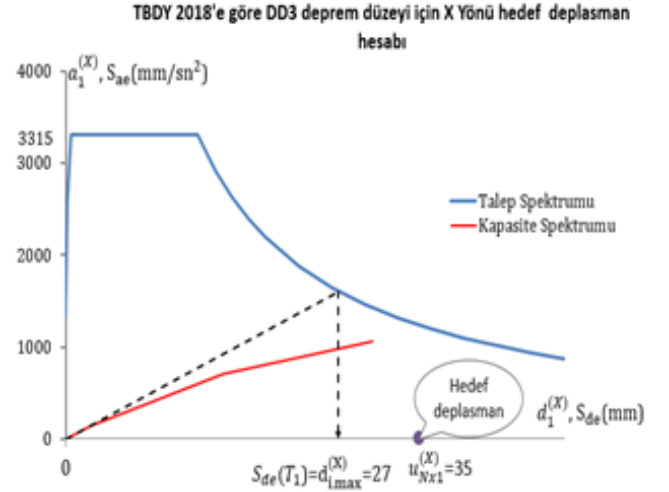
Şekil 8.b. DBYBHY 2007 [2]'e göre %2 aşılma olasılığı için Y yönü hedef deplasman hesabı



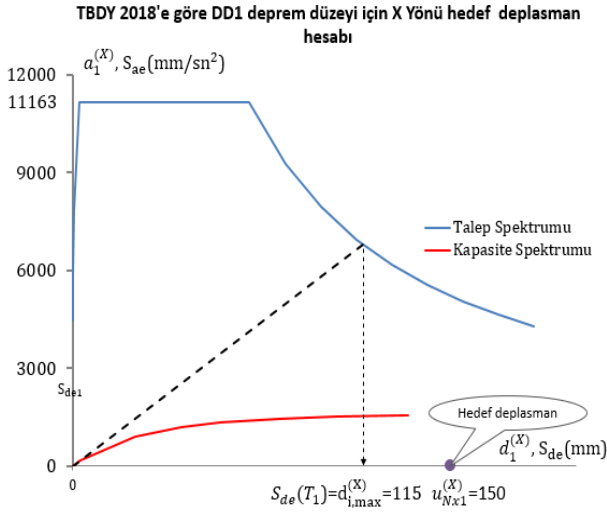
Şekil 8.c. DBYBHY 2007 [2]'e göre %10 aşılma olasılığı için X yönü hedef deplasman hesabı



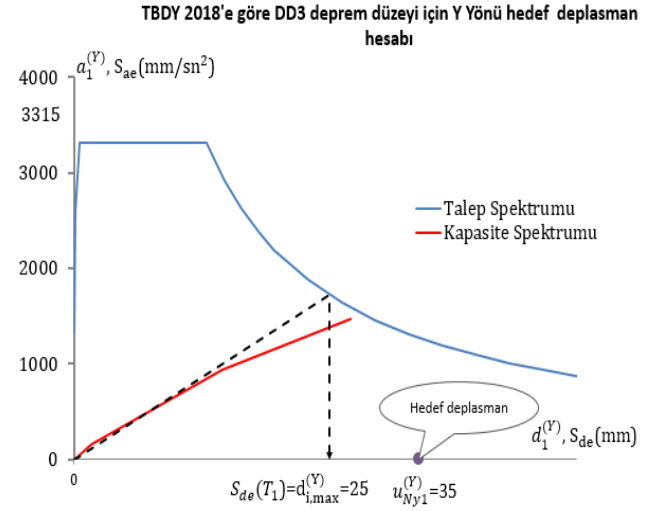
Şekil 8.d. DBYBHY 2007 [2]'e göre %10 aşılma olasılığı için Y yönü hedef deplasman hesabı



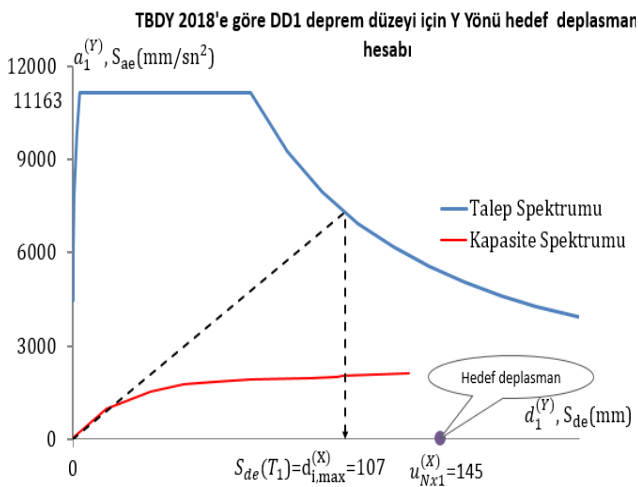
Şekil 8.h. TBDY 2018 [1]'e göre DD-3 deprem düzeyine için X Yönü Hedef Deplasman Hesabı



Şekil 8.e. TBDY 2018 [1]'e göre DD1 deprem düzeyine için X Yönü hedef deplasman hesabı



Şekil 8.i. TBDY 2018 [1]'e göre DD-3 deprem düzeyine için Y Yönü Hedef Deplasman Hesabı



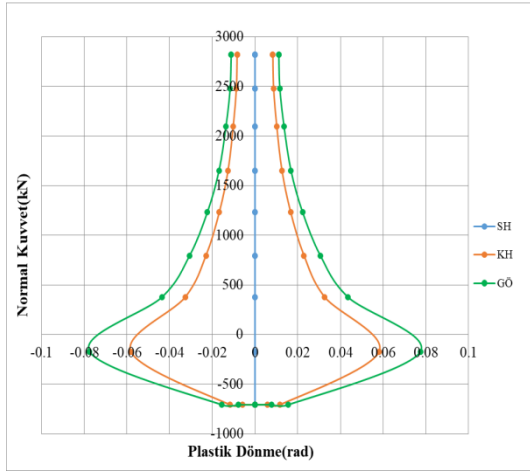
Şekil 8.f. TBDY 2018 [1]'e göre DD-1 deprem düzeyine için Y Yönü hedef deplasman hesabı

İncelenen bina, her iki deprem yönetmeliğinin iki deprem düzeyi ve iki doğrultusunun her biri için ayrı ayrı olarak yer değiştirme istemine kadar statik itme analizine tabi tutulmuştur. Deprem yönetmeliği, deprem düzeyi ve deprem doğrultusu dikkate alındığında toplamda 8 farklı statik itme analizi sonucu elde edilmiştir. Yapılan statik itme analizleri ile her bir taşıyıcı elemenda meydana gelen hasarlar belirlenmiştir.

DBYBHY 2007 [2] 'e göre yapılan çözümlerde her bir elemanın Sap 2000 [15] programından elde edilen hasarları, bina performans seviyesini belirlemek için doğrudan kullanılmıştır. TBDY 2018 [1]'e göre yapılan çözümlerde ise her bir elemanın Sap 2000 [15] programından elde edilen hasarları bina performans seviyesini belirlemek için doğrudan kullanılamamıştır. Çünkü TBDY 2018 [1] madde 15.7.1.2'ye göre eğer betonarme elemanların boyuna donatıları nervürsüz (düz) donatı çeliği ile düzenlenmişse, donatı çeliği birim şekilde değiştirme talebi ve plastik dönme talebi 1.5 ile çarpılarak artırılması gerekmektedir. İncelenen binada boyuna donatılar nervürsüz donatı çeliği olduğundan

Sap 2000 [15] programında yapılan analiz sonucu elde edilen plastik dönmeler %50 artırılmış, elde edilen artırılmış plastik dönmeler plastik dönme üst sınırları ile kıyaslanarak her bir elemanın hasarı yeniden belirlenmiştir.

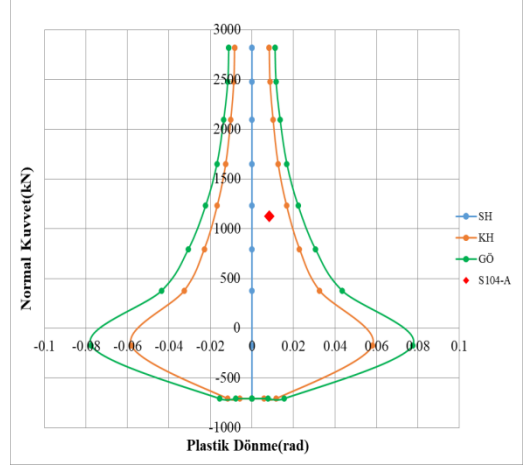
Düşey elemanların hasarı kesite etkiyen normal kuvvet değerine bağlı olarak değiştiğinden öncelikle her bir kesitin Normal kuvvet-Plastik dönme kapasitesi grafikleri oluşturulmuştur. Her bir düşey eleman kesitinin Normal kuvvet-Plastik dönme kapasitesi grafikleri için Section Designer’de yapılan moment eğrilik analizlerinden faydalanmıştır. Örnek olması için S104 kolonunun excel dosyasında hazırlanan Normal kuvvet-Plastik dönme grafiği Şekil 9’da verilmiştir. Grafikte; en içteki Y eksenı boyunca devam eden mavi eğri SH sınırını, ortadaki turuncu eğri KH sınırını ve en dıştaki yeşil eğri GÖ hasar sınırını, göstermektedir.



Şekil 9. S104 kolon kesitinin normal kuvvet-plastik dönme grafiği

Yapılan analiz sonucu düşey elemanlarda meydana gelen plastik dönmeler 1.5 ile çarpılmış, her bir kesit için elde edilen bu artırılmış plastik dönme ile normal kuvvet çifti ilgili kesitin normal kuvvet - plastik dönme grafiği üzerinde gösterilmiştir. Eğri üzerindeki hasar sınır eğrilikleri dikkate

alınarak ilgili kesitin hasarı belirlenmiştir. Bu işlem kolonların alt ve üst uç kesitleri için perde duvarların ise alt uç kesitleri için yapılmıştır. S104 kolonunun alt ucunun, DD1 deprem düzeyine bağlı olarak X hesap doğrultusu için belirlenen hasarı Şekil 10’da verilmiştir.

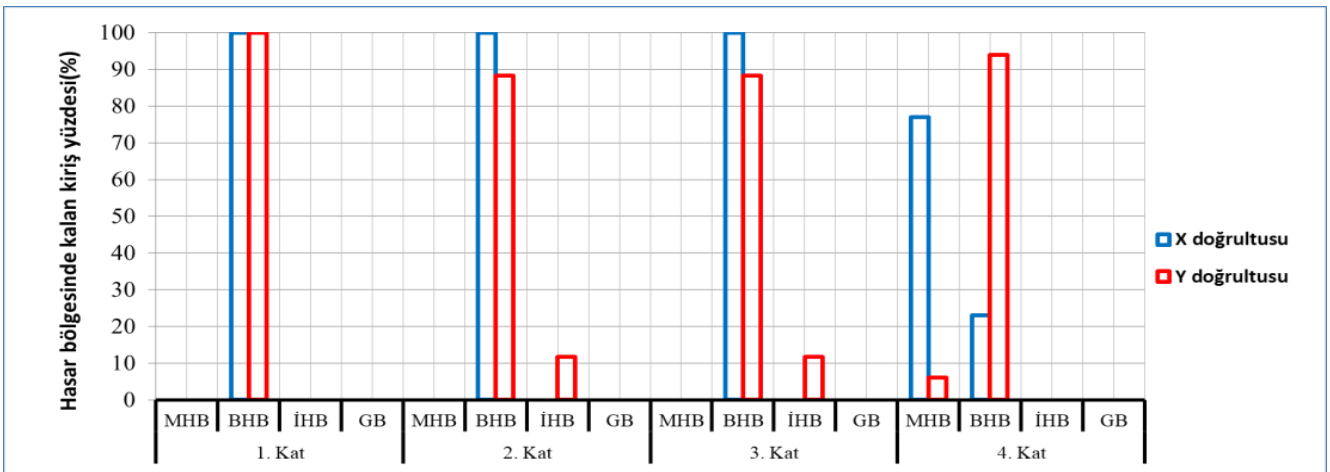


Şekil 10. S104 kolon kesitinin hasar durumunun belirlenmesi

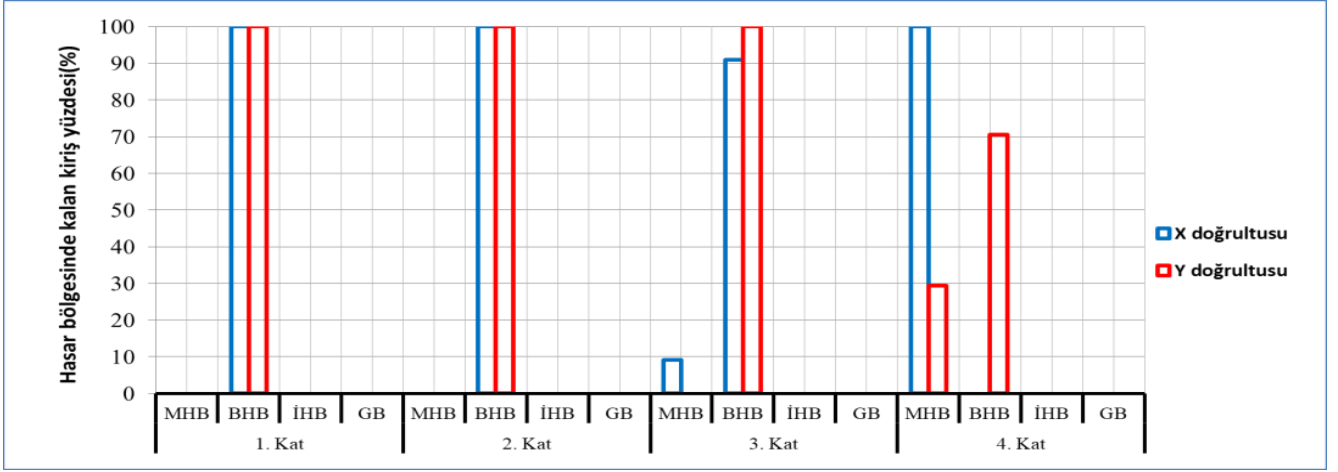
Şekil 10 incelendiğinde S104 kolonunun alt ucu SH ile KH arasında kalmaktadır. Bu durumda bu kolonun alt ucu belirgin hasar bölgesinde kalmaktadır. Kolonun üst ucunda plastik dönme meydana gelmediğinden grafik üzerinde gösterilmemiştir.

Kiriş kesitlerine normal kuvvet etki etmediği kabul edildiğinden bu kesitler için normal kuvvet-plastik dönme grafiklerini kullanmaya gerek kalmamıştır. Analiz sonucu elde edilen plastik dönmeler %50 artırılmış, elde edilen artırılmış plastik dönmeler ile plastik dönme hasar sınır değerleri kıyaslanarak kiriş kesitlerinin hasarları tespit edilmiştir.

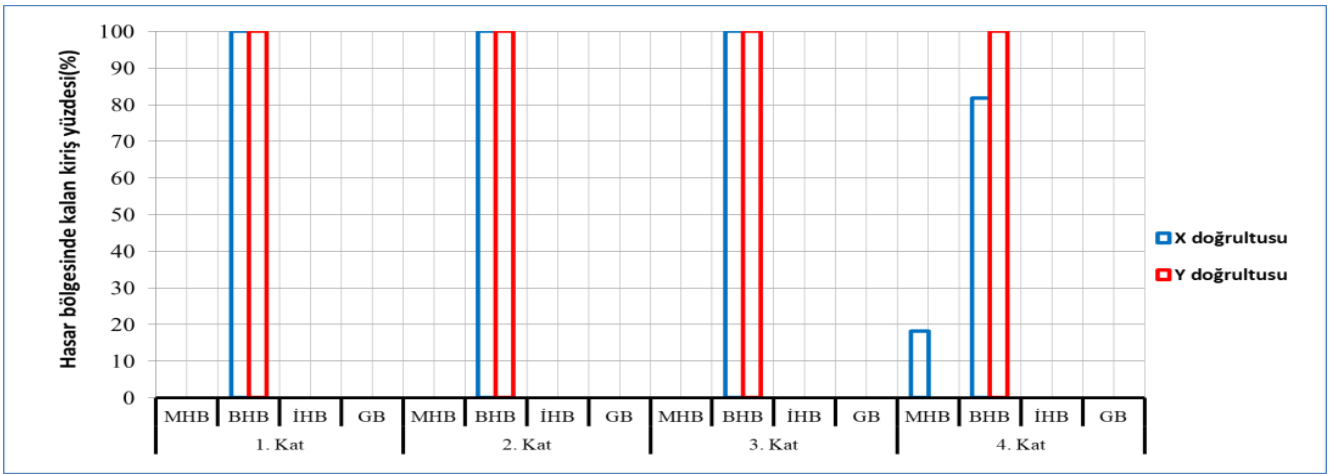
Kiriş kesitlerinin deprem yönetmeliği, deprem düzeyi ve deprem doğrultusuna bağlı olarak belirlenen hasar bölgeleri Şekil 11’de verilmiştir



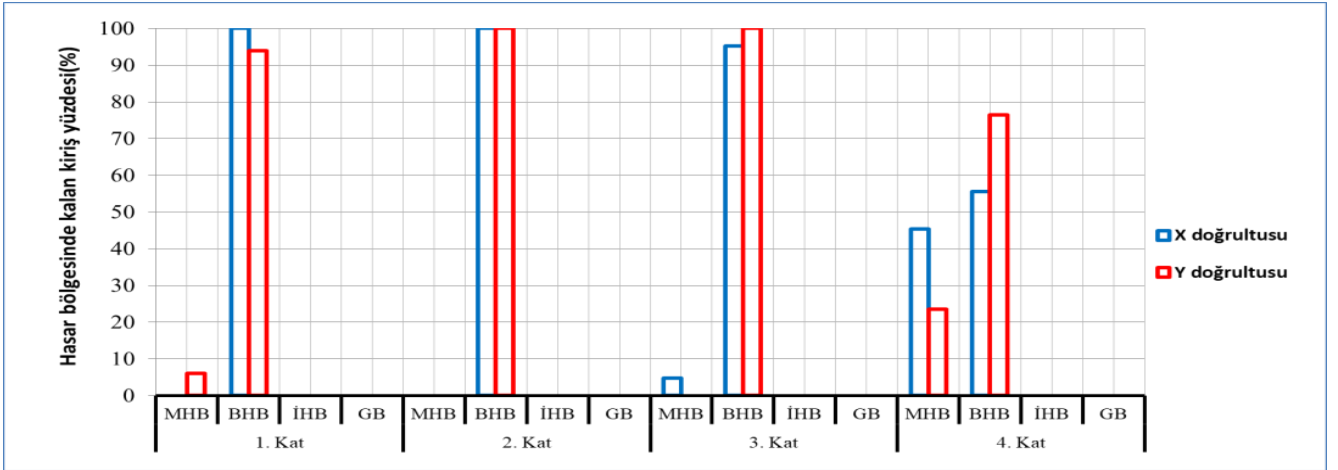
Şekil 11.a. DBYBHY 2007 [2]'e göre %2 aşılma olasılığı için elde edilen kiriş hasar bölgeleri



Şekil 11.b. DBYBHY 2007 [2]'e göre %2 aşılma olasılığı için elde edilen kiriş hasar bölgeleri



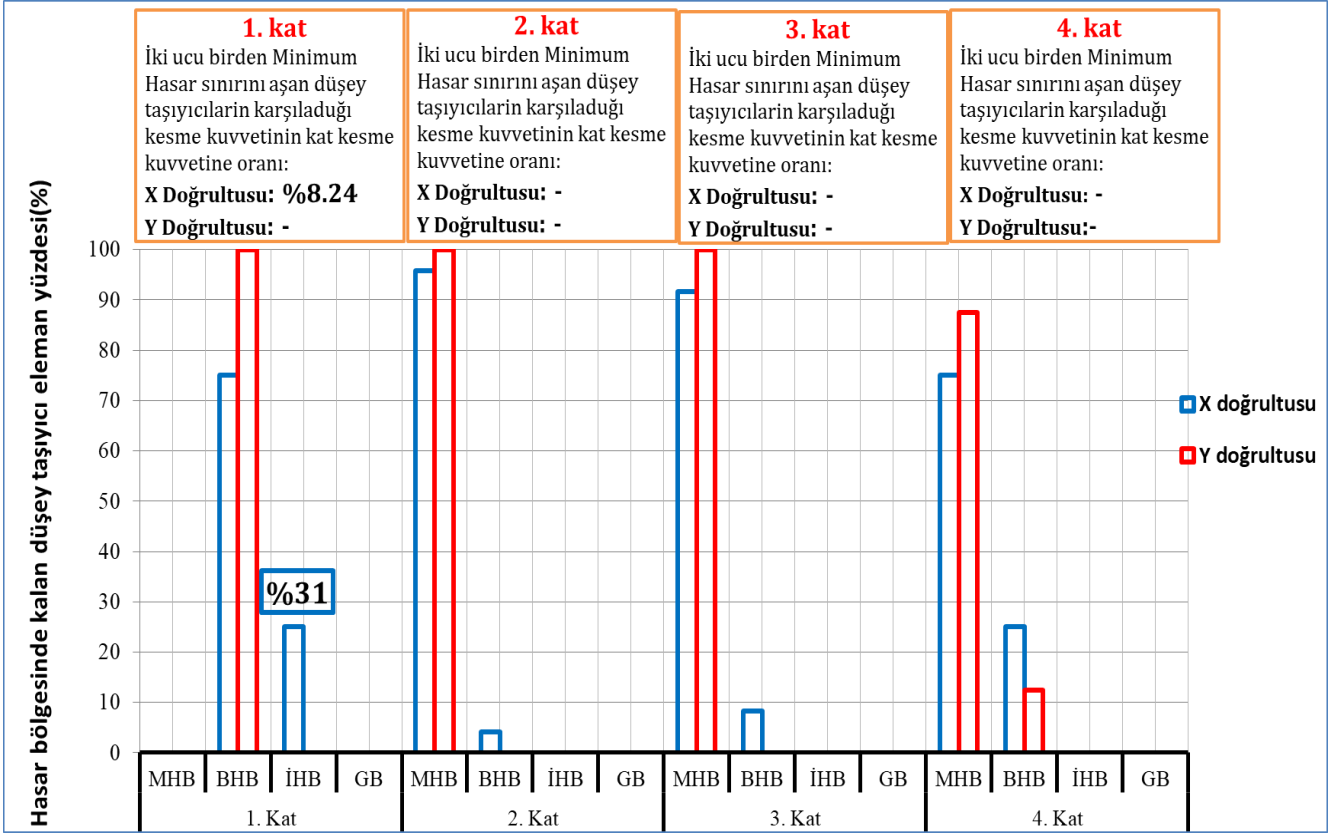
Şekil 11.c. TBDY 2018 [1]'e göre DD-1 için elde edilen kiriş hasar bölgeleri



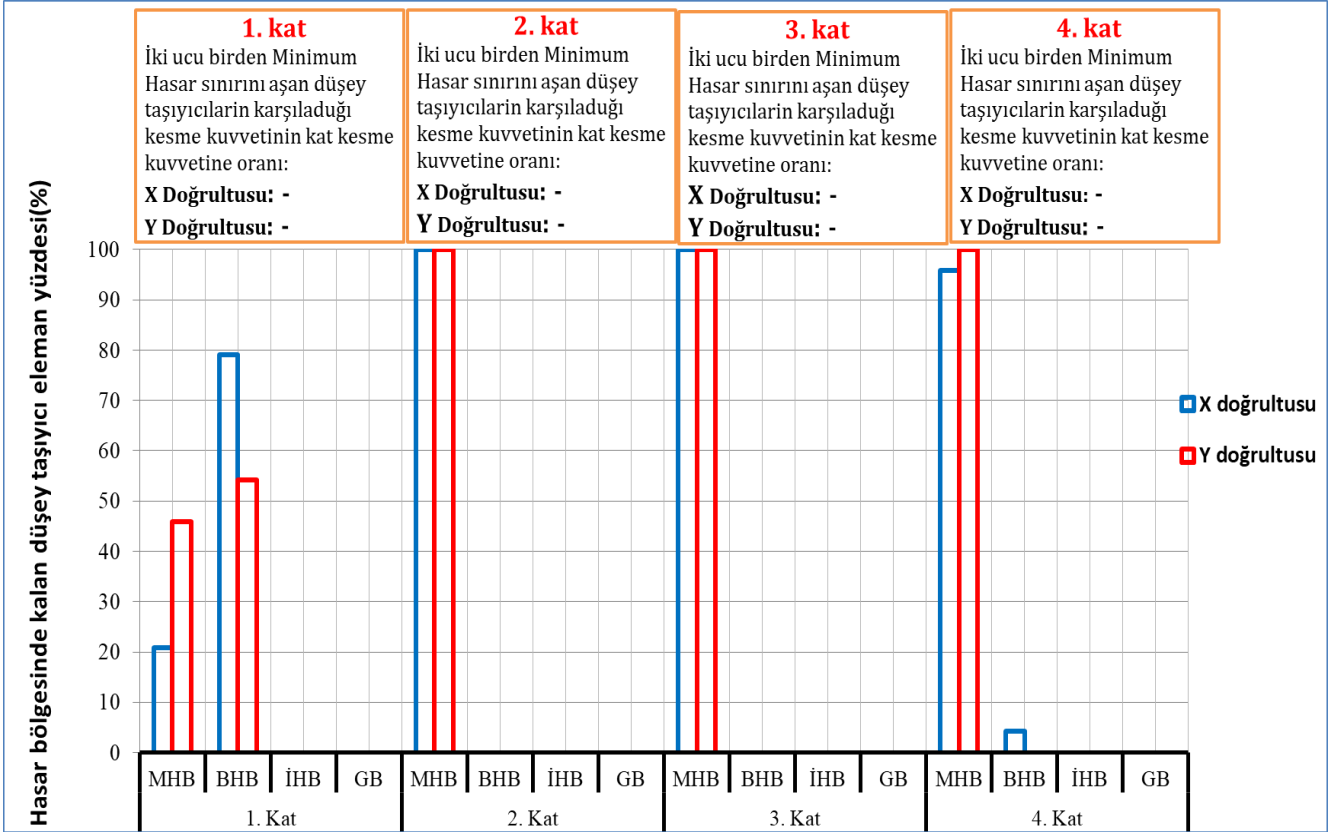
Şekil 11.d. TBDY 2018 [1]'e göre DD-3 için elde edilen kiriş hasar bölgeleri

Kolon ve perde duvar kesitlerinin deprem yönetmeliği, deprem düzeyi ve deprem doğrultusuna bağlı olarak belirlenen hasar bölgeleri Şekil 12'de verilmiştir. Bina performans seviyesinin belirlenmesi için İleri Hasar Bölgesi (İHB)'nde kalan düşey taşıyıcı elemanların taşıdığı kesme kuvvetinin kat kesme kuvvetine oranının belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 12'de sütunların üzerinde yazan yüzdeler, İleri hasar bölgesinde kalan düşey taşıyıcı

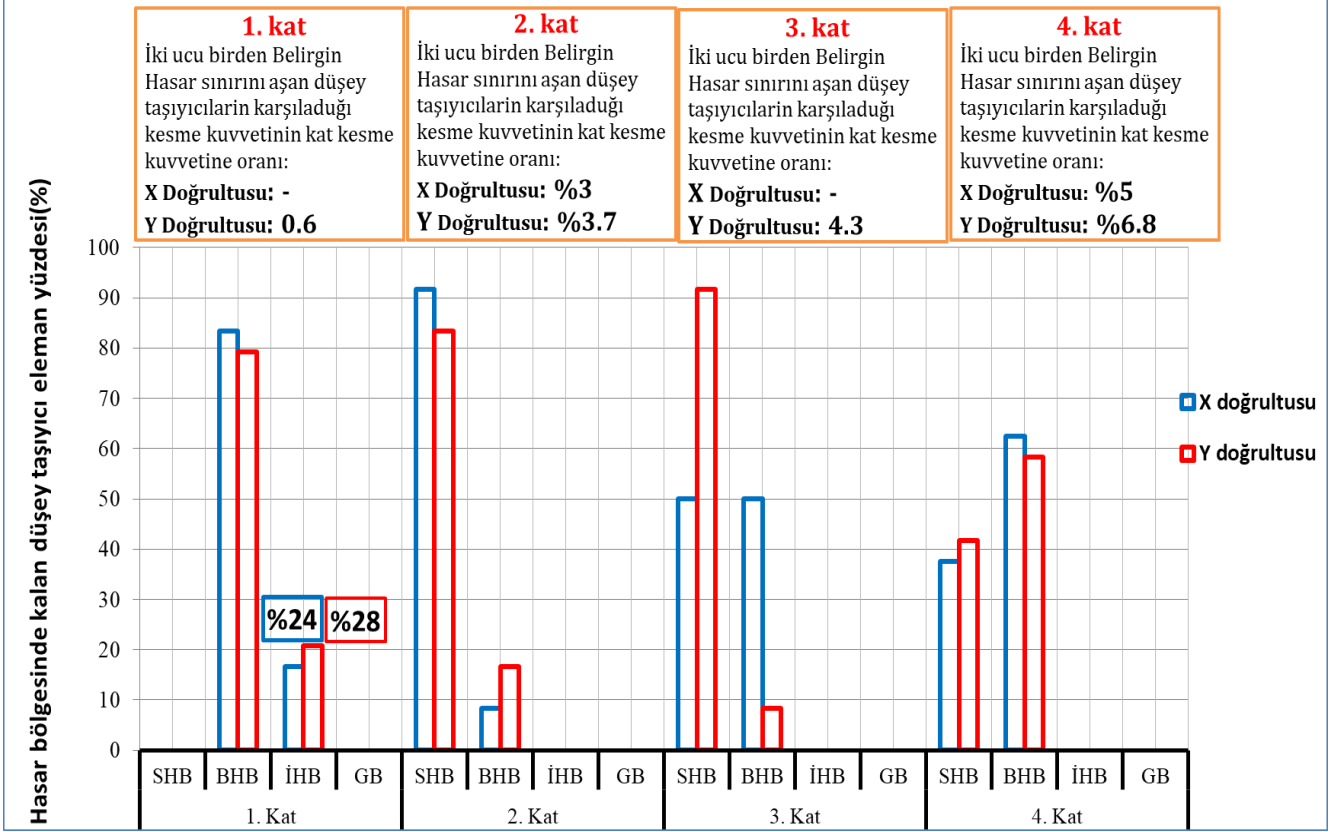
elemanların taşıdığı kesme kuvvetinin kat kesme kuvvetine oranını göstermektedir. Örneğin Şekil 12.a'ya bakıldığında, 1. Katta, X hesap doğrultusunda, Minimum Hasar Bölgesi (MHB) ve Göçme Bölgesi (GB)'nde kalan düşey taşıyıcı eleman olmadığı ve İleri Hasar Bölgesinde kalan düşey elemanların, 1. kattaki düşey elemanlar tarafından taşınan kesme kuvvetine toplam kat kesme kuvvetine oranının % 31 olduğunu göstermektedir.



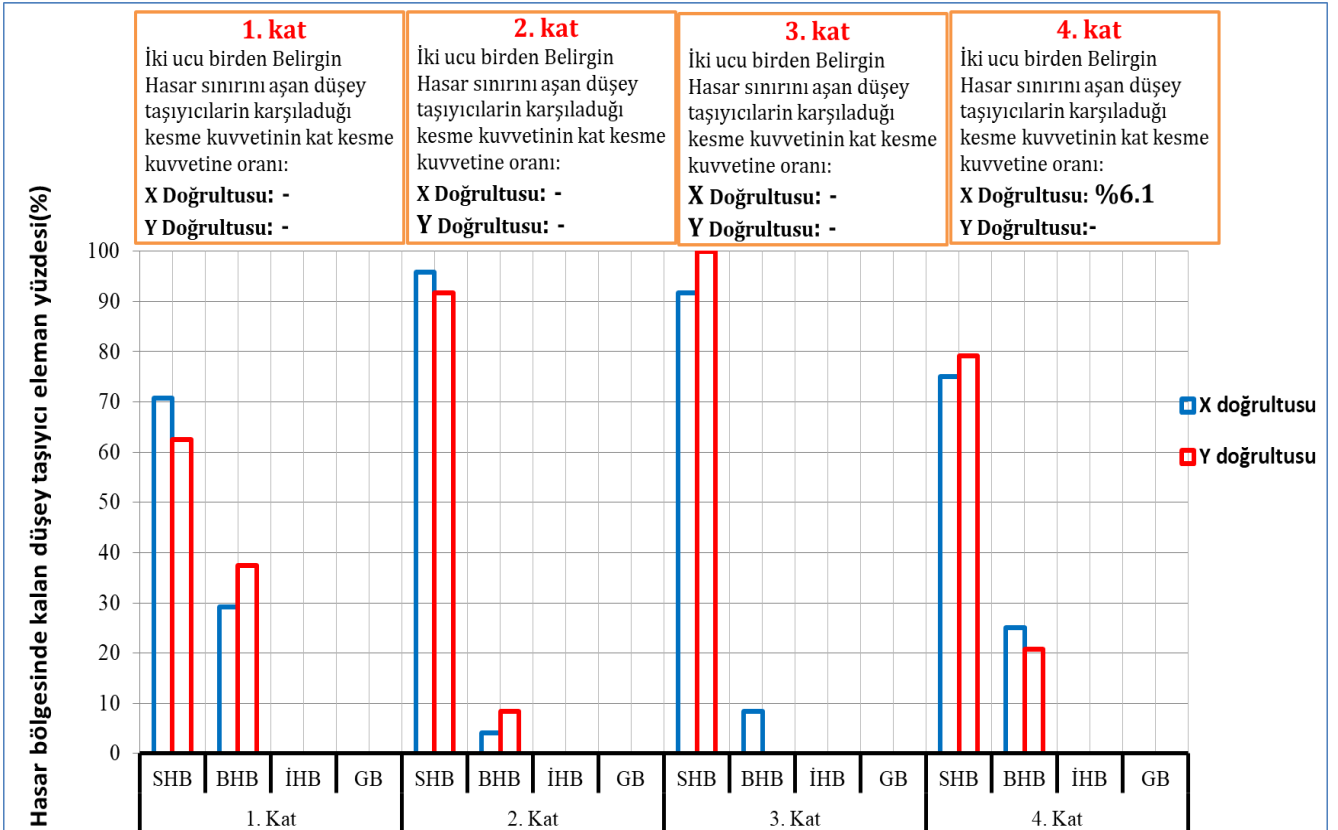
Şekil 12.a. DBYBHY 2007 [2]'e göre %2 aşılma olasılığı için elde edilen düşey eleman hasar verileri



Şekil 12.b. DBYBHY 2007 [2]'e göre %10 aşılma olasılığı için elde edilen düşey eleman hasar verileri



Şekil 12.c. TBDY 2018 [1]'e göre DD-1 için elde edilen düşey taşıyıcı eleman hasar verileri



Şekil 12.d. TBDY 2018 [1]'e göre DD-3 için elde edilen düşey taşıyıcı eleman hasar verileri

Şekil 12 ve Şekil 13 verileri Tablo 3 ve Tablo 4'te verilen koşullar ile kıyaslanmıştır. Böylece deprem yönetmeliği ve deprem düzeyine bağlı olarak performans seviyeleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 5-8'de verilmiştir.

Tablo 5. DBYBHY 2007 [2]'e göre aşılma olasılığı %2 olan depremler için elde edilen performans seviyeleri

Kat	Kat performans seviyesi		Doğrultu performans seviyesi		Bina performans seviyesi
	X yönü	Y yönü	X yönü	Y yönü	
1	GÖ	CG	GÖ	CG	GÖ
2	CG	CG			
3	CG	CG			
4	CG	CG			

Tablo 6. DBYBHY 2007 [2]'e göre aşılma olasılığı %10 olan depremler için elde edilen performans seviyeleri

Kat	Kat performans seviyesi		Doğrultu performans seviyesi		Bina performans seviyesi
	X yönü	Y yönü	X yönü	Y yönü	
1	CG	CG	CG	CG	CG
2	CG	CG			
3	CG	CG			
4	HK	CG			

Tablo 7. TBDY 2018 [1]'e göre DD-1 için elde edilen performans seviyeleri

Kat	Kat performans seviyesi		Doğrultu performans seviyesi		Bina performans seviyesi
	X yönü	Y yönü	X yönü	Y yönü	
1	GÖ	GÖ	GÖ	GÖ	GÖ
2	KH	KH			
3	KH	KH			
4	KH	KH			

Tablo 8. TBDY 2018 [1]'e göre DD-3 için elde edilen performans seviyeleri

Kat	Kat performans seviyesi		Doğrultu performans seviyesi		Bina performans seviyesi
	X yönü	Y yönü	X yönü	Y yönü	
1	KH	KH	KH	KH	KH
2	KH	KH			
3	KH	KH			
4	KH	KH			

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, boyuna donatıları nervürsüz (düz) donatı çeliği ile düzenlenmiş mevcut okul türü bir binanın DBYBHY 2007 [2] ve TBDY 2018 [1] deprem yönetmeliklerinin her ikisine göre de deprem performansları belirlenmiş, Elde edilen bu sonuçlar kıyaslanmıştır. Yapılan performans değerlendirmelerinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- 1) Binanın DBYBHY 2007 [2]'e göre performans değerlendirmesinde;
 - a) DBYBHY 2007 [2]'e göre mevcut okul türü bir binanın aşılma olasılığı %2 olan depremler için hedef performans seviyesi Can Güvenliği (CG)'dir. Tablo 9'dan da görüldüğü üzere aşılma

olasılığı %2 olan depremler için binanın X Doğrultusu performans seviyesi Göçme Öncesi (GÖ), Y Doğrultusu performans seviyesi Can Güvenliği (CG) olarak elde edilmiştir. Dolayısı ile Y doğrultusu hedef performans seviyesini sağlıyor iken X doğrultusu hedef performans seviyesini sağlayamamaktadır. Binanın X doğrultusu 1. Kattaki kolon hasarlarından dolayı performans seviyesini sağlayamamaktadır.

- b) DBYBHY 2007 [2]'e göre mevcut okul türü bir binanın aşılma olasılığı %10 olan depremler için hedef performans seviyesi Hemen Kullanım (HK)'dir. Tablo 10'dan da görüldüğü üzere aşılma olasılığı %10 olan depremler için binanın X ve Y doğrultularının performans seviyesi Can Güvenliği (CG) olarak elde edilmiştir. Dolayısı ile X ve Y doğrultularının her ikisinde hedef performans seviyesini sağlayamamaktadır.
- 2) Binanın TBDY 2018 [1]'e göre performans değerlendirmesinde;
 - a) TBDY 2018 [1]'e göre mevcut okul türü bir binanın aşılma olasılığı %2 olan depremler (DD-1) için hedef performans seviyesi Kontrollü Hasar (KH)'dir. Tablo 11'den de görüldüğü üzere aşılma olasılığı %2 olan depremler için binanın X ve Y doğrultularının performans seviyesi Göçmenin Önlenmesi (GÖ) olarak elde edilmiştir. Dolayısı ile X ve Y doğrultularının her ikisinde hedef performans seviyesini sağlayamamaktadır. Binanın X ve Y doğrultularının ikisinde 1. kattaki kolon hasarlarından dolayı performans seviyesini sağlayamamaktadır.
 - b) TBDY 2018 [1]'e göre mevcut okul türü bir binanın DD-3 deprem düzeyi için hedef performans seviyesi Sınırlı Hasar (SH)'dir. Tablo 12'dan da görüldüğü üzere DD-3 deprem düzeyi için binanın X ve Y Doğrultularının performans seviyesi Kontrollü Hasar (KH) olarak elde edilmiştir. Dolayısı ile X ve Y doğrultularının her ikisinde hedef performans seviyesini sağlayamamaktadır.
- 3) İki yönetmeliğin performans sonuçları kıyaslandığında yönetmelikler arasındaki uyumsuzluğun 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan depremler için olduğu görülmektedir. 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan depremler için binanın Y doğrultusu DBYBHY 2007 [2]'e göre hedef performans seviyesini sağlıyor iken, TBDY 2018 [1]'e göre hedef performans seviyesini sağlayamamaktadır.
- 4) Her iki aşılma olasılığı ve iki doğrultunun en elverişsiz olanı dikkate alındığında bina her iki yönetmeliğe göre de hedef performans seviyesini sağlamamıştır.
- 5) DBYBHY 2007 [2]'e göre yapılan çözümlerde 50 yılda aşılma olasılığı %2 olan depremler için X doğrultusunun hedef yerdeğiştirme istemi 190 mm, Y doğrultusunun hedef yerdeğiştirme istemi 181 mm olarak elde edilmiştir. TBDY 2018'e göre yapılan çözümlerde

ise aynı deprem düzeyi için X doğrultusunun hedef yerdeğiştirme istemi 127 mm, Y doğrultusunun hedef yerdeğiştirme istemi 120 mm olarak elde edilmiştir. Buradan anlaşılacağı üzere binanın 2018 deprem yönetmeliğine göre elde edilen hedef yerdeğiştirme istemleri, 2007 deprem yönetmeliğine göre elde edilen değerden yaklaşık %32 daha küçük çıkmıştır.

- 6) Bu çalışmada; donatı sınıfı S220, beton sınıfı C14 ve yeterli enine donatıya sahip olmayan mevcut okul türü bir binanın 2007 ve 2018 deprem yönetmeliklerine göre deprem performans sonuçları kıyaslanmıştır. İlerleyen çalışmalarda, boyuna donatıları nervürlü donatı çeliği ile düzenlenmiş, beton sınıfı daha yüksek, yeterli enine donatıya sahip olan ve kullanım amacı okul dışı olan binalar türleri için de benzer çalışmaların yapılması iki yönetmeliğin deprem performansı değerlendirilmesi açısından kıyaslanması için faydalı olacağı düşünülmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 19

Kaynaklar

- [1] TBDY, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, 2018.
- [2] DBYBHY, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, T. C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara, 2007.
- [3] H. Karaca, S. P. Oral, M. Erbil, Yapısal tasarım bağlamında 2007 ve 2019 deprem yönetmeliklerinin karşılaştırılması, Niğde örneği. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9(2) , 898-903, 2020. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.667365>
- [4] M. H. Severcan, B. Sınanı, Mevcut betonarme yapıların deprem performansının analizi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8(2), 936-947, 2019. <https://10.28948/ngumuh.598151>
- [5] EUROCODE 8, Design of Structures for Earthquake Resistance Part 3: Assessment and Retrofitting of Buildings, Doc. CEN/TC250/SC8/N388B. Comité Européen de Normalisation, Bruxelles, 2004.
- [6] H. Ulutaş, DBYBHY (2007) ve TBDY (2018) deprem yönetmeliklerinin kesit hasar sınırları açısından kıyaslanması. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (17), 351-359, 2019. <https://10.31590/ejosat.620827>
- [7] İ. Ünsal, F. A. Öncel, TDY 2007 ve TBDY 2018 yönetmeliklerine göre yapı yüksekliğinin taban kesme kuvveti ve tepe deplasmanı üzerindeki etkisinin incelenmesi. Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8(4), 930-942, 2020. <https://10.36306/konjes.752139>
- [8] İ. Dalyan, B. Şahin, Mevcut Betonarme Bir Binanın 2007 ve 2018 Deprem Yönetmeliklerine Göre Deprem Yükleri Altındaki Taşıyıcı Sistem Performansının Değerlendirilmesi. Türk Deprem Araştırma Dergisi, 1 (2), 134-147, 2019.
- [9] O. Sarı, Mevcut konut türü bir binanın DBYBHY–2007 ve TBDY–2018 deprem yönetmeliklerine göre deprem performansının değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2020.
- [10] U. Ayaz, Mevcut bir betonarme binanın 2007 ve 2018 Türkiye bina deprem yönetmeliklerine göre deprem performansının değerlendirilmesi ve güçlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2020.
- [11] O. Eldemir, DBYBHY-2007 ve TBDY-2018 yönetmeliklerinin mevcut yapıların sismik davranış özellikleri açısından karşılaştırılması. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2019
- [12] Ö. F. Nemitlu, 2007-2018 Türk deprem yönetmeliklerinin ve Amerikan deprem yönetmeliğinin deprem hesapları açısından karşılaştırılması. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2019
- [13] ASCE 7-16, American Society of Civil Engineers, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, , 2017.
- [14] H. Elçi, K. A. Goker, Deprem yönetmeliklerinin (DBYBHY 2007 ve TBDY 2018) betonarme kolonların deprem performansı açısından karşılaştırılması. International Journal of Scientific and Technological Research, 4(6), 9-21, 2018.
- [15] SAP2000 V.21, Computers and Structures, Inc., <http://www.csiberkeley.com>, 1995 University Avenue Berkeley, California 94704 USA., 1978-2020.





İnşaat sektöründe oluşan iş değişikliği taleplerini azaltacak bir proje yönetim sistemi önerisi

A project management system proposal to reduce change orders in the construction industry

Betül Temel¹ , Gürkan Emre Gürcanlı² , Senem Bilir Mahçiçek^{3,*} 

^{1,2,3} İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34469 İstanbul/TÜRKİYE

Özet

Hızlı artan nüfus, sosyo-kültürel ihtiyaçların değişimi, ekonomideki gelişim ve değişim inşaat sektörünün önemini zamanla arttırmıştır. Böylelikle, projelerin istenilen süre, kalite ve maliyette başarıyla gerçekleştirilmesini zorlaşmış; işinde tecrübeli, projeyi yönetebilecek kabiliyette proje yönetim firmalarının proje sürecine katılmalarını gerekli kılmıştır. Proje yönetim firmalarının projeyi yönetirken en çok karşılaştıkları sorun ise proje boyunca sıklıkla oluşan iş değişikliği talepleridir. Bu sebeple, sistematik bir iş değişikliği yönetimi ve iş değişikliğini azaltacak bir proje yönetim sistemi, projenin başarısı açısından hayati öneme sahip olmaktadır. Bu çalışmada, değişiklik taleplerine duyarlı, çeşitli sorunlar nedeniyle ortaya çıkan hak taleplerini azaltacak bir proje yönetim sistemi önerisi sunulmuştur. Bu sistem hazırlanırken proje yönetim firmalarının bir projenin başından sonuna kadar yapması gereken işler, literatür ve örnek projeler üzerinden belirlenmiş, tablolar halinde sunulmuştur. Ardından, proje yönetim sistemlerinde revizyonlar yapılarak iş emri değişikliklerinin proje üzerindeki negatif risklerinin düşürülmesi ve iş değişikliklerinin azaltılması hedeflemiştir. Sunulan sistem önerisinden proje yönetimi alanında çalışan tüm proje taraflarının faydalanacaklarına inanılmaktadır.

Anahtar kelimeler: Proje yönetim firması, Proje yönetim süreçleri, Hak talepleri, Verimlilik

1 Giriş

İnşaatlar, insanlığın var oluşundan beri temel yaşam gereksinimlerin bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Daha sonrasında ise ilerleyen endüstriyel devrimler ile başta fabrikalar, ulaştırma yapıları, eğitim ve sağlık ihtiyaçlarını karşılayacak yapılar olmak üzere çeşitli inşaat projelerine ihtiyaç duyulmuştur. İnşaat sektörü ülkemizde de lokomotif sektör özelliği göstermektedir. Doğrudan veya dolaylı olarak 200'ün üstünde farklı sektörlere istihdam sağlayarak ve katma değer yaratarak "ekonominin kaldırıcısı" olma özelliğini de taşımakta [1], öte yandan inişli çıkışlı özelliği dolayısıyla ekonomideki kırılganlığı da beslemektedir. İnşaat sektörünün belirsiz parametrelerden etkilenmesi ve

Abstract

The rapidly increasing population, change of social-cultural needs, development and change in economy have increased importance of construction industry over time. Furthermore, more complicated projects have begun to be constructed and to realize them successfully in desired time, quality and cost has become difficult. These require involvement of experienced project management companies. Conversely, the most common problem faced by project management companies while managing projects is change order requests. Thus, a systematic change order management and a project management system that reduce change orders is vital. In this study, a change order sensitive project management system for change order requests was established in order to reduce claims arising due to various problems in construction projects. For preparation of this system, steps should be performed by project management companies from the beginning to the end of construction projects were determined through literature review and a case study. Results were presented in tabular form. Afterwards, by making revisions in examined project management system and its process flow, it was aimed to reduce change orders and their negative effects on projects. It is believed that all parties in construction projects will benefit from presented system and recommended flowchart.

Keywords: Project management company, Project management processes, Claims, Productivity

ekonomiye karşı olan hassasiyeti, sektöre karşı olan güveni giderek azaltsa da inşaat sektörüne yapılan yatırımların hacmi, büyüklüğü ve karmaşıklığı her geçen gün artmaktadır. Bu sebeple mal sahibi ve yatırımcılar güvensiz ve riskli bir alanda kendilerine daha güvenli bir ortam yaratmak için büyük ve karmaşık yapıdaki yatırımlarında oluşabilecek riskleri öngörebilecek, bu riskleri yönetebilecek, gerektiğinde önleyebilecek veya azaltabilecek, özetle projelerinde hedefledikleri zaman, kalite ve bütçeyi yakalayabilecek sektöre hâkim profesyonellere ihtiyaç duymaktadırlar. Diğer bir değişle farklı iş ortaklarının tek bir şantiyede birlikte üretim yapmak zorunda olduğu inşaat sektöründe projelerin etkin bir şekilde

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: sbilir@itu.edu.tr (S. Bilir Mahçiçek)

Geliş / Received: 22.03.2021 Kabul / Accepted: 26.04.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.901239

yönetimi çok önemlidir [2]. Bu problemler de proje yönetim firmalarının inşaat projeleri sürecine katılmalarını kaçınılmaz bir hale getirmiştir.

İnşaat sürecinin her evresinde yaşanması muhtemel bu iş değişikliklerinin proje sürecinde meydana gelmesi, projenin performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu sebeple, sistematik bir iş değişikliği yönetimi ve iş değişikliğini azaltacak bir proje yönetim sistemi, projenin başarısı açısından büyük bir öneme sahiptir. Bu çalışmada inşaat projelerinde görev alan proje yönetim firmalarının yapması gereken görevler literatürde çalışması ile incelenmiş ve örnek proje üzerinden genişletilerek sunulmuştur. Ayrıca, proje boyunca oluşan iş değişikliği taleplerinin azaltılmasına yönelik bir proje yönetim sistemi önerisi hazırlanmıştır. Önerilen proje yönetim sisteminin hem proje yönetim firmalarına hem de profesyonel bir proje yönetim firması ile çalışma imkânı bulunmayan firma ve proje yöneticilerine iş değişikliklerini azaltabilmek için yol gösterici olacağı düşünülmektedir.

2 Literatür araştırması

Proje yönetim firmalarının en çok karşılaştıkları sorunların başında proje boyunca çok sık oluşan iş değişikliği talepleri gelmektedir. İnşaat proje yönetimi kaynaklarında "Change Order" veya uluslararası FIDIC sözleşmelerinde "Variation Order" olarak tanımlanan ve özel bir yer ayrılan değişiklik taleplerinin hacmi, bazen neredeyse bir toplam proje maliyetinin %8'ine kadarına ulaşmaktadır [3]. Thomas ve arkadaşları [4] çalışmalarında iş değişikliklerinin projenin yaşam döngüsünün her aşamasında kaçınılmaz olduğunu vurgulamışlardır. Saiti ve diğerleri [5] inşaat projelerinde karşılaşılan iş değişikliklerini, projenin tipi, büyüklüğü, yapılış amacı ne olursa olsun inşaatın her evresinde ortaya çıkabilen ve tüm inşaat projelerinin maruz kaldığı kaçınılmazı mümkün olmayan ortak bir konu olarak tanımlamışlardır.

Özellikle son otuz yıldır yoğunlaşan çalışmalar, inşaat projelerinde yaşanan iş değişikliklerini ve iş değişiklik taleplerini azaltmaya yönelmektedir. Arain [6], iş değişikliklerini azaltmaya yönelik yaptığı çalışmada projenin daha tasarım aşamasında devreye alınmasının projedeki verimliliği arttıracığını, iş değişikliklerini azaltacağı, ayrıca profesyonellerin daha bilinçli ve efektif karar vermelerini sağlayacağını belirtmiştir. Motava ve diğerleri [7], inşaat sektöründeki projelerde tasarım aşamasında yaşanan potansiyel, olası iş değişikliklerini öngörebilen ve meydana gelmeden önce proje paydaşlarının çözüm üretebilmesine fırsat yaratan bir sistem modeli üzerinde çalıştılar. Isaac ve Navon [8] çalışmalarında, inşaat sektöründe yaşanan bu değişikliklerin kontrolü için müşterinin istekleri ve ihtiyaçları ile yapının tasarımı arasında bağlantılar oluşturan araçlar önerdiler. Motava ve diğerleri [7] çalışmalarında, iş değişikliklerinin tahmini ve değişiklik yönetimi için bulanık mantıkla ve değişiklik tahmin modeli ile birleştirilmiş proaktif ölçümler önermişlerdir. Bir diğer çalışma Ssegawa ve diğerleri [9] tarafından Botsvana'daki inşaat projelerinde yaşanan değişikliklerinin oluşma sıklığını, sebeplerini, her değişiklik çeşidine göre iş değişikliği sebeplerini yaratan proje

taraflarını ve iş değişikliklerinin yarattığı etkileri araştırmak için yürütülmüştür. Memon ve diğerleri [10] yılında Malezya'daki inşaat projelerinde değişikliklerin oluşmasında etkili en önemli sebeplerin ne olduğunu ve iş değişikliklerinin proje üzerinde yarattığı etkileri bulmayı hedefleyen araştırma çalışması yapmışlardır. Literatürde iş değişikliği taleplerinin nedenlerini ve çeşitlerini araştıran farklı birçok çalışma bulunmaktadır [11-15]. Şimdiye kadar sunulan çalışmalarda inşaat projelerinde yaşanan süre uzamalarının sebeplerinin iş değişiklik taleplerinin sebepleri ile benzerlik gösterdiği görülmektedir. Projelerdeki süre uzamalarının, iş değişikliği taleplerinin bir sonucu olduğunu söylemek yanlış olmayacaktır.

İş emri değişikliğinin ortaya çıkmasını minimize etmeye çalışmak kadar, ortaya çıkması durumunda proje üzerindeki negatif etkilerini azaltabilmek için hak talebi sürecinin başarılı bir şekilde yönetilmesi de önemlidir. Bu anlamda, Charoenngam ve diğerleri [16] yılında iş emri değişikliklerinin ortaya çıkması sonrasında başarılı bir şekilde yönetilebilmesini hedefleyen, iş değişikliği emrinin dokümantasyonunu, projedeki farklı disiplinler arasındaki güçlü iletişim ve koordinasyonu ve iş değişikliği emri iş akış şemasını destekleyen internet tabanlı iş değişikliği emri yönetim sistemi konusunda çalışma yapmışlardır. Alnuaimi ve diğerleri [17] yılında Umman'daki kamu projelerinde meydana gelen iş değişikliklerinin sebeplerini, etkilerini araştıran ve sonucunda da bu durumun azaltılmasını sağlayacak bir dizi önerilere getiren bir çalışma yapmışlardır. Taylor ve diğerleri [18] ise yaptıkları çalışmada ABD'deki Kentucky eyaletindeki karayolu projelerinde meydana gelen iş emri değişikliklerinin, proje planlama ve proje kapsamı belirleme sürecinin iyileştirilmesi yolu ile azaltılabileceğini ve önlenebileceğini savunmuşlardır. Son olarak, Jadhav ve Bhirud [19] çalışmalarında, Hindistan'daki inşaat projelerinde meydana gelen iş emri değişikliklerinin sebeplerini ve etkilerini araştırmış, elde ettikleri veriler ile iş emri değişikliklerinin nasıl önlenebileceği ve kontrol altında tutulabileceği konusunda öneriler getirmiştir.

Literatür taramalarında Türkiye'deki iş değişikliği yönetim sistemi ve iş değişikliğinin azaltılmasına yönelik çok fazla çalışmanın olmadığı görülmüştür İnşaat sektöründe sıkça yaşanan iş değişikliklerinin minimize edilebilmesi için öncelikle ortaya çıkış sebeplerinin ve proje üzerindeki etkilerinin çok iyi bilinmesi gerekir. Çünkü eğer ortaya çıkış sebepleri ortadan kaldırılabilir veya ortaya çıkması sonrası proje üzerinde oluşan etkisi azaltılabilir ise proje ancak o zaman istenilen başarıya ulaşabilecektir. Bu amaçla inşaat projelerinde meydana gelen iş değişikliklerinin hangi aşamada hangi sebepten ve kim tarafından oluştuğu bakış açısı ile oluşum sebepleri tüm yönü ile bu çalışmada ele alınmaya çalışılmıştır. Bu makale ile inşaat sektöründe proje yönetimi alanında çalışan ve verimlilikleri arttırmayı hedefleyen tüm tarafların kullanımı için değişiklik taleplerine azaltacak bir proje yönetim sistemi önerisi getirilerek literatürdeki boşluğun giderilmesi hedeflenmiştir.

3 Çalışmanın yöntemi

Bu makale, iş değişikliği taleplerine inşaat proje yönetimi açısından öneriler getirme amacı taşıdığından dolayı, öncelikle dünyadaki en yaygın proje yönetim sistemleri hakkında bilgi verilmektedir. Ardından iş değişikliği taleplerinin meydana geliş sebepleri ve ortaya çıkması durumunda proje üzerindeki etkilerinin ne olacağı sunulmaktadır. Bir sonraki aşamada, inşaat sektöründe sıkça yaşanan iş değişikliklerinin önüne geçilmesi için uygulama aşamasında alınacak önlemlerden ziyade, iş sahibinin daha tasarım öncesi evreden proje yönetim firmasını seçmesi ile başlanarak ve sonrasındaki tasarım, ihale, yapım ve yapım sonrası evreyi de kapsayacak şekilde, projedeki tarafların hangi aşamalarda dâhil olduğuna bağlı olarak alması gereken önlemler örnek bir proje üzerinden belirlenmiştir. Son olarak ise iş değişikliklerinin meydana gelmesi sonrasında yönetim sisteminin ve sürecin nasıl işlediği konusu bir sistem önerisi ile anlatılmıştır.

3.1 Dünyada proje yönetim kavramı ve standartları

Inşaat sektöründe proje, eşi ve benzeri olmayan bir ürün sunmak, hizmet vermek veya sonuçlar ortaya koymak için üstlenilen geçici bir girişim olarak tanımlanmaktadır [20]. Projenin ihtiyaç duyduğu gereksinimlerin karşılanması amacı ile bilgi ve becerenin, araç ve gereçlerin, tekniğin, proje faaliyetleri ile ilişkilendirilmesi ve uygulanması işine de proje yönetimi denir [20]. Günümüzde ve dünya üzerinde yayın olarak kullanılmaya başlanan başlıca proje yönetim standartları şu şekildedir: Caupin, 2006 [21], Project Management Institute [22], Construction Management Association of America [23], PRINCE2 (English Project Management System) [24], IPMA (International Project Management Association) [25], P2M (Japanese Project Management System) [26].

3.2 İnşaat projelerinde yaşanan iş değişikliği talepleri ve sebepleri

Inşaat projeleri inşaat aşamasına geçmeden önce; tasarım öncesinde planlama ve bütçe oluşturma, tasarım evresi, ihale ve sözleşme evresi gibi birçok aşamadan geçer. Tüm bu aşamalarda alınan kararların bir kısmı kesin olmayan bilgiler, varsayımlar ve inşaat proje yöneticilerinin deneyimlerine dayanarak alınmış olabilir. Bu sebeple inşaat projelerinde iş emri değişikliklerine sıklıkla rastlanır. İş emri değişikliği, yürürlükte olan ana sözleşmenin kapsamında değişiklik, ekleme veya çıkarma yapabilmesine izin veren bir dizi talimatları içeren "değişiklik talebi" olarak adlandırılmaktadır [27]. Literatürde iş değişikliği emri birçok farklı çalışmada yine Revay'ın [27] tanımına benzer şekilde yapılmıştır [28, 29, 30, 31, 32]. İş değişikliği taleplerinin temel kaynaklarını bakacak olursak, bu kaynakları projeye katılan taraflara göre ve oluşum sebeplerine göre incelemekte yarar vardır.

İş sahibi, projenin sözleşme kapsamını ve iş programını kavramakta zorluk çekmesinden ötürü iş emri değişikliklerinin oluşmasına sebep olabilir; yüklenici ise

iyileştirme yapmanın gerektireceği zamanı iş sahibinin tasarruf etmeyi kabul etmek istemesini fırsat bilerek veya yaptığı kusurlu işleri düzeltmekten kaçınmasından ötürü uygun olmayan imalatlar yapar, bu da projede iş değişikliklerine sebep olur. Mimar, sözleşme eki olacak projeler arasındaki koordinasyonun eksik sağlanmış olmasından veya projelerde eksik bilgilerin olmasından ötürü inşaat sürecinde projenin sık sık duraklatılmasına sebep olur ve iş değişiklikleri meydana getirir. Birçok çalışmada iş değişikliği taleplerinin kaynakları incelenmiş ve bu çalışma kapsamında Tablo 1'de sunulmuştur.

3.3 İş değişikliklerinin proje üzerindeki temel etkileri

Yine literatürdeki çalışmalar incelendiğinde iş değişikliklerinin proje üzerinde proje bütçesi, proje süresini, iş gücü verimliliği, işin kalitesi, işçi sağlığı ve güvenliği, ödemelerin zamanında yapılamaması, ötelenmesi, imalatın düzeltilmesi veya yıkılıp yeniden yapılması, firmanın namına leke getirmesi, yöneticiler arasındaki ilişkilerin zayıflaması ve ikili ilişkiler arasında anlaşmazlıkların yaşanması gibi çeşitli etkiler bıraktığı görülmektedir [10, 33].

Örneğin, Taiwan'da yapılan araştırmaya göre, Kamu İşlerinde iş değişikliklerinden kaynaklı oluşan proje bütçe artışı, projenin toplam bütçesinin %10-17'si oranındadır [39]. Bir başka örnekte ise inşaat projelerinde iş değişikliklerinden kaynaklı proje maliyetinin ortalama %11 ile %15 civarında arttığı sonucuna varılmıştır [40]. Zeitoun ve Oberlender [41] inşaat projelerinde yaşanan değişikliğin proje süresini, projenin sözleşme ekinde anlaşmaya varılan ve hedeflenen sürenin %9 u kadar uzatabileceğini belirtmişlerdir. Yapılan literatür taramasında inşaat sürecinde yaşanan iş değişikliklerinin, projenin en önemli iki parametresi olan proje bütçesini ve süresini ortalama %10 ile %15 arasında artırdığı görülmüştür [39-41].

Bu çalışma kapsamında iş değişikliklerini azaltmaya yönelik bir yönetim sistemi önerileceği için iş değişikliklerine proje yönetimi açısından bakılmış ve iş değişikliklerinin proje üzerinde etkileri 5 ana grup altında ele alınmıştır. Bu ana gruplar oluşturulurken proje yönetim firmalarının inşaat projelerindeki rolünün önemi de göz önüne alınmıştır. Zira, Katar'da yapılan bir çalışmada 22 adet proje ve 1122 adet iş değişikliği üzerinden elde edilen verilerden inşaat projelerinde yaşanan iş değişikliklerinin bütçe artışı üzerinde ne kadar etkisi olduğunu analiz edilmiş ve iş değişikliğinin bütçe üzerindeki yarattığı artışa en çok sebep olan tarafın İş Sahibi, diğerlerine kıyasla en az artışa sebep olan tarafın ise Proje Yönetim Firması/Danışman olduğu belirtilmiştir [38]. Bu bağlamda, bu makale kapsamında iş değişikliklerinin proje üzerindeki etkileri proje yönetim mantığına uygun olacak şekilde proje bütçesi, proje süresi, işgücü verimliliği, taraflar arasındaki ilişkiler ve yapılan işin kalitesi üzerindeki etkisi olmak üzere belirlenmiştir.

Tablo 1. Literatürdeki iş değişikliği talepleri ve kaynakları

[10]	[34]	[11]	[35]	[5]	[36]	[37]	[9]	[38]	[19]
Sözleşme eki, iş programında değişiklik ve yeniden düzenleme yapılması	Tasarım hataları	Tasarımın yetersiz olması:	Tasarım ve şartnamelerin eksiksiz hazırlanmaması	İş sahibi, %82.5 oran ile finansal problemlerinden, %76.5 oran ile hızlı ve doğru karar verememesinden ve tüm proje kapsamını değiştirebilmesinden ötürü, iş değişikliklerine sebep olur. Proje yönetim firması, %95.5 oran ile tasarımın eksik veya hatalı olmasından, %90 oran ile şartnamedeki değişikliklerden, %87.1 oran ile yetersiz çizim detaylarından, %85 oran ile tasarım detaylarındaki belirsiz ve tutarsızlıklardan ötürü iş değişikliklerine sebep olur. Yüklenici, %90 oran ile yetersiz değerlendirme ve iş tecrübesinden, %88.9 oran ile stratejik planlama eksikliğinden, %80 oran ile malzeme temin etmedeki gecikmelerinden ötürü iş değişikliklerine sebep olur. Bazı dış faktörler, %65 oran ile olağandışı hava koşullarından, %58 ülkedeki ekonomik şartların değişmesinden, %55 ülkedeki hükümetin değişmesinden ötürü iş değişikliklerine sebep olur.	Tasarımların tamamlanmadan inşaat aşamasına geçilen projelerde şartlara uygun planlama yapılmaması	Tasarımın tamamlanmadan inşaat sürecine geçilmesi	Projelerin teslim metotlarından biri olan geleneksel teslim yönteminde iş değişikliklerinin daha sık yaşandığı	Tasarımsal hatalar	İş sahibinin değişiklik, ek iş, mevcut projelerde değişiklik yapılması talebi
Sözleşme kapsamında değişiklik, ekleme ve çıkarmaların yapılması	Piyasa şartlarındaki değişiklik	İş miktarında yapılan ciddi değişiklikler	Tasarım süreçlerine yeterli zamanın verilmemesi	Öngörülmeyen olayların oluşması (beklenmeyen zemin şartları, olağan dışı hava durumu, ülke yönetiminin değişmesi vb.)	Projedeki tanımlamaların ve istenilen taleplerin eksik olması veya net olmaması	Projede kötü işilikten kaynaklı uygulama hataları	Tasararla-yap modelinde geleneksel modele nazaran daha az iş değişiklikleri yaşandığı	Tasarımlardaki tutarsızlıklar	Yüklenicinin tasarım aşamasında bulunmaması ve bu yüzden yapım aşamasında tasarımları anlamakta zorluk çekmesi
İş sahibinin finansal zorlanmaları ve ekonomik problemleri	Çalışmanın miktar ve kapsamının değişmesi	Kalitenin daha iyi olması konusunda getirilen öneriler	Yüklenici talebiyle ortaya çıkan değişiklikler	Yüklenicinin malzeme ve ekipman temininde gecikmeler yaşaması Risklerin dağılımının, proje gruplarının kapasitesine göre yapılmaması Projedeki risklerin proje grupları arasında elverişsiz ve bilinçsiz dağıtımı,	İş sahibinin finansal anlamda zorlanması ve ekonomik zorluklar yaşaması	Çeşitli sebeplerden ötürü malzemelerin tedarik süresinde yaşanan ertelenmeler	Tasarımlarda değişiklik yapılması talepleri	Tasarımlarda değişiklik yapılması talepleri	Dizayn sürelerinin yeterli ve gerçekçi olmaması
İş sahibinin karar verme sürecinde hızlı ve efektif davranamaması, karar alma süreçlerinin uzaması	Dış faktörler	Kullanıcı ihtiyaçları	Yüklenicinin malzeme ve ekipman temininde gecikmeler yaşaması Risklerin dağılımının, proje gruplarının kapasitesine göre yapılmaması Projedeki risklerin proje grupları arasında elverişsiz ve bilinçsiz dağıtımı,	Yüklenicinin malzeme ve ekipman temininde gecikmeler yaşaması Risklerin dağılımının, proje gruplarının kapasitesine göre yapılmaması Projedeki risklerin proje grupları arasında elverişsiz ve bilinçsiz dağıtımı,	Malzeme ve ekipmanların tedarik ve temininde sıkıntılar yaşanması	Tasarımların iş sahibi ihtiyaçlarını karşılamada eksik kalması	Tasarımın yetersiz olması	Tasarımın yetersiz olması	Yüklenici ve proje danışmanı/müşavir arasındaki iletişim kopukluğu
İş sahibinin ikna olmaması	İnşaat sahası şartlarının farklılık göstermesi	Güvenlik hususları	Yüklenicinin malzeme ve ekipman temininde gecikmeler yaşaması Risklerin dağılımının, proje gruplarının kapasitesine göre yapılmaması Projedeki risklerin proje grupları arasında elverişsiz ve bilinçsiz dağıtımı,	Yüklenicinin malzeme ve ekipman temininde gecikmeler yaşaması Risklerin dağılımının, proje gruplarının kapasitesine göre yapılmaması Projedeki risklerin proje grupları arasında elverişsiz ve bilinçsiz dağıtımı,			Tasarımın iş sahibi istekleri ile uyumlu olmaması	Tasarımın iş sahibi istekleri ile uyumlu olmaması	
İş sahibi tarafından sözleşme eki şartnamelerde değişiklik	Mevcuttan daha iyi bir öneri sunulması	İş sahibinin finansal durumlarını iyileştirme arzusu	Yüklenicinin malzeme ve ekipman temininde gecikmeler yaşaması Risklerin dağılımının, proje gruplarının kapasitesine göre yapılmaması Projedeki risklerin proje grupları arasında elverişsiz ve bilinçsiz dağıtımı,	Yüklenicinin malzeme ve ekipman temininde gecikmeler yaşaması Risklerin dağılımının, proje gruplarının kapasitesine göre yapılmaması Projedeki risklerin proje grupları arasında elverişsiz ve bilinçsiz dağıtımı,			Talep edilen malzemelerin mevcutta olmaması	Talep edilen malzemelerin mevcutta olmaması	
Müşavir/danışman tarafından tasarımlarda değişiklik ve düzenleme yapılması	Tasarım tercihlerinde değişiklikler yapılması	Tasarım hataları	Yüklenicinin malzeme ve ekipman temininde gecikmeler yaşaması Risklerin dağılımının, proje gruplarının kapasitesine göre yapılmaması Projedeki risklerin proje grupları arasında elverişsiz ve bilinçsiz dağıtımı,	Yüklenicinin malzeme ve ekipman temininde gecikmeler yaşaması Risklerin dağılımının, proje gruplarının kapasitesine göre yapılmaması Projedeki risklerin proje grupları arasında elverişsiz ve bilinçsiz dağıtımı,			İş miktarında ciddi derecede yapılan değişiklikler	İş miktarında ciddi derecede yapılan değişiklikler	
Sözleşme dokümanlarında çakışma ve uyumsuzluk Tasarımların karmaşık ve kompleks olmasından ve tasarımların tam olarak anlaşılabilmesinin	Sözleşme şartları	Yüzey koşullarında farklılık	Yüklenicinin malzeme ve ekipman temininde gecikmeler yaşaması Risklerin dağılımının, proje gruplarının kapasitesine göre yapılmaması Projedeki risklerin proje grupları arasında elverişsiz ve bilinçsiz dağıtımı,	Yüklenicinin malzeme ve ekipman temininde gecikmeler yaşaması Risklerin dağılımının, proje gruplarının kapasitesine göre yapılmaması Projedeki risklerin proje grupları arasında elverişsiz ve bilinçsiz dağıtımı,			Plansal hatalar	Plansal hatalar	
Yetersiz tasarım detayları	Koordinasyon	Tutarsızlıklar	İş sahibi talebi ile ortaya çıkan değişiklikler	İş sahibi talebi ile ortaya çıkan değişiklikler			Kapsamın iş sahibi tarafından değiştirilmesi	Kapsamın iş sahibi tarafından değiştirilmesi	
		Ekonomik şartların değişmesi					İş sahibinin memnuniyetsiz olması	İş sahibinin memnuniyetsiz olması	

Tablo 1. Literatürdeki iş değişikliği talepleri ve kaynakları (devamı)

[10]	[34]	[11]	[35]	[5]	[36]	[37]	[9]	[38]	[19]
Müşavir/danışman tarafından şartnamede değişiklikler ve yeniden düzenlemelerin yapılması		Farklı saha koşulları						Saha koşullarının farklılık göstermesi	
Projede kullanılan ekipmanın yetersizliği		Sosyo kültürel farklılıklar						Daha kaliteli imalat için öneriler getirilmesi	
İşgücü verim kaybından kaynaklı yaşanan sıkıntılar		Tasarımların iş sahibinin ihtiyaçlarına uymaması						Projedeki ertelemeler	
Yüklenicinin finansal zorlanmaları ve ekonomik problemleri		Teknolojik değişimler						Proje yönetim firmasının deneyim ve değerlendirme eksiklikleri	
Zayıf işçilikle imalat yapılması, imalatın yenilenmesi								Yüklenicinin deneyim ve değerlendirme eksiklikleri	
Malzeme tedarik ve satın alma sürecinde sorunlar									
Stratejik planlamadaki eksiklikler									

3.4 Örnek bir proje yönetim firmasından iş değişiklikleri konusunda beklenen hizmetler

İnşaat sektöründe yaşanan iş değişikliklerini minimize edecek proje yönetim sistemi önerisi getirilebilmesi için önceki bölümde literatür taraması yapılmış olup, iş değişikliğini ortaya çıkaran temel sebepler ve iş değişikliğinin ortaya çıkması sonucu proje üzerinde oluşturduğu etkiler incelenerek veriler toplanmıştır. Bu bölümde gerçek bir proje yönetim firmasının yazarlardan birinin çalıştığı ve birçok iş değişikliği emrinin yaşandığı bir projedeki süreçlerdeki görev tanımı, iş kapsamı ve yönetim sisteminden bahsedilmiştir.

Tablo 2. Ön tasarım sürecinde proje yönetim firmasının yaptığı çalışmalar

Ön tasarım sürecinde proje yönetim firmasının yaptığı çalışmalar
1 İş sahibi istek ve gereksinimlerini belirleyerek proje kapsamını tanımlamak.
2 Kavramsal tasarımı geliştirmek
3 Yetkili kurumlardan gerekli izinlerin alınması için yatırımcıyı yönlendirmek
4 Temel iş programını oluşturmak.
5 Temel bütçeyi oluşturmak.
6 Proje müellifleri seçim kriterlerini belirlemek.
7 Yapılacak işle ilgili yetkin proje müelliflerinden teklif alıp, değerlendiren iş sahibi onayına sunmak.
8 İş sahibinin onayladığı proje müellifleriyle yönetmelik ve şartnamelere uygun sözleşmeler yapmak.
9 Harita ve zemin etüt firmalarını belirleyerek çalışmalarını başlatmak.
10 Temel proje organizasyon şemasını oluşturmak.
11 Temel risk analizlerini oluşturmak.
12 Proje el kitabını oluşturmak

Örnek proje bir endüstriyel sanayi tesisi projesi olup, Gebze/Kocaeli’nde inşa edilmiştir. Proje teslim yöntemi, tasarım-ihale-yapım olmakla birlikte sözleşme tipi anahtar teslim götürü bedeldir. Proje alanı yaklaşık 35.000m²’dir ve 6 farklı bina tipi inşaatı söz konusu olmuştur. İş değişikliklerinin temel sebeplerinin ve yönetim sürecinin iyi anlaşılabilmesi için, süreci yöneten Proje Yönetim Firmasının yönetim sisteminin iyi anlaşılması gereklidir. Ön tasarım sürecinde proje yönetim firmasının yaptığı çalışmalar Tablo 2’de sıralanmıştır.

Tablo 3. Tasarım süreci boyunca proje yönetim firmasının yaptığı çalışmalar

Tasarım sürecinde proje yönetim firmasının yaptığı çalışmalar
1 Proje paydaşları arasında eşgüdüm ve bilgi akışını sağlamak,
2 Çizimlerin iş sahibi ihtiyaç programına uygun yapılmasının kontrolünü yapmak,
3 Çizimlerin ilgili teknik standart, şartname ve yönetmeliklere göre yapılmasını sağlamak,
4 Projelerin bütçeye uygunluğunu incelemek,
5 Değer mühendisliği çalışma ve analizlerinin yapılması,
6 Tasarım sürecinin gelişmelerine önemli derecede katkı sağlayan haftalık toplantılar düzenlemek,
7 Tasarım paketlerinin yüklenici ihale dosyası için eksiksiz hazırlanmasını sağlamak,
8 Sürecin sorunsuz tamamlanabilmesi adına iş sahibine uyarı ve bilgilendirmeleri yapmak,
9 Süre kontrolü yapmak.

Tasarım gruplarının belirlenmesi sonrasında tasarım sürecine geçilmektedir. Tasarım süreci boyunca proje yönetim firmasının yaptığı çalışmalar Tablo 3’te sıralanmıştır. Yüklenicinin belirlendiği ihale sürecinde proje yönetim firmasının üstlendiği işler Tablo 4’teki gibidir.

Tablo 4. İhale sürecinde proje yönetim firmasının üstlendiği işler

İhale sürecinde proje yönetim firmasının yaptığı çalışmalar	
1	İhale takvimini hazırlamak.
2	İhale sürecini eksiksiz yönetmek.
3	Uygun sözleşme türlerini belirlemek.
4	Sözleşmeleri hazırlamak.
5	Teknik şartnameleri hazırlamak.
6	Birim fiyat tariflerini hazırlamak.
7	Yüklenici ön yeterlilik kriterlerini belirlemek.
8	İsteklilerin yeterliliklerini değerlendirmek.
9	İhale dosyalarının ve zeyilnamelerin koordinasyonunu sağlamak.
10	İhale ile ilgili isteklilerden gelen soruların cevaplamak.
11	İsteklilerin tekliflerini analiz etmek.
12	Uygun teklifleri belirlemek.
13	İhale ile ilgili değerlendirme ve raporları hazırlayarak iş sahibine sunmak.
14	Sözleşme eki olarak hazırlanacak evrakların (iş programı, nakit akış şeması, organizasyon şeması, teminat mektubu, iş sağlığı ve güvenliği planı, kalite kontrol planı) takip ve kontrolünü yapmak.
15	Yükleniciye yer teslimi yapmak, bu konuda gerekli işlemleri takip etmek ve koordinasyonu sağlamak.

Yapım döneminde ise proje yönetim firmasından beklenen görevler **Tablo 5**'te sıralanmıştır. İnşaat projelerinin tamamlanması ve iş sahibinin yapıyı işletmeye alması sonrası da proje yönetim firmasının görev tanımı ve iş kapsamı devam etmekte olup kapsamındaki işler **Tablo 6**'da sunulmuştur.

Tablo 5. Yapım döneminde proje yönetim firmasından beklenen görevler

Yapım sürecinde proje yönetim firmasının yaptığı çalışmalar	
1	Sözleşme yönetimi
2	Şantiye kuruluşunu yönlendirmek, şantiye mobilizasyon planını oluşturulmasını sağlamak ve kontrol etmek
3	Şantiye organizasyon şemasının oluşturulmasını sağlamak
4	Proje el kitabı, iletişim matrisi, proje iletişim akışı vb. Dokümanları oluşturmak, proje paydaşları arasında koordinasyonu sağlamak
5	Şantiyede uygun personelin çalışmasını denetlenmek
6	Malzemelerin projeye uygunluğunu ve kalitesini denetlemek
7	Atölye imalatlarını atölyede denetlemek, test ve kontrolleri yaptırmak, raporları arşivlemek
8	Yapılan imalatların fen ve sanat kurallarına, sözleşme ve eklerine, ilgili yasa, yönetmelik ile teknik şartnamelere uygunluğunu sağlamak,
9	Çizimlerde yapılan her türlü değişikliğin çizim üzerine işlenmesini kontrol etmek ve ilgili imalatın bitimini takiben yüklenici tarafından as-built çizimlerin yapılmasını sağlamak.
10	Yapılan imalatlar ile ilgili düzenli rapor vermek
11	Yapı işlerinde iş sağlığı ve güvenliği tüzüğü esas alınarak iş güvenliğini denetlemek
12	Zaman yönetimi yapmak, iş programını güncelleyerek kontrol etmek
13	Maliyet kontrolü ve güncellemesi yapmak, olası maliyet değişikliklerini önceden iş sahibine bildirmek ve onay almak
14	İş sahibine haftalık ilerleme raporlarını sunmak
15	Saha toplantılarını yönetmek

Tablo 6. Yapım sonraki süreçte proje yönetim firmasının görevleri

Yapım sonrası sürecinde proje yönetim firmasının yaptığı çalışmalar	
1	Nihai metraj ve kesin hesap işlemlerinin yapılması,
2	İş süresince gerekli test çalışmalarının yapılması için teslimine yakın test, ayar, dengele ve devre alma çalışmalarının yapılması
3	Tüm projeye ait proje ve dokümanların arşivlenmesi, as-built projelerin yaptırılması, eksik ve kusurlu işlerin tespiti,
4	Geçici kabulün gerçekleştirilmesi,
5	Geçici kabul eksiklerinin tamamlanması,
6	Sistemlerin ve garanti belgelerinin toplanması, iş sahibine teslim edilmesi
7	Bakım ve işletme el kitaplarının hazırlanması, iş sahibine teslim edilmesi
8	Kesin kabul ün gerçekleştirilmesi.
9	Garanti süresi boyunca ortaya çıkan herhangi bir problemde danışmanlık hizmeti verilmesi

3.5 İncelenen projedeki iş değişikliği emri talepleri yönetim sisteminin aksayan yönleri

İş sahibinin proje yönetim firmasını atlayarak direkt yüklenici ile iletişime geçerek sözlü iş değişikliği taleplerinde bulunması,

Yüklenicinin iş sahibinden sözlü aldığı bu iş değişikliği taleplerini proje yönetim firmasına ve iş sahibine yazılı olarak sunmadan ve imalata başlama onayı almadan uygulamaya başlaması,

Yüklenicinin bazı işler için ise iş değişikliği emri çalışmasını imalata başladıktan sonra onaya sunması,

İş değişikliklerine yönelik iş sahibinden onay alma süreçlerinin çok uzaması, bu durumun imalat süresini ve yüklenicinin çalışma motivasyonunu etkilemesi,

Sözleşme sonrası sahada uygulama yapılması için yayınlanan tasarımlardaki değişikliklere ilişkin tasarım gruplarından projeler arasındaki değişikliklere ilişkin gerekçeleri ile ilgili destek alınmaması, proje yönetim firmasının değişikliğin gerekçesi ve talebin haklılığı konusunu tek başına çözmeye çalışmasından dolayı değerlendirme sürecinin uzayabilmesi,

Yüklenici, sözleşme eki proje ve saha yayını yapılan projeler arasında gördüğü farklılıklara veya iletilen taleplere yönelik oluşan iş değişikliği çalışmalarını direkt hazırlayarak proje yönetim firmasına onayına iletmıştır. Fakat yüklenicinin ilettiği iş değişikliği emri dokümanları incelendiğinde ve sözleşme kapsamına göre değerlendirme yapıldığında ilave iş olarak nitelendirildiği taleplerinin çoğunun aslında sözleşme ve eklerinde karşılığı olduğu ve ilave iş olmadığı tespit edilmiştir. Yüklenicinin haksız ve hatalı iş değişikliği emri talep dokümanlarını hazırlaması ve proje yönetim firmasının bu talep dokümanını inceleme ve değerlendirme süreci her iki taraf için de zaman kayıplarının yaşamasına yol açmıştır. Bu sebeple süreç, iş değişikliği talep dokümanlarının yüklenici tarafından hazırlanması ve onaya sunulmasından önce iş değişikliğinin konu ve gerekçesinin proje yönetim firmasına ön onay alınması adına sunulması ve talebin proje yönetim firması tarafından uygun bulunması sonrasında yüklenicinin iş değişikliği talep dokümanlarını hazırlaması doğru olur. Böylece yanlış talepler için gereksiz yere iş değişikliği emri talep formları oluşturulmamış ve kontrolü için zaman kayıpları yaşanmamış olur.

İş emri değişikliği maliyet artışı/azalışına sebep olduğu kadar, süre artışı/azalışına da sebep olmaktadır. İmza altına alınan iş değişiklik formlarında genellikle iş değişikliğinin maliyet üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Ancak ikinci en önemli nokta olan iş değişikliğinin proje süresine ve iş programına etkisi bu aşamada incelenmemekte olup iş sonuna bırakılmaktadır. İş sonuna gelindiğinde yükleniciden süre uzatım talebi geldiğinde ise proje yönetim firması görüş ve kararını bildirmek için geçmişi taramaya başlamaktadır. Bu konu ile ilgili olarak; eğer iş değişiklik formunda ilave sayfa açılıp, iş değişikliğinin iş programının hangi hattı üzerinde olduğu veya süreyi ne kadar öteleyip/geri çektiği de imza altına almış olur ise iş sonunda talep edilecek süre uzatım talepleri de net bir şekilde değerlendirilebilir. Çünkü bazı işler iş programını etkiliyor olarak görünse de aslında kritik hat üzerinde olmadığı veya paralel faaliyeti olduğu için iş gecikmesine yol açmayabiliyor. Böylece süre uzatım talebinin doğru ve gerçeğe yakın değerlendirilmesi ve değerlendirme sırasında ortaya çıkacak tartışmaların azalması sağlanabilir. Örnek projede burada bahsedilen eksiklikten ötürü süre tespitinde karar, süreyi etkileyen genel konular üzerinden verilmiştir.

Yüklenicinin imalata devam edebilmesi için iş sahibinden onay alması gereken bazı konuları iş sahibine iletmesi fakat iş sahibi yöneticilerinin yeterli yetkinlikte olmamasından ötürü karar vermekten kaçmaları, kararsız davranmaları ve onay sürecini uzatmaları imalata başlama sürecini uzatmış, işin süresini etkilemiştir.

İş değişikliği yönetim sistemi ile ilgili yüklenicinin iş değişikliğinin ortaya çıkmasından itibaren belli süreler içerisinde iş değişikliği talebinde bulunması, iş sahibi ve proje yönetim firmasının da belli süreler içerisinde yüklenicinin talebine dönüş yapması gereklidir. Fakat örnek projede herhangi bir süre kavramı dikkate alınmamıştır. Bu da kararların uzamasına ve gecikmelere sebep olmuştur.

4 Bulgular ve değerlendirmeler

4.1 İş değişikliklerinde atlanmaması gereken önemli adımlar

Proje yönetim firması tarafından yapılan değerlendirmenin yüklenici ile paylaşması

- Proje yönetim firması yükleniciden gelen talep sözleşme kapsamında ise değerlendirmeye almayarak talebi reddettiğini yükleniciye bildirir. Gelen talebin sözleşme kapsamında yapılan bir değişikliğe veya sözleşme kapsamında olmayan bir iş kalemine ait olması durumunda ise yukarıda belirtilen kontrol prosedürlerini izler ve kontrolü sonrası oluşan değerlendirmesini, iş sahibinden önce yüklenici ile paylaşır.

- Yükleniciye iletildiği değerlendirmesini yüklenici de kontrol eder, varsa hatalarını düzeltir ve itirazlarını yapar.

- Yükleniciden varsa gelen düzeltme veya itirazları proje yönetim firması tarafından tekrar değerlendirilerek yüklenici ile paylaşılır.

- Yüklenici, proje yönetim firmasının son değerlendirmesi üzerinde anlaşmaya varabilir veya tekrar itiraz edebilir.

Örnek proje özelinde yüklenici, proje yönetim firması değerlendirmelerine sık sık itirazları olsa da büyük oranda

talebindeki düzeltmelerini yapmış ve büyük oranda anlaşmaya varılan çalışmalar iş sahibi onayına iletilmiştir.

Yüklenici ile ortak karara varılan çalışmanın iş sahibi onayına iletilmesi

- Proje yönetim firması yüklenici ile anlaşmaya vardığı son iş değişikliği emri talep dokümanını veya yüklenicinin hala itirazda bulunduğu fakat proje yönetim firmasının son değerlendirmesini kapsayan iş değişikliği emri talep çalışmasını iş sahibi onayına sunar.

- Proje yönetim firması, anlaşmazlıkların ve hatalı değerlendirmelerin önüne geçmek için değerlendirmesini direk iş sahibine değil, önce yükleniciye iletir. Yüklenici, varsa hatalarını düzeltir veya varsa itirazını gerekçesi ile birlikte sunar. Böylece proje yönetim firması, iş değişikliği emri talep değerlendirmesini daha adilane ve iki tarafın da haklarını gözetererek sonlandırmış olur.

İş sahibinin değerlendirmesini proje yönetim firması ile paylaşması

- İş sahibi, proje yönetim firması tarafından kendisine iletilen iş değişikliği emri talep dokümanını inceler ve görüşlerini proje yönetim firmasına iletir. Proje yönetim firması, iş sahibine iletildiği değerlendirmesine iş sahibinin itiraz etmesi durumunda iş sahibi ile görüşme sağlayarak sözleşme şartları çerçevesinde talep ile ilgili detayları tekrar aktarır.

Örnek projede iş sahibi yetkilileri, proje yönetim firması tarafından kendisine iletilen iş değişikliği emri taleplerine çeşitli sebeplerden ötürü genellikle olumsuz dönüşler yapmış olup, onay sürecini çok fazla uzatmışlardır. İş sahibi, özellikle yüklenici ile direkt iletişime geçmesi ve taleplerini sözlü olarak iletmesi sonrasında yüklenicinin ilgili işi yerine getirmesi sonrasında ek fiyat talebinde bulunduğu bazı işleri, ek fiyat geleceğini bilmediğini ileri sürerek kabul etmemiştir. Ayrıca iş sahibi yöneticilerinin yeterli yetkinlikte olmamasından ötürü karar vermekten kaçmaları ve kararsız davranmaları onay sürecini uzatmıştır.

İş sahibi Türk yetkilileri, yaşanan değişikliğin sebeplerini yurt dışı merkezine anlatmada da zorluk yaşamışlardır. Proje yönetim firması bu konuda iş sahibinin Türk yetkililerine destek vererek, iş değişikliği talebinin gerekçesini ve haklılığını iş sahibinin yurt dışı merkezine anlatmış olup onay süreçlerinin uzamasının önüne geçmeye çalışmıştır.

İş sahibi ve proje yönetim firmasının ortak kararının yükleniciye bildirilmesi

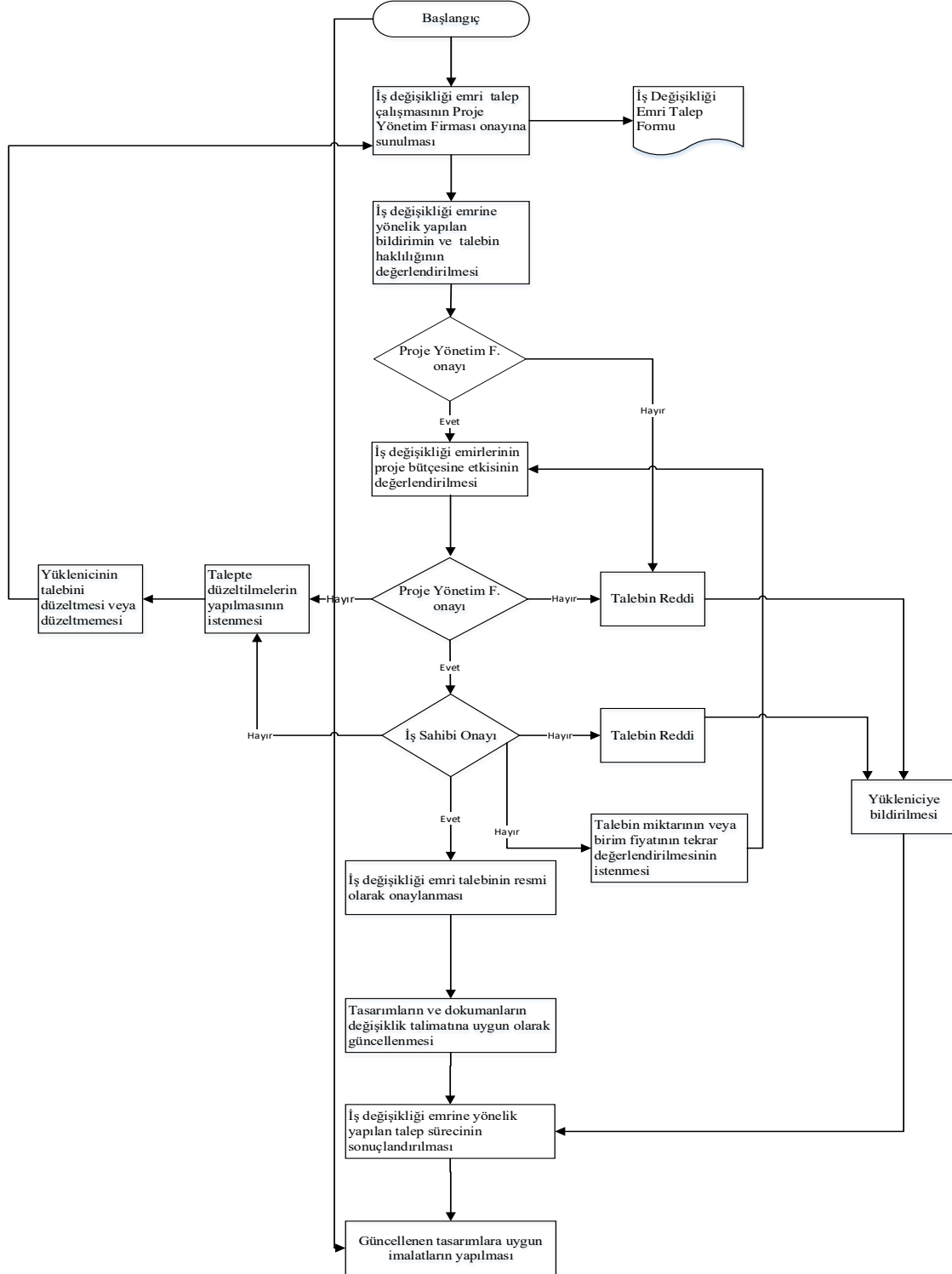
- Proje yönetim firması iş sahibine iletildiği değerlendirmesine iş sahibinin itiraz etmemesi ve onaylaması durumunda son değerlendirme kararını yükleniciye bildirir.

- Proje yönetim firması, iş sahibine iletildiği değerlendirmesine iş sahibinin itiraz etmesi durumunda iş sahibi ile görüşme sağlayarak sözleşme şartları çerçevesinde talep ile ilgili detayları tekrar aktarır ve iş sahibi ile anlaşmaya varılması durumunda değerlendirme yükleniciye bildirilir. İş sahibinin itirazlarının devam etmesi durumunda ise oluşan itirazlar ve sebepleri yüklenici ile paylaşılarak tekrar değerlendirmesi istenir. Yüklenicinin de kabul etmemesi durumunda konu anlaşmazlığa dönüşür.

Örnek projede birçok konunun anlaşmazlığa dönüşmesine rağmen, iş sonunda proje yönetim firmasının

arabuluculuk yapması ile yüklenici ve iş sahibinin anlaşmaya varılması sağlanmıştır. Ayrıca iş sahibi Türk yetkililerinin yeterli yetkinlikte olmaması, karar vermekten kaçmaları, kararsız davranmaları ve onay sürecinde istedikleri değişikliklerin sebeplerini yurt dışı merkez ofislerine aktarmakta güçlük yaşamaları gibi sebeplerden ötürü ek fiyat taleplerinin onay süreci uzamıştır. Ancak yine de yüklenici,

proje yönetim firmasının da araya girmesi ve yönlendirmesi ile kritik bazı işler için fiyat onayını beklemeden sadece işe başlama onayı ile işine devam etmiş, işin sonunda fiyat konusunda proje yönetim firmasının da desteği ile her iki tarafın hakkı gözetilerek anlaşmaya varılmıştır. Örnek projenin iş değişikliği emri yönetim sistemi akış diyagramı yolu ile Şekil 1'de özetlenmiştir.



Şekil 1. Örnek projede uygulanan iş değişikliği emri yönetim sisteminin akış diyagramı

Çalışmaya başlamadan önce detaylı bilgi edinebilmek amacı ile çok sayıda yerli ve yabancı kaynaklar incelenerek literatür taraması yapılmıştır. Ayrıca, iş değişikliklerinin proje kalitesi, projedeki işgücü verimliliği, projedeki taraflar arası ilişkiler üzerinde büyük etkilerinin olduğu da tespit edilmiştir. Genel çözüm önerileri olarak, inşaat aşamasında tasarımlarda değişiklik yapılmasının durdurulması, iş kalemlerinin kırılımlı olarak gösterildiği iş planlama tekniklerinin kullanılması, projenin sıkı takip edilebilmesini sağlayan haftalık ve aylık raporların yapılması gibi eylemlerin inşaat sürecinde oluşan iş değişikliği emri çalışmalarını önleyebileceği belirtilmiş ancak bir sistem önerisi getirilmemiştir.

Ardından inşaat sektöründeki proje süreçlerinde ortaya çıkan iş değişikliklerinin sebeplerini, etkilerini ve ortaya çıkması durumunda nasıl yönetileceği anlatılmaya çalışılmıştır. Bu çalışma ile iş değişikliğinin azaltılmasına yönelik bir sistem önerisi getirilmesi hedeflendiğinden proje sürecinin her safhasının detaylı olarak irdelenmesi gerekmiş, projenin her safhası için iş değişikliğini meydana getirebilecek sebepler belirlenmeye çalışılmıştır. İnşaat sektöründe yaşanan iş değişikliklerinin minimize edilmesine yönelik bir örnek projede proje yönetim firmasının iş değişikliği konusundaki görevleri incelenmiş, ardından örnek projedeki iş değişikliklerinin yönetiminde yaşanan aksaklıklar vurgulanmıştır. Elde edilen veriler ile iş artış ve azalışlarını minimize etmek için hangi proje paydaşının tasarım öncesi dönemden başlayarak, inşaatın tamamlanması sonrası dönemi de kapsayacak şekilde hangi aşamada hangi önlemi alması gerektiği akış diyagramı yöntemi ile sistematik hale getirilmiştir. Oluşan bu sistem incelendiğinde, iş değişikliğini azaltmaya yönelik yapılması gereken eylemlerin "entegre proje yönetim sistemi" ile uyumlu olduğu görülmüştür. Entegre proje yönetim sistemi (IPD); proje boyunca projeye dâhil olması planlanan tüm katılımcıları, projede kullanılması planlanan sistemleri, çalışma yöntemlerini, projeyi ekonomik hale getirmek, projedeki israfı azaltmak ve verimliliği arttırmak amacı ile projenin erken safhasında bir araya getiren entegre bir proje teslim yöntemi şeklindedir [25]. Entegre proje yönetim sisteminin çalışma ve hedef prensiplerine dikkatlice bakıldığında bu yönetim sistemi ile yürütülmeye başlanan projelerde geleneksel yönetim sistemi ile yönetilen projelere oranla daha az sayıda iş değişikliği emri talebinin oluşacağı açıkça görülmektedir. Ancak entegre proje yönetim sistemi çalışma süreci yapım evresinin sonuna kadar olup kullanıcılar için yapıyı işletmeye aldıkları yapım sonrası süreçte karşılaştıkları sorunları ve sıkıntıları çözmeye yönelik herhangi bir çalışma yapmamaktadır. Diğer yandan bu makale çalışmasında önerilen sistem akış diyagramı, entegre proje yönetim sisteminin aksine yapım sonrası evrede de devam etmekte olup, müşteriler için güvenli, konforlu ve kaliteli proje teslimi yapılması amaçlanmıştır.

5 Sonuç ve öneriler

İnşaat projelerinin her türlü iç ve dış etkiye açık olmasından ve çok sayıda tarafın tek bir projede, sınırlı bir alan ve sürede kompleks bir projeyi gerçekleştirmeye

çalışmasından ötürü hiçbir değişikliğe maruz kalmadan planlanan şekilde tamamlanması oldukça güçtür. Özellikle büyük ve karmaşık projelerde bu belirsizlikler proje yönetim firmalarının inşaat projelerine dahil olmasını gerekli kılmaktadır. Ancak bazı projelerde proje yönetim firmalarını dahi zorlayacak sayıda iş değişiklikleri olabilmektedir. Bu kadar çok iş değişikliği de projelerin istenilen süre, kalite ve maliyette başarıyla gerçekleştirilmesini zorlaştırmaktadır. Var olan proje yönetim sistemleri bu açıdan incelendiğinde özellikle Türkiye'deki inşaat sektöründe yaşanan iş değişikliklerini azaltma konusunda yetersiz kaldıkları görülmektedir. Şirketlerde kullanılan mevcut sistemlere iş değişikliklerinin yönetiminde atlanan adımlar farklı iş değişikliği taleplerine ve hak taleplerine neden olmaktadır. Bu makalede özellikle söz konusu açığı doldurmak amacıyla inşaat projeleri boyunca oluşan iş değişikliği emri taleplerinin azaltılmasına yönelik tasarım öncesi dönemden başlayarak, inşaatın tamamlanması sonrasındaki dönemi de kapsayacak şekilde hangi proje paydaşının hangi aşamada devreye girmesi gerektiğini gösteren bir iş emri değişikliği sistemi bir akış diyagramı kullanılarak oluşturulmuştur. Sunulan sistemde herhangi bir proje paydaşının atlanmadığı, iş değişikliklerinin adım adım ve sistematik bir yolla ele alındığının altı vurgulanmalıdır. Başından sonuna kadar tüm süreçleri incelenen örnek projenin Türkiye'de bir projede olması çalışmanın kısıtlarından birisi olarak değerlendirilmelidir. Öte yandan proje yönetim sürecinde adım adım değişiklik taleplerini değerlendirmek ve bunlara karşı atılacak adımlar konusunda tek bir firma tarafından yönetilen projelerin incelenmesi için bizzat tüm süreçlerde yer alma zorunluluğu bir kısıt olarak belirtilmelidir. Makale yazarlarından birisinin çalıştığı firma özelinde incelemeye gidilmiş, o nedenle de tüm bilgi ve belgelere ulaşılabilmektedir. Ancak, örnek projedeki bazı bilgiler gizlilik anlaşmaları nedeniyle paylaşılamamıştır. Keza, farklı tip projelerde ne gibi değişiklik taleplerinin çıkacağı hususu, bu çalışma başlangıç kabul edilerek ileride yapılacak çalışmalar için değerlendirilebilir. Ayrıca, tasarım öncesi evreden tasarım sonrası evreye kadar kullanılabilmesi ve örnek bir projeden yola çıkılarak çözümlenmesi sebebiyle bu çalışmanın literatüre ve özellikle Türk inşaat sektörüne büyük katkı yapacağına inanılmaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %15

Kaynaklar

- [1] İNTES, Türkiye İnşaat Sanayicileri İşveren Sendikası, İnşaat Sektörü Raporu, 2020.
- [2] A. E. Keleş ve M. K. Keleş, İnşaat sektöründe kullanımı artan bilgisayar yazılımları ve bilgi teknolojilerinin irdelenmesi. El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 5(2), 610-617, 2018. <https://doi.org/10.31202/ecjse.386469>.
- [3] M. Syal, J. Diffendal, D. Duah, Change order guidelines for electrical and low voltage contractors. Project Rep., ELECTRI International. Bethesda, 2014.

- [4] H. R. Thomas, M. J. Horman, R. E. Minchin Jr., and D. Chen, Improving labor flow reliability for better productivity as lean construction principle, *Journal of Construction Engineering and Management*.129 (3), 251–261, 2003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2003\)129:3\(251\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2003)129:3(251)).
- [5] M. Staiti, M. Othman, A. A. Jaaron, Impact of change orders in construction sector in the West Bank. In *International conference on industrial engineering and operations management*. Kuala Lumpur, Malezya, 8-10 Mart 2016.
- [6] F. M. Arain, Strategic management of variation orders for institutional buildings: Leveraging on information technology. *Project Management Journal*. Dec;36(4):66-77, 2005. <https://doi.org/10.1177/875697280503600408>.
- [7] I. A. Motawa, C. J. Anumba, A. El-Hamalawi, P.W. Chung, M. Yeoh., M. Sun, Development a fuzzy system for change prediction in construction projects. *Inproceedings of the Xth International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, Weimar, Germany, Jun 2 (pp. 02-04), June 2004.
- [8] S. Isaac, R. Navon, Feasibility study of an automated tool for identifying the implications of changes in construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*. Feb;134(2):139-45, 2008.[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339364\(2008\)134:2\(139\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339364(2008)134:2(139)).
- [9] J. K. Ssegawa, K. M. Mfolwe, B. Makuke, B. Kutua, Construction variations: a scourge or a necessity. *InProceedings of the First International Conference of CIB W107*, 11-13, Nov 11, 2002.
- [10] A. H. Memon, I. A. Rahman and M. F. A. Hasan, Significant causes and effects of variation orders in construction projects. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 7(21), 4494-4502, 2014.
- [11] M. F. Al-Hams, Simulation model of change orders and their impact on building projects performance in Gaza strip. Master theses, The Islamic University, Gaza, 2010.
- [12] S. A. Assaf, S. Al-Hejji, Causes of delay in large construction projects. *International Journal of project management*. 24(4), 349-357, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2005.11.010>.
- [13] J. Desai, J. Pitroda and J. Bhavasar, Analysis of Factor Affecting Change Order in Construction Industry Using RII Method. *International Journal of Modern Trends in Engineering and Research*, 2, 344-347, 2015.
- [14] M. E. Abd El-Razek, H. A. Bassioni, A. M. Mobarak, Causes of delay in building construction projects in Egypt. *Journal of construction engineering and management*. 134(11), 831-41, 2008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339364\(2008\)134:11\(831\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339364(2008)134:11(831)).
- [15] Kank Sik Wei, Causes, Effects And Methods Of Minimizing Delays In Construction Projects, Faculty of Civil Engineering, University Technology Malaysia. 2010.
- [16] C. Charoenngam, S. T. Coquinco and B. H. W. Hadikusumo, Web-based application for managing change orders in construction projects. *Construction Innovation*, 3(4), 197-215, 2003. <https://doi.org/10.1108/14714170310814936>.
- [17] A. S. Alnuaimi, R. A. Taha, M. Al Mohsin, and A. S. Al-Harhi, Causes, effects, benefits, and remedies of change orders on public construction projects in Oman. *Journal of construction engineering and management*, 136(5), 615-622, 2010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.19437862.0000154](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.19437862.0000154)
- [18] T. R. Taylor, M. Uddin, P. M. Goodrum, A. McCoy and, Y. Shan, Change orders and lessons learned: Knowledge from statistical analyses of engineering change orders on Kentucky highway projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 138(12), 1360-1369, 2012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.19437862.0000550](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.19437862.0000550).
- [19] O. U. Jadhav and A. N. Bhirud, An analysis of causes and effects of change orders on construction projects in Pune. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 3(6), 2015.
- [20] The PMI Standards Committie, *A Guide to The Project Management Body of Language*, 2017 edition, Newtown Square, Pennsylvania, USA, 2017.
- [21] G. A. Caupin, *Vision of the PM Competence*, VI. Project Management International Seminar, Sao Paulo, Brazil, October 4-6, 2006.
- [22] International Project Management Association, *Building Bridges Worldwide Between People and Competences*, 2017.
- [23] CMAA, *Construction Management Association of America, Standard CM Services and Practice*. 2nd Edn., Reston, VA, 1993.
- [24] PRINCE2, *Process Map*, 2020, <https://www.prince2.com/eur/downloads>
- [25] IPMA, *International Project Management Association*, 2020. <https://www.ipma.world/integrated-project-delivery-ipd-an-action-guide-for-leaders/>
- [26] PMCC, *Project Management Professionals Certification Center, P2M: A Guidebook of Project and Program Management for Enterprise Innovation*, Tokyo, Japan, 2008.
- [27] S. O. Revay, *Coping with Extras*, The Revay Report., 21(2), 2002.
- [28] A. T. Baxendale and T.J. Schofield, *Planning and progressing project variations in;* D.A. Lagfield and A. Retik, eds. *The organization and management of construction: Shaping theory and practice*, London: E& FN SPON. 2, 1986.
- [29] D. Turner, *Standard Contracts for Building*, George Godwin, England, 1984.
- [30] P. Galloway, *Cumulative impact*. Nielsen-Wurster Communique, 2(6), 2007.
- [31] H. Mokbel, G. Salazar, *Assessing the parametric building model capabilities in minimizing change orders*, WIT Press, 73, 2004.
- [32] P. Keane, B. Sertyesilisik, A.D. Ross, *Variations and change orders on construction projects*. *Journal of legal*

- affairs and dispute resolution in engineering and construction. May, 2(2), 89-96, 2010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LA.19434170.0000016](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LA.19434170.0000016).
- [33] F. M. Arain, L.S. Pheng, The potential effects of variation orders on institutional building projects. Facilities. Sep 1, 2005.
- [34] E. Boot, Change order management. School planning and management, 5(1), 2005.
- [35] M. T. Callahan, Construction Change Order Claims. Aspen Publishers Online, 2005.
- [36] J. J. O'Brien, Construction change orders: impact, avoidance, documentation. McGraw Hill Professional, 1998.
- [37] E. R. Fisk, W. D. Reynolds, Construction project administration. Wiley, 1988.
- [38] A. Senouci, A. Alsarraj, M. Gunduz, N. Eldin, Analysis of change orders in Qatari construction projects, International Journal of Construction Management. 17(4), 280-92, 2017. <https://doi.org/10.1080/15623599.2016.1211973>.
- [39] R. H. Clough, G. A. Sears, S. K. Sears, Construction project management. John Wiley & Sons, 2000.
- [40] T. Y. Hsieh, S. T. Lu, C. H. Wu, Statistical analysis of causes for change orders in metropolitan public works. International Journal of Project Management. Nov 1, 22(8), 679-86, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2004.03.005>.
- [41] A. A. Zeitoun, G. D. Oberlender, Early warning signs of project changes. Construction Industry Institute, 91, 1993.





Dönel kavşaklarda meydana gelen dengesiz akımlara bir çözüm önerisi olarak kısmi denetimli sinyalize dönel kavşaklar: Bir literatür araştırması

Roundabout metering as a solution proposal to roundabouts with unbalanced flows: A literature study

Hakan Ordu^{1,*} , Ufuk Kırbaş² 

¹ Karayolları Genel Müdürlüğü, Strateji Geliştirme Daire Başkanlığı, Stratejik Planlama Şube Müdürlüğü, 06100, Ankara, Türkiye

² Ondokuz Mayıs Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 55139, Samsun, Türkiye

Özet

Karayolu ağlarında büyük öneme sahip olan kavşaklar, çeşitli özelliklerine göre kategorilere ayrılır. Hemzemin kavşak tiplerinden biri olan dönel kavşaklar yirminci yüzyılın başından itibaren kullanılmaktadır. Modern dönel kavşaklar, ada etrafında dönen araca yol ver kuralı ve yüksek güvenliğe sahip geometrisi ile yaklaşım kollarından katılan araçların düşük ve sabit hızla hareketini sağlar. Bu nedenle modern dönel kavşaklar, son yıllarda özellikle kentsel kavşaklarda tercih edilmektedir. Ancak bu kavşak tipi, yaklaşım kollarındaki dengesiz akımlara karşı hassas olduğundan, bu şartlar altında kavşağa katılmak isteyen araçlar arasında gerekli olan boşluğu sağlayamaz ve kavşak kollarında gecikmeler ve kuyruklanmalar oluşur. Meydana gelen aşırı gecikme ve kuyruklanma sorunlarının azaltılması amacıyla kısmi denetimli sinyalize dönel kavşaklar bir çözüm seçeneği olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu makalede, kısmi denetimli sinyalize dönel kavşakların kavşak performansı üzerindeki etkisi mevcut literatür ışığında incelenmiştir. Bu çalışmada dönel kavşakların performanslarını değerlendirmek için temel parametre olarak gecikme kullanılmış, ayrıca çevresel ve ekonomik etkilere de değinilmiştir. İncelenen çalışmalarda, kısmi denetimli sinyalize dönel kavşakların çeşitli akım talepleri altında başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu sebeple kısmi denetimli sinyalize dönel kavşakların ülkemizde bulunan dönel kavşakların geometrileri ve yerel sürücü davranışları gibi değişkenler de göz önünde bulundurulması kaydıyla bir seçenek olarak değerlendirilmesi gerektiğinden bahsedilmiştir.

Anahtar kelimeler: Dengesiz akım, Dönel kavşak, Emisyon, Gecikme, Sinyalizasyon, Trafik simülasyonu, Yakıt sarfiyatı

1 Giriş

Ülkemizde ve dünyada hızlı bir şekilde artış gösteren nüfus ve buna paralel olarak gelişim gösteren ekonomik faaliyetler ve artan hususi araç sahipliği, ulaşım ağlarının da gelişmesine neden olmuştur. Böylece karayollarında seyreden araç sayısı da hızla artmıştır. Trafikte bulunan çok sayıda araç ve gelişen yol ağları, günümüz trafiğinin en çok sorun oluşturan alanlarından birini de ortaya çıkarmıştır:

Abstract

Intersections have significant effect in highway networks and are categorized according to their various characteristics. Roundabouts, one of the types of at-grade intersections, have been using since the beginning of the twentieth century. Modern roundabouts are common in recent years, especially in urban intersections, thanks to the give way rule to circulating vehicles around the island and its geometry that provides high safety by ensuring low and constant speed movement of the vehicles joining from the approaches. However, this type of intersection is sensitive to unbalanced flow patterns in the approaches, it cannot provide the necessary gap to the vehicles that want to join the intersection under these conditions hence delays and queues occur in the intersection legs. In order to reduce emerged excessive delay and queuing problems, roundabout metering has started to be used as a solution option. In this article, the effect of roundabout metering on intersection performance is examined in the light of the available literature. In this study, delay was used as the primary parameter to evaluate the performance of roundabouts, also environmental and economic impacts were mentioned. In the investigated studies, it was seen that roundabout metering shows successful results under several flow patterns. Thus, it was mentioned that roundabout metering should be considered as an option by taking factors into account such as the geometry of the roundabouts in Turkey and local driver behaviors.

Keywords: Delay, Emission, Fuel consumption, Roundabout, signalisation, Traffic simulation, Unbalanced flow

Kavşaklar. Kavşaklar; iki veya daha fazla karayolunun kesiştiği, birleştiği veya ayrıldığı noktalar olarak tanımlanır. Ayrıca kavşaklar, bu yollar arasındaki dönüş hareketlerini de kapsamaktadır. Böylece daha az sayıda karayolu ile çok fazla erişim sağlanmaktadır. Kavşaklar; çeşitli özelliklerine göre yolun kapasitesi, hizmet seviyesi gibi birçok parametreyi doğrudan etkilediğinden karayolu ağları içinde çok önemli bir yer tutar [1]. Kavşaklar, farklı trafik akımlarının

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: hakanordu7@gmail.com (H. Ordu)

Geliş / Recieved: 01.02.2021 Kabul / Accepted: 05.05.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.872504

birbiriyle etkileşime girdiği noktalar olduklarından trafik güvenliği yönünden de önem taşımaktadır. Karayolları Genel Müdürlüğü'nün yayımladığı Trafik Kazaları Özeti adlı rapora göre, 2019 yılında gerçekleşen 174.896 ölümlü ya da yaralanmalı kazanın 65.681 tanesi kavşaklarda meydana gelmiştir [2]. Bu da yaklaşık %38'lik bir orana tekabül etmektedir. Amerika Birleşik Devletleri'nde ise ölümlü ve yaralanmalı kazaların yarısından fazlası kavşaklarda ya da kavşağa yakın noktalarda gerçekleşmektedir [3]. Avrupa Komisyonu'nun 2018'de yayımladığı Yıllık Kaza Raporu'na göre ise Avrupa Birliği ülkelerinde 2016 yılında yaşanan ölümlü trafik kazalarının yaklaşık %15'i kavşak noktalarında gerçekleşmiştir [4]. Sayısal veriler de dikkate alındığında kavşakların gerek karayolu ağlarından sorumlu idareler gerek mühendisler gerekse de karayollarını kullanan sürücüler ve yayalar tarafından ne kadar önemli olduğu ortaya çıkmaktadır.

Karayolu ağlarının önemli bir parçası olan kavşaklar, temel olarak iki gruba ayrılabilir:

- Eşdüzey Kavşaklar
- Farklı Seviyeli Kavşaklar

Eşdüzey kavşaklar, iki veya daha fazla karayolunun aynı düzlemde kesişmesi sonucu oluşan kavşaklardır. Bu tip kavşaklarda dört çeşit trafik hareketi bulunabilir. Bunlar;

1. Ayrılma
2. Katılma
3. Kesişme
4. Örüme

olarak sıralanabilir [5].

Eşdüzey kavşaklarda oluşabilecek bu trafik hareketleri, trafik güvenliği adına risk oluşturabilmektedir. Bu sebeple eşdüzey kavşakların iyi bir şekilde tasarlanması büyük önem arz etmektedir. Bu sorunların ortaya çıkarabileceği kazaları azaltmak için eşdüzey kavşak çeşitlerinden biri olan dönel kavşaklar ön plana çıkmaktadır.

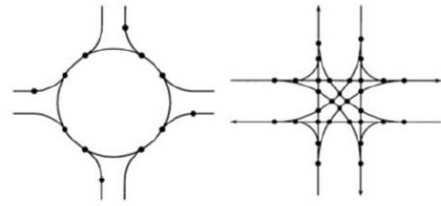
Dönel kavşaklar, araçların genellikle dairesel bir ada etrafında dönüp istedikleri yöne hareket etmelerini sağlayan eşdüzey kavşaklardır. Dönel kavşakların tarihine bakıldığında bu kavşak türü, ilk olarak 1905 yılında New York'ta kullanılmış ve ABD geneline yayılmıştır. Fakat trafik çemberlerinin yüksek hızlı katılma ve ölümlere müsaade etmesi, fazla kazanın yaşanması ve tıkanıklık gibi sorunlar nedeniyle 1950'lerin ortalarından itibaren gözden düşmüştür. Ancak 1960'larda Birleşik Krallık'ta ada etrafında dönen araca yol ver kuralıyla birlikte modern dönel kavşaklar ortaya çıkmış, birçok ülkede yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [6].

Modern dönel kavşaklar, trafik çemberleriyle kıyaslandığında bazı farklılıklar barındırır. AASHTO'nun [7] bahsettiği üzere bu farklar şu şekildedir:

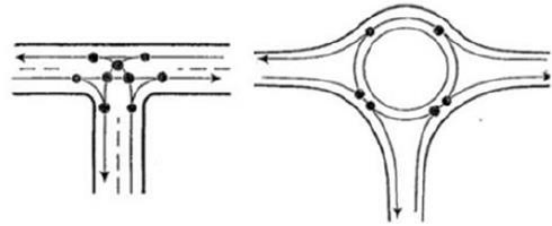
1. Yol Ver: Yol ver kuralı, ada etrafında dönen araçların geçiş hakkına sahip olmasını ve yaklaşım kolundan katılacak tüm araçların dönen akımda bir boşluk beklemesini gerektirir. Serbest akımı ve yüksek kapasiteyi korumak için giriş kontrolü olarak yol ver tabelaları kullanılır.

2. Giriş Sapması: Modern dönel kavşaklarda hiçbir trafiğin dönel kavşak boyunca düz bir yol izlemesine izin verilmez. Bunun yerine giriş trafiği, merkez ada tarafından uygun bir kavis ile sağa saptırılır.

Modern dönel kavşaklar, geleneksel kavşak tasarımlarına göre daha az çakışma noktasına sahip olduklarından trafik güvenliğine pozitif etkiye bulunmakta ve böylece kaza sayısını ciddi derecede azaltmaktadır. Şekil 1 ve Şekil 2'de, üç ve dört kollu modern dönel kavşakların ve geleneksel kavşakların çakışma noktaları gösterilmiştir. Şekil 1'de görüldüğü üzere dört modern dönel kavşaklar, geleneksel dört kollu kavşaklarda oluşan 32 çakışma noktasını 8'e indirmiştir. Şekil 2'de ise üç kollu modern dönel kavşaklar, geleneksel üç kollu kavşaklarda oluşan 9 çakışma noktasını ise 6'ya indirmiştir. Ayrıca, modern dönel kavşakların trafik kazalarına olan etkisi hakkında çeşitli çalışmalar yapılmış ve etkinlikleri değerlendirilmiştir. Çalışmalar incelendiğinde modern dönel kavşakların trafik kazalarını azaltma üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmüştür [9-11].



Şekil 1. Dört kollu bir dönel kavşak ve geleneksel bir dört kollu kavşakta çakışma noktaları [1]



Şekil 2. Üç kollu bir geleneksel kavşak ve üç kollu bir dönel kavşakta çakışma noktaları [8]

2 Dönel kavşaklarda dengesiz akım sorunu

Modern dönel kavşaklar, sinyalizasyon kavşaklarına göre araçlar için daha az dur kalk ve kuyruklanma sağlayarak verimliliği, trafik güvenliğini ve çevresel faydaları artırır. Böylece işletim ve bakım maliyetlerini de düşürerek kavşak operasyonlarında iyileşme sağlar [12]. Ancak kavşak kollarındaki akım dengesiz olduğu durumlarda dönel kavşakta kapasite sorunu ortaya çıkabilir ve kapasiteyle beraber birçok parametre de etkilenir. Bu şartlar altında modern dönel kavşakların teorik faydaları ortadan kalkacaktır. Bu durum birçok araştırmacının da dikkatini çekmiş ve çeşitli çalışmalarda dönel kavşaklardaki dengesiz akım sorunundan bahsetmişlerdir.

Huddart [13], bir dönel kavşağın düzgün çalışmasının giriş akımları arasında makul bir denge olmasına bağlı olduğunu söylemiş, yaklaşım kollarındaki trafik akımlarında bu denge yoksa dönel kavşağın kapasitesinin sınırlı olduğunu ve bu durumun özellikle bir yaklaşım kolundan gelen yoğun ve kesintisiz bir trafik akımına bu koldan hemen önceki kolda hafif bir trafik akımı eşlik ediyorsa geçerli

olduğundan bahsetmiştir. Ayrıca kesintisiz ama çok yoğun olmayan bir sirkülasyon trafiğinin, belirli bir yaklaşım kolundaki akımın kavşağa katılımını önemli bir şekilde engelleyecek bir başka durum olduğunu da belirtmiştir.

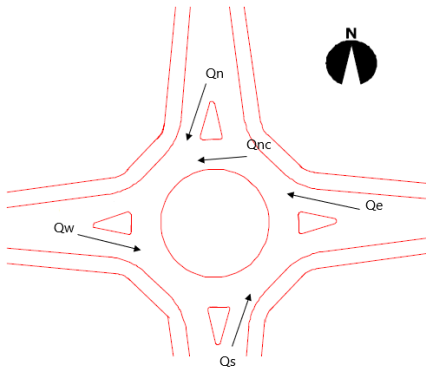
Krogscheepers ve Roebuck [14], dönele kavşaklarda dengesiz akımın tipik bir uygunsuz durum olduğunu bahsetmiştir ve şöyle açıklamıştır: “Bir kavşak yaklaşımındaki trafik hacminin, araçların başka bir yaklaşımdan kavşağa girişini etkin bir şekilde engelleyecek kadar yüksek olduğu durumdur. Bu koşullar altında, dönele kavşağı kullanmaya çalışan toplam trafik hacmi çok fazla olmayabilir, ancak yaklaşım kollarındaki hacimlerde bu büyük dengesizlik nedeniyle bazı kollarında aşırı gecikmeler ortaya çıkabilir”. Ayrıca aynı çalışmada dengesiz trafik akımı durumunun sirküle olan akım tarafından oluşturulabileceğinden bahsedilmiş, dönele kavşaklardaki hareketlerin T kavşaklardaki gibi bağımsız olmadığı belirtilmiştir. Çalışmada, dengesiz akımı tanımlayacak bir formül geliştirilmiştir. Bu formüle göre dengesizlik rasyosu (ρ_n) kuzey yaklaşım kolu için (ρ_n) **Denklem (1)**'deki gibi hesaplanır:

$$\rho_n = \frac{Q_{wn}}{Q_{wn} + Q_{sn} + Q_{en}} = \frac{Q_{wn}}{Q_{nc}} \quad (1)$$

$$Q_{nc} = Q_{wn} + Q_{sn} + Q_{en}$$

Q_{wn} = batıdan kuzeye giden trafik
 Q_{sn} = güneyden kuzeye giden trafik
 Q_{en} = doğudan kuzeye giden trafik

Dengeli bir yaklaşım kolunda (ρ_n) değeri 0,5' e eşit olur. Dengesiz akıma sahip kolda bu değer 0 veya 1' dir. Bu akımlar **Şekil 3**'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Dengesiz akımların tanımı [14]

Tunç [15] bu konuyu şöyle açıklamıştır: “Anayolun trafik hacmi ve tali yoldaki trafik hacmi arasında çok büyük fark varsa, tali yoldan kavşağa giren araçlar örülme için yeterli aralık bulamayacak veya örülme trafiğinin artması ile anayol trafiğinde gecikmeler artacaktır”.

Akçelik [16] ise bu konu hakkında “Çoğunlukla tek bir yaklaşımdan kaynaklanan baskın sirküle akımlar, kavşağa giriş kapasitesini azaltır” ve “Dengesiz akımlar, genel talep seviyesi düşük olduğunda sorun olmayabilir, ancak sorun orta talep seviyelerinde bile ortaya çıkar. Talep akım seviyeleri, bir dönele kavşağın uygulanmasından sonra, bazen nispeten kısa bir süre içinde önemli ölçüde değişebilir, çünkü sinyalizasyon kavşaklardan farklı olarak dönüş hareketleri üzerinde doğrudan bir kontrol yoktur” demiştir.

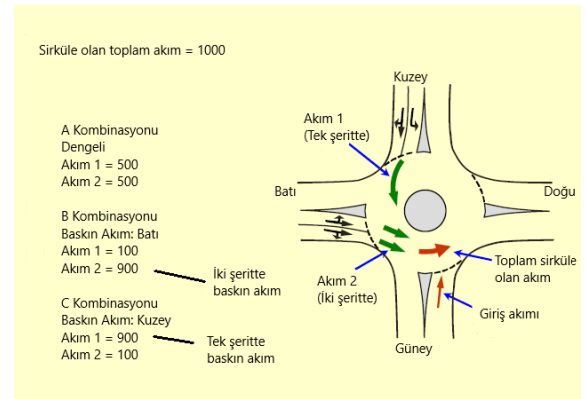
Aydemir ve Tanyel [17], yaptıkları çalışmada “Yaklaşım kollarının birinden gelen akım talebinin diğer yaklaşım kollarına kıyasla fazla olması halinde bu durum kavşak kapasitesi üzerinde ciddi bir etkiye sahiptir” sonucuna varmıştır.

Batı Avustralya Karayolları İdaresi (MainRoads) [18], Kavşak Kontrolü Seçimi Rehberi'nde dengesiz akım sorunu yer vermiş ve dönele kavşakların performansını dengesiz akımlara karşı hassas olduğunu, bu durumun baskın bir yaklaşım kolundan gelen trafiğin başka bir yaklaşım kolunda bulunan trafiğin dönele kavşağa girmesini engellediği durumlarda oluşabileceğini ve bu şartlar altında kuyruklanma ve gecikme sorunlarının meydana gelebileceğini söylemiştir.

MainRoads'a [18], göre, dönele kavşakta dengesiz akım sorununu ortaya çıkaran baskın trafik akımı şunlardan biri olabilir:

- Kesintisiz, yoğun bir trafik akımı
- Tali yaklaşım kolundan gelip geçiş hakkını edinmiş olan, düşük ancak sürekli bir akım.

Akçelik'in [16] görselleştirdiği dengesiz akım kombinasyonlarına **Şekil 4**'te yer verilmiştir:



Şekil 4. Dengesiz akım kombinasyonları [16]

3 Dönele kavşaklarda sinyalizasyon

Dönele kavşaklarda oluşan dengesiz akım sonucu ortaya çıkan kapasite problemleri veya meydana gelen trafik güvenliği sorunlarını çözmek adına dönele kavşaklarda trafik ışıkları kullanımı fikri ortaya çıkmıştır. Sinyalizasyon, dönele kavşakların doğasına uygun olmasa da dengesiz akım ve yüksek sirkülasyon hızı gibi problemlere çözüm olabilir. Stevens [19], çalışmasında dönele kavşakların sinyalizasyonunun kazanımlarını şu şekilde özetlemiştir:

- Daha kısa gecikmeler: Sinyalizasyon olmayan dönele kavşaklardaki gecikmeler, dengesiz akımlar veya diğer

kavşaklarla etkileşimler nedeniyle artar. Sinyalizasyon, gecikmeleri dengelemek için kullanılabilir.

•Daha kısa kuyruklar: Dengesiz akımla kuyruklar çok uzun hale gelebilir, bazen diğer kavşaklara veya yollara kadar uzayabilir. Sinyalizasyon, ilgili kola geçiş hakkı sağlayarak kuyrukları azaltabilir.

•Kapasitede artış: Aşırı miktarda trafik bir dönel kavşağa giriyorsa, trafik serbestçe dolaşamayabilir ve bazen kilitlenebilir. Trafığın aşırı olduğu durumlarda, trafik sinyalleri bu durumu iyileştirebilir.

•Güvenlik: Dönel kavşaktaki sirkülasyon hızının yüksek olduğu durumlarda, diğer kollardaki araçlar kavşağa katılacak boşluğu bulamazlar. Trafik sinyalleri, dönel kavşağın girişini ve bazen çıkışını daha iyi düzenler, örülme ve katılma hızlarını azaltır, sürücülerin tepki vermesi için daha fazla zaman tanır ve dönel kavşakta güvenliği artırır.

Sinyalize dönel kavşaklar ilk olarak 1959 yılında İngiltere’de kullanılmış ancak kullanımı İngiltere’de özellikle 1990’dan sonra artış göstermiştir. Ayrıca dönel kavşakların sinyalizasyonu çeşitli şekillerde Hollanda, Almanya, İsveç, İrlanda, Belçika, Fransa, Türkiye, Danimarka, Slovenya, Polonya gibi Avrupa ülkelerinde, Amerika Birleşik Devletleri’nde ve Avustralya’da da kullanılmaktadır [20, 21]. Modern dönel kavşakların sinyalize olarak tasarlanması uygun bir durum olmasa da beklenmedik akım taleplerine karşı sinyalizasyon uygulanabilir [6].

Tablo 1’de, Hallworth’un [22], sinyalize dönel kavşaklar için kullanılan sinyalizasyon yöntemlerini özetlediği ve Natalizio [23] tarafından tablolandırılmış sınıflandırma gösterilmiştir.

Tablo 1. Dönel kavşak kontrol yöntemleri

Tasarım Parametresi	Seçenek	Açıklama
1.Kontrol Çeşidi	Doğrudan	Tüm iç ve dış yaklaşımların sinyalizasyonu (Tüm çatışma noktaları kontrol edilir)
	Dolaylı	Dış trafik yalnızca giriş noktasından belli bir mesafedeki sinyallerle kontrol edilir; sirküle olan trafik kontrol edilmediğinden önceliği vardır
2.Tam Zamanlı/Kısmi Zamanlı	Tam	Sinyalizasyon daima çalışır
	Kısmi	Kısmi zamanlıdır, zamanlayıcı ya da kuyruk detektörü vasıtasıyla açılır.
3.Tam Kontrol/Kısmi Kontrol	Tam	Tüm kollar sinyal kontrollüdür.
	Kısmi	Bir ya da daha fazla kol öncelik kontrollüdür.

Kavşak kollarının tamamının sinyalizasyonu yerine özellikle yoğun talep olan bir yaklaşım kolunda sinyalizasyon kullanmak çoğu durumda yeterli olabilir [19]. Bu şartlar altında kullanılmak amacıyla ortaya çıkan kısmi denetimli sinyalize dönel kavşaklar ile tüm kolların sinyalize edildiği bir kavşağa alternatif sunulmakta ve hem gereksiz gecikmeleri azaltmak hem de daha ekonomik bir çözüm yardımıyla mevcut problemlerin önlenmesi hedeflenmektedir. Bu yöntem özellikle Avustralya’da kullanılsa da Yeni Zelanda ve Amerika Birleşik Devletleri’nde de örnekleri mevcuttur [24-29].

4 Kısmi denetimli sinyalize dönel kavşaklar

Kısmi denetimli sinyalize dönel kavşaklar, dengesiz akımların neden olduğu aşırı kuyruklanma ve gecikmeleri sirküle olan akımda boşluklar oluşturarak engeller. Bu sayede geciken kol kavşağa katılabilir [30]. Özellikle sinyalizasyon ihtiyacı kısa süreli olduğunda geometrik iyileştirmelerden daha ekonomik bir çözüm olabilir [31]. Bu sebeple, kısmi denetimli sinyalize dönel kavşaklar genellikle yönsel akımların yoğunlaştığı zirve saatlerde kullanılır. VicRoads [32], bu yöntemin aşağıdaki faydaları sağladığını belirtmiştir:

1-) Makul öncelik paylaşımı için zirve akımların düzenlenmesi.

2-) Yaklaşım kolları arasında daha iyi kuyruk ve gecikme dengesi sağlama.

3-) Bir dönel kavşağın değiştirilmesi yerine ömrünü uzatma.

Ayrıca VicRoads [32], kısmi denetimli sinyalize dönel kavşaklar hakkında “Zaman içinde değişen trafik akımları nedeniyle sorunlar ortaya çıktığında kısa vadeli bir düzeltme aşaması olarak kabul edilirler ve bu sebeple belirli bölgelerde trafiği proaktif olarak yönetmek için yeni bir dönel kavşak kontrolünün parçası olabilirler” demiştir.

4.1 Kısmi denetimli sinyalize dönel kavşak elemanları

Kısmi denetimli sinyalize dönel kavşaklar, temel olarak iki bileşenden oluşur: Kuyruk detektörü ve sinyalizasyon. Kuyruk detektörü, aşırı gecikme ve kuyruklanmadan etkilenen yaklaşım koluna yerleştirilir ve bu kola kontrol kolu adı verilir. Bu detektör, tıkanıklık nedeniyle oluşan aşırı kuyruklanmanın oluşumunu tespit etmek için kavşağın girişinden belli bir mesafe geriye yerleştirilmelidir. Bu mesafe saha gözlemlerine göre değişebilecek olmakla birlikte, genellikle 50-120 m arasındadır. Kritik kuyruk uzunluğu algılandığında, kuyruk detektörü vasıtasıyla sinyalizasyon etkinleştirilir.

Sinyalizasyon, genellikle yoğun trafik akımının katılımını engelleyen yaklaşım koluna yerleştirilir ve bu kol da sinyalize kol olarak tanımlanır. Detektör ile etkinleştirilen sinyalizasyon sayesinde bu akıma kırmızı ışık yanar ve akımın kavşağa girişi engellenir. Böylece sirküle olan akımda boşluk oluşturulur ve gecikme yaşayan kolun kavşağa katılması sağlanır. Bu sayede dönel kavşaktaki ortalama gecikme azalır. Kırmızı ışık söndüğünde ise dönel kavşak geleneksel halde yönetilir. Dönel kavşak girişinde bulunan yol ver tabelası ile trafik sinyalleri arasında yeterli boşluk sağlamak adına sinyalizasyon, dönel kavşak dur çizgisinden 15-20 m önce yerleştirilir, böylece sürücüde meydana gelebilecek kafa karışıklığı önlenmeye çalışılır [31, 33].

Kısmi denetimli sinyalize dönel kavşakların sinyalizasyonunda genellikle iki renkli sinyal kullanılır: Sarı ve kırmızı. Detektör, sinyalizasyonu etkinleştirdiğinde önce sarı ışık sonra da kırmızı ışık yanar. Sinyalizasyonun gerekmediği zamanlarda hiçbir ışık yanmaz (boş süre). Bazı saha uygulamalarında kırmızı ışıkla birlikte yeşil ışık kullanılmıştır [27]. Ayrıca Yeni Zelanda Ulaştırma Ajansı da kısmi denetimli sinyalize dönel kavşakların sinyalizasyonunda yeşil ışığa yer vermiştir [34]. Ancak yeşil

ışık, konvansiyonel sinyalizasyonda geçiş hakkı anlamına geldiğinden sürücülerde kafa karışıklığı yaratabilir. Çünkü bu sistem herhangi bir kola geçiş hakkı vermez. Araçlar kavşağa geldiklerinde modern dönel kavşak kurallarına uymak zorundadır. Bu sebeple yeşil ışık kullanımında dikkatli olunmalıdır. Ayrıca yine kafa karışıklığını engellemek adına, sinyalizasyonun bulunduğu noktaya kırmızı ışıkta dur tabelası yerleştirilir [18].

Boş sinyal süresi, minimum boş zaman gereksinimine göre belirlenir veya sinyalizasyon yaklaşım kolunda detektör kullanılıyorsa sinyalizasyon yaklaşım kolu trafiği tarafından uzatılır. Kırmızı sinyalin başlangıcı ve süresi ise kontrol yaklaşım kolu trafiği tarafından belirlenir. Akçelik [35] ve Fortuijn [36] çalışmalarında kısmi denetimli sinyalizasyon dönel kavşaklar için sinyalizasyon operasyonunun detayları için yaklaşımlarını açıklamıştır. Akçelik [35], kısmi denetimli sinyalizasyon dönel kavşakların süre analizinin SIDRA Intersection'da kullanılan genel sinyal süresi yöntemlerinin basit bir uygulaması olduğunu söylemiştir. Buna göre kısmi denetimli sinyalizasyon dönel kavşaklarda devre süresi şu şekilde hesaplanır:

$$C_M = F_R + F_B = T_R + I_R + T_B + I_B = R_M + G_M + t_{yB} \quad (2)$$

TR = Denetleyici Kırmızı Süresi

TB = Denetleyici Boş Süresi

FR = TR + IR = Kırmızı Faz Süresi

FB = TB + IB = Boş Faz Süresi

RM = Gösterilen Kırmızı Süre (sürücüler tarafından görünen)

GM = TB = Gösterilen Boş Süre (sürücüler tarafından görünen)

tyB = Boş Faz için Sarı Süre

IR = Kırmızı Faz için Yeşillerarası Süre

IB = Boş Faz için Yeşillerarası Süre.

Fortuijn [36] ise sabit süreli kırmızı sinyal için şu formülü önermiştir:

$$RT_{sabit} = \left(\frac{LAD}{LV} \right) \times t_F + t_C - v_r/a_0 \quad (3)$$

LAD = Talep detektöründen dönel kavşağa olan mesafe (m)

LV = Kuyruktaki araçlar arasındaki ortalama mesafe (tampondan tampona) (m)

tF = Takip aralığı (s)

tC = Kritik boşluk (s)

v_r = Dönel kavşaktaki hız (m/s)

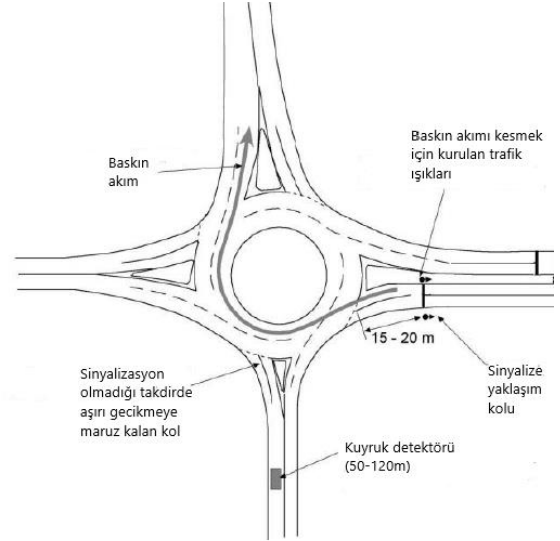
a₀ = Hızlanma ivmesi. (m/s²)

Önerilen bu formüller dışında sinyal süreleri için gerçek saha verilerini kullanarak dinamik çözümler sağlayan ve sabit bir devre süresi içermeyen adaptif (uyarlamalı) sinyalizasyon sistemleri kullanılabileceği gibi referans değerler göz önünde bulundurularak en iyi sonucu veren değerler de seçilebilir.

Kısmi denetimli sinyalizasyon dönel kavşakların amacı kavşağın ortalama gecikmesini düşürmektir. Ancak kırmızı

ışık kullanımı sebebiyle sinyalizasyon kullanılan kolun gecikmesinin artacağı açıktır. Bu nedenle, sinyal sürelerinin ve detektörün kurulacağı yerin iyi tespit edilmesi çok önemlidir.

Şekil 5'te ve Şekil 6'da kısmi denetimli bir sinyalizasyon dönel kavşak örneklerine yer verilmiştir.



Şekil 5. Kısmi denetimli sinyalizasyon dönel kavşak [37]



Şekil 6. Avustralya'da kısmi denetimli bir sinyalizasyon dönel kavşak [38]

5 Materyal ve yöntem

Çalışmanın bu bölümünde, kısmi denetimli sinyalizasyon dönel kavşaklar hakkında literatür taranmış ve incelenmiştir. Bu değerlendirmede, literatürde yer alan çalışmalar çeşitli özelliklerine göre sınıflandırılmış, bu çalışmalarda kullanılan programlardan bahsedilmiş, kısmi denetimli sinyalizasyon dönel kavşakların gecikme üzerine etkisi ve ekonomik ve çevresel katkılarına yer verilmiştir.

6 Kısmi denetimli sinyalizasyon dönel kavşaklar üzerine yapılan çalışmalar

6.1 Çalışmalarda kullanılan programlar

Kavşakların değerlendirilmesi adına piyasada birçok program bulunmaktadır. Bu programlar ile kavşakların performansları hakkında çok kapsamlı bilgiler edinilebilir.

Söz konusu trafik analiz programlarını genel olarak iki gruba ayırmak mümkündür. Bunlar;

1-) Analitik modeller

2-) mikro simülasyon modelleri [39]

Her iki grupta yer alan programlar trafik akım teorilerine dayanmaktadır. Ancak bu programlar analiz için farklı varsayımlar ve parametreler kullanır. Örneğin analitik bir model olan SIDRA değerlendirme için temel girdi olarak şerit kapasitelerini kullanırken; VISSIM, AIMSUN, PARAMICS gibi mikro simülasyonlarda yol kapasiteleri araç - sürücü - yol bileşeni etkileşim parametrelerine dayanır Tablo 2’de bu literatür araştırmasına konu olan çalışmalarda kullanılan programlara yer verilmiştir. Tabloda da görüldüğü üzere araştırmacılar çeşitli programlar kullanmıştır. Araştırmacılar her ne kadar çeşitli programlara yönelik değerlendirme adına farklı parametreler ve varsayımlar kullansalar da titiz bir biçimde kalibre edilmiş veriler kullandıkları takdirde bu programlar çok farklı sonuçlar sunmayacaktır [40].

Tablo 2. Çalışmalarda kullanılan programlar

Çalışma	Program
Akçelik[16, 25, 33, 35, 41]	SIDRA Intersection
Abdelfatah ve Alozn[42]	SIDRA Intersection
Natalizio [23]	aaSIDRA(Daha sonradan SIDRA), Microsoft Excel
An vd. [40, 43]	SIDRA Intersection, AIMSUN
Mosslemi [44]	AIMSUN
Geers vd. [45]	PARAMICS
Fortuijn [36]	PTV VISSIM
Buasali [46]	PTV VISSIM
Hummer vd. [47]	PTV VISSIM, Synchro
Martin-Gasulla vd. [48, 49]	PTV VISSIM
Duan vd. [50]	PTV VISSIM
Mahmood [51]	PTV VISSIM
Ma vd. [52]	PTV VISSIM
Fernandes vd. [53]	PTV VISSIM

6.2 Dönel kavşakların özellikleri

Dönel kavşaklar genellikle üç veya dört kollu tasarımlar ve genellikle dörtten fazla kollu olmaları tercih edilmez. Bu sebeple araştırmacılar da genellikle üç ya da dört kollu kavşaklar üzerinde çalışmışlardır. Ancak Sides [24], çok sayıda kavşağın yerine kurulan ve altı koldan oluşan Florida Clearwater Beach dönel kavşağında kısmi denetimli sinyalizasyon dönel kavşak yöntemi kullanıldığını belirtmiş ve sayısal sonuçlara fazlaca yer vermese de muntazam bir başarı elde edildiğinden bahsetmiştir. Martin-Gasulla vd. [48, 49] çalışmalarında dört kollu bir dönel kavşağın yanı sıra lokal bir yola bağlanan ve çok az trafiği olan beşinci bir kola sahip bir dönel kavşağı da kullanmışlardır. Mahmood [51] ve Ma vd. [52] ise Amerika Birleşik Devletleri’nde

bulunan sekiz kollu bir dönel kavşağı çalışmalarında konu edinmiştir. Çalışmaların çoğunda kısmi denetimli sinyalizasyon dönel kavşakların, kavşak kol sayısı arttığında dahi başarılı sonuçlar verdiğinden bahsedilmiştir.

Çalışmalara konu olan dönel kavşaklar, bir, iki ya da üç şeritlidir. Fortuijn [36] kısmi denetimli sinyalizasyon dönel kavşak yönteminin iki şeritli dönel kavşaklarda küçük akıma sahip kolun kapasitesini % 15 ile %45 artıracak ve ağır yüklü durumlarda tüm dönel kavşakta bekleme süresini % 20 ile % 50 azaltacağını bildirirse de tek şeritli dönel kavşakların kapasitesi üzerine bir etkisi olmadığına dair göstergeler olduğundan bahsetmiş, yalnızca tek şeritli dönel kavşaklarda gecikmenin daha dengeli dağıldığını söylemiştir. Fakat bu sonucun aksine Martin-Gasulla vd. [48, 49], tek şeritli dönel kavşaklarda kapasitenin arttığını ve bu artışın, araştırma yapılan dönel kavşaklarda en iyi sinyalizasyon parametreleri kullanıldığında %25 ve %56 olarak gözlemlendiğini ve kapasite artışının çakışan akımın 500 taşıt/saat’i aştığı durumlarda anlamlı olduğunu belirtmiştir. Dahası, Natalizio [23] tek şeritli kısmi denetimli sinyalizasyon dönel kavşaklarda sinyalizasyon kolun doygunluk derecesi 0.6’dan az olduğunda iyi, 0.7’den az olduğunda tolere edilebilir sonuçlar verdiğinden bahsetmiştir. Ayrıca; Natalizio [23], Hummer vd. [47] ve Martin-Gasulla vd. [48] çalışmalarında tek şeritli dönel kavşaklar için kısmi denetimli sinyalizasyon dönel kavşak yönteminin faydalı olabileceği akım kombinasyonlarını belirtmişlerdir. Bunlara ek olarak Hummer vd.’nin [47] çalışmasında iki şeritli dönel kavşaklarda uygulanacak kısmi denetimli sinyalizasyon için uygun akım kombinasyonlarına da yer verilmiştir. Natalizio’nun [23] çalışmasına göre tek şeritli dönel kavşaklarda kısmi denetimli sinyalizasyon, gecikme yaşayan kolun akımı ve bu kolun önünde sirküle olan akımın toplam 1300-1400 taşıt/saat olduğu durumlarda gerekli olur ve bu toplam akım değeri 1550-1650 taşıt/saat değerini geçtiğinde kısmi denetimli sinyalizasyonun etkisi kaybolmaya başlar. Benzer bir çalışma yapan Martin-Gasulla vd. [48] ise kontrol kolundaki akım talebi 800 taşıt/saat değerinin üzerindeyse kontrol kolu ve sirkülasyon akımı talebinin toplamı 1750 taşıt/saat değerini aştığında kısmi denetimli sinyalizasyonun faydalarının ortadan kalktığı sonucuna varmıştır. Çok şeritli dönel kavşaklar üzerine araştırmacılar, kısmi denetimli sinyalizasyon dönel kavşaklar hakkında olumsuz bir görüş belirtmemişlerdir. Araştırmacıların elde ettiği sonuçlara bakıldığında, kısmi denetimli sinyalizasyon dönel kavşakların başarımlarını üstünde kollardan gelen talebin, kollardan akım/kapasite oranının ve yaklaşım kolları önünde sirküle olan akımın önemli olduğu görülmektedir.

6.3 Sinyalizasyon kurulan kol sayısı

Kısmi denetimli sinyalizasyon dönel kavşaklarda genellikle kollardan biri sinyalizasyonla edilebilir. Geers vd. [45] Avustralya’da bulunan üç kollu Yallah dönel kavşağının iki kolunda sinyalizasyon kullanılan bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, kısmi denetimli sinyalizasyon dönel kavşakların gecikmeleri çok ciddi seviyede düşürdüğü belirtilmiştir. An vd. [40] yaptıkları çalışmada kısmi denetimli sinyalizasyon dönel kavşak olarak kullanılan Old Belair Yolu dönel kavşağının

performansı AIMSUN ve Sidra Intersection kullanarak değerlendirilmiş, ayrıca iki kolu sinyalizasyonla edilen kısmi denetimli dönel kavşaklar için kullanılabilecek bir model önerisi sunulmuştur. Mahmood [51] ve Ma vd. [52] çalışmalarında sekiz kolu bulunan dönel kavşağın tüm kollarına detektörler yerleştirmiş, sinyalizasyon olacak kol, kuyruk detektörlerinden gelen yanıtı göre belirlenmiştir. Her iki çalışma sonucunda zirve saatte, gecikmede %30'un üstünde ve ortalama kuyruk uzunluğunda %40'a yakın düşüş gözlenmiştir. Ancak artan dönel kavşak elemanı sayısının, kurulum ve bakım maliyetleri gibi maliyetleri artıracığı göz önünde bulundurulmalı, bu tür uygulamalar yapılmadan önce detaylıca değerlendirilmelidir.

6.4 Detektör yerleşimi ve sinyal süreleri

Detektörün yerleşimi ve sinyal süreleri, kısmi denetimli sinyalizasyon dönel kavşakların başarımını etkileyen en önemli parametrelerdendir. Detektörün yeri doğru şekilde belirlenemediğinde kritik kuyruk tespitinde aksamalar meydana gelebilir ve aşırı gecikmeye maruz kalan yaklaşım kolu, bu yöntemden yeterince faydalanamayabilir. Sinyal süresinin iyi ayarlanmadığı durumlarda ise sinyalizasyon kol aşırı gecikmeye maruz kalabilir. Bu sebepler göz önünde bulundurulduğunda, kısmi denetimli sinyalizasyon dönel kavşakların en iyi performansı gösterebilmesi için uygun detektör yerleşimi ve sinyal süresi seçimi oldukça önemlidir. Bu değerler yöresel faktörlere göre değişiklikler gösterebilir. Akçelik [33, 35], çalışmalarında devre süresi için detaylı analizine yer vermiş, uygun detektör mesafesi aralığından bahsetmiş ve Avustralya'nın Melbourne şehrinde bulunan kısmi denetimli sinyalizasyon dönel kavşaklarda kullanılan parametrelerin bir tablosunu sunmuştur. Fortuijn [36] de çalışmasında detektör yerleşimi ve bu yerleşime göre sabit zamanlı kırmızı sinyal süreleri gibi detaylara yer vermiştir. Ayrıca Akçelik [35], çalışmasında sekiz farklı sinyalizasyon alternatifini kullanmış ve kısa devre sürelerinin uzun devre sürelerine göre daha iyi kavşak performansı sunduğu sonucuna varmıştır. Natalizio [23], tek şeritli dönel kavşaklarda uygulanacak kısmi denetim için en iyi kapasite ve performans sonucu veren parametreleri belirtmiştir. Akçelik [33] ve Natalizio' nun [23], çalışmalarında bahsettiği parametrelere Tablo 3'te yer verilmiştir. Bunun dışında Natalizio [23], aynı çalışmada şu sonuçlara da varmıştır;

•Daha yüksek minimum boş ve kırmızı süreler, daha kısa kuyruk detektörü mesafesine göre kontrol yaklaşımının kapasitesi ve performansı üzerinde daha olumlu bir etkiye sahiptir.

•Daha kısa bir kuyruk detektörü mesafesi, sinyalizasyon yaklaşımın kapasitesi ve performansı üzerinde, daha yüksek minimum boş ve kırmızı süreler için daha az etkiye sahiptir.

6.5 Kısmi denetimli sinyalizasyon dönel kavşakların gecikme üzerine etkisi

Kavşakların performansını değerlendirmek için çeşitli parametreler kullanılmaktadır. Bunların başında ise gecikme gelmektedir. Gecikme, bir kavşağa yaklaşan taşıtın çeşitli sebeplerle kavşakta kaybettiği ve yolculuk süresinin uzamasına neden olan sürelerin toplamı olup kavşak

performansı değerlendirmesinde kullanılan önemli bir parametredir.

Tablo 3. Kısmi denetimli sinyalizasyon kavşakları için önerilen optimum parametreler

Çalışma	Parametre	Önerilen Değer
Natalizio [23]	Kuyruk detektörü mesafesi	60 m
	Minimum boş süre	20 s
	Minimum kırmızı süre	20 s
<i>Sinyalizasyon kol</i>		
Akçelik [33]	Sinyalizasyonun dur çizgisine olan uzaklığı	14-24 m
	Minimum boş sinyal süresi	20-50 s
	Minimum kırmızı sinyal süresi	10-20 s
	Maksimum kırmızı sinyal uzatma süresi	20-60 s
	Detektörün dur çizgisine olan uzaklığı	50-120 s
	Kuyruk detektörü boşluk süresi	3.0-3.5 s
	Kuyruk detektörü işgal süresi	4.0-5.0 s

Gecikmenin yanı sıra hizmet seviyesi, kapasite, kuyruk uzunluğu, yolculuk süresi, durma sayısı, yakıt tüketimi, emisyon değerleri gibi parametreler de kavşakların performanslarını değerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu literatür araştırmasına konu olan çalışmalarda da çeşitli parametreler kullanılmıştır. Ancak, temel olarak performans parametrelerinin hepsinin gecikmeyle ilintili olması ve çalışmaların hemen hemen hepsinde ortak parametre olması sebebiyle bu çalışmada kısmi denetimli sinyalizasyon dönel kavşakların etkinliğini belirtmek için gecikme süreleri baz alınmıştır. Daha önce bahsedildiği gibi Fortuijn [36] çalışmasında iki şeritli dönel kavşaklarda gecikmede %20 ile %50 arasında azalma olacağından bahsetse de tek şeritli dönel kavşaklarda kısmi denetimli sinyalizasyonun kapasite üzerinde bir etkisi olmayacağına dair göstergeler bulunduğunu belirtmiştir. Bunun dışında Buasali [46], yaptığı çalışmada gecikme sürelerinin kararsız hale geldiğini, bazı durumlarda ise artış gösterdiğini ve sinyalizasyonun teorik faydalarının gözlenemediğinden

bahsetmiştir. Abdelfatah ve Alozn [42], çeşitli akım kombinasyonları altında kısmi denetimli sinyalize dönel kavşakların olumlu ve olumsuz etkiler doğurduğunu, yaklaşım kollarından gelen akımların eşit dağıldığında geleneksel dönel kavşakların daha iyi sonuç verdiğini ve bu sebeple yöntemin, sadece bir kolda ana akım olan ve diğer kolların görece düşük akım değerlerine sahip olduğu durumlarda kullanılması gerektiğini bildirmiştir. Akçelik [33] tarafından gerçekleştirilen vaka çalışmasına bakıldığında ortalama gecikmede %20 düşüş gözlenmiştir. Akçelik [35] tarafından gerçekleştirilen bir diğer vaka çalışmasında ise gecikme süresi yıllık bazda yaklaşık %70 azalma göstermiştir. Mosslemi [44], yaptığı çalışmada Norveç'te bir koridoru konu edinmiş ve simülasyon sonucu dengesiz akımdan etkilenen kavşak için en iyi senaryo ile mevcut durum kıyaslandığında gecikmede yaklaşık %90'lık bir iyileşme olduğundan bahsetmiştir. Bu sonucun yanı sıra koridor için de gecikme süresi ve diğer parametrelerde iyileşme görülmüştür. Ancak bu çalışma değerlendirilirken dengesiz akım bulunan kavşakta sinyalizasyonun yanı sıra mevcut durumda bulunmayan bir baypas şeridi kullanılarak geometrik iyileştirmeden de faydalandığı göz önünde bulundurulmalıdır. Geers vd. [45], tek şeritli dönel kavşakta zirve saatte gecikme değerinde %85'e varan azalma gözlemlenmiştir. Hummer vd. [47] gecikmenin tek şeritli ve çift şeritli dönel kavşaklarda sinyalizasyon olmayan duruma göre akım değerlerine bağlı olarak 100 saniye/binek oto'ya varan düşüşler olduğunu belirtmiştir. Martin-Gasulla vd. [48, 49], gecikme değerinin tek şeritli dönel kavşaklarda akım taleplerine bağlı olarak %60'a kadar iyileşme gösterebileceğinden bahsetmiştir. Duan vd. [50], gecikme süresinde %25.7'ye varan düşüş olduğundan bahseden bir çalışma yapmıştır. Mahmood [51] ve Ma vd. [52] ise gecikme süresinde zirve saatte %30'u aşkın düşüş olduğunu belirtmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, birkaç çalışmada olumlu olmayan sonuçlar elde edilse de kısmi denetimli sinyalize dönel kavşaklar, genel olarak kavşaklarda meydana gelen gecikmeyi iyileştirecek sonuçlar sunmuştur.

6.6 Kısmi denetimli sinyalize dönel kavşakların çevresel ve ekonomik etkileri

Kavşaklarda yaşanan zaman kayıpları ulaşımı sekteye uğratmakla birlikte görünmeyen başka olumsuz sonuçlar da doğurur. Yakıt sarfiyatının ve zararlı gazların salınımının artışı bunlar arasında gösterilebilir. Bu çalışmanın bir önceki maddesinde de bahsedildiği üzere, kısmi denetimli sinyalize dönel kavşaklar genellikle gecikme değerlerini iyileştiren sonuçlar vermektedir. Gecikmenin azalmasına bağlı olarak durma süresi, durma sayısı, yolculuk süresi gibi parametrelerde de azalma görülmektedir. Böylece harcanan yakıt ve salınan gaz miktarında da iyileşmeler meydana gelmektedir. Ancak literatürde kısmi denetimli sinyalize dönel kavşakların bu etkilerine pek değinilmemiştir. Yapılan az sayıdaki çalışmaya bakıldığında, Sides [24], yapılan modelleme sonucu projenin ilk 20 yılda atmosfere salınan kirletici gazların 493,456 kg azalacağından bahsetmiştir. Bu konu üstünde çalışan isimlerden olan Akçelik [33], CO₂ salınımında %5'e yakın bir azalma olduğunu bildirmiştir.

Yine Akçelik [35,41], çalışmalarında belirttiği üzere, optimum senaryoda CO₂ salınımında yıllık bazda yaklaşık %23, yakıt sarfiyatında %22'ye varan iyileşmeler gözlemlenmiştir. Ayrıca Akçelik [33, 35, 41], bu çalışmalarda operasyonel maliyetlerde ise sırasıyla %7, %36 ve %38'e yakın düşüş olduğunu belirtmiştir. Fernandes vd. [53], kısmi denetimli sinyalize dönel kavşakların koridorlardaki trafikle ilgili maliyetleri azaltmak üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bunun için Portekiz'in Guimares şehrinde bulunan, dört dönel kavşak ve bir sinyalize kavşaktan oluşan koridor üzerinde çalışmışlardır. Koridorda iki dönel kavşakta kısmi denetimli sinyalizasyon kullanılmıştır. Çalışmada emisyon değerleri ve gürültü maliyeti gibi parametreler araştırılmış, bu değerlerin zararlarını azaltacak optimum kısmi denetimli sinyalize dönel kavşak modeli geliştirilmiştir. Farklı trafik yükleri ve dönüş yüzdeleri senaryoları altında yöntemin başarısı araştırılmış ve sinyalizasyondan önceki ve sonraki durum karşılaştırılmıştır. Çalışmaya göre, mevcut trafik talebi altında, toplam maliyetlerin sinyalizasyonsuz duruma kıyasla %11'e kadar düşüş sağladığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, gürültüye bağlı maliyetlerde de optimum durum altında %11 düşüş gözlemlenmiştir. Bu konu hakkında az sayıda çalışmanın sonuçlarına bakıldığında, kısmi denetimli sinyalize dönel kavşakların çeşitli ekonomik ve çevresel parametrelerde de iyileşme sağladığı sonucuna varılmıştır.

7 Sonuçlar

Kısmi denetimli sinyalize dönel kavşakların performansının incelendiği bu literatür taramasında, kısmi denetimli sinyalize dönel kavşakların genel olarak kavşak performansını iyileştiren sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu yöntem ile gecikme süresi, yolculuk süresi, durma sayısı, kuyruk uzunluğu, kapasite, hizmet seviyesi ve az sayıdaki çalışmada da yakıt sarfiyatı, emisyon değerleri ve işletme maliyetleri gibi performans parametrelerinde iyileşmelerden bahsedilmiştir. Bu sonuçlara bakıldığında yöntem, dönel kavşakların yönetimi adına alternatif bir çözüm olarak kullanılabilir. Ancak literatüre göre bu yöntem, dönel kavşaklarda meydana gelen dengesiz akımları yönetmek için kullanıldığından yöntemin başarımı; yaklaşım kollarından gelen ve sirküle olan akımlar, hacim/kapasite oranı gibi parametrelerin yanı sıra kullanılacak detektörün veya detektörlerin yeri, sinyalizasyonda kullanılacak kırmızı ve boş sinyal süreleri gibi parametrelerle de direkt olarak ilintilidir. Sürücü davranışlarının da yörelere göre değişebilecek olması, takip aralığı ve kritik boşluk gibi parametrelerin de göz önünde bulundurulmasını gerektirmektedir. Bu sebeple yöntemden en yüksek fayda sağlamak için detaylı ve tekrarlı çalışmalar hem sahada hem bilgisayar ortamında yapılmalıdır.

Literatüre bakıldığında çalışmaların genellikle izole kavşaklar üzerinde yoğunlaşmış olduğu ve kısmi denetimli sinyalize dönel kavşakların koridor performanslarına çok fazla değinilmediği görülmüştür. Bu sebeple gelecek çalışmalarda yöntemin koridorlar üzerindeki etkisi de araştırılacak konulardan biri olabilir.

Bunlara ek olarak, ülkemizde sinyalize dönel kavşakların yoğun bir biçimde kullanıldığı düşünüldüğünde, bu

yöntemin ülkemizdeki dönel kavşaklar üstünde uygulanabilirliği adına çalışmalar yapılmalıdır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %19

Kaynaklar

- [1] KGM, Karayolları Tasarım El Kitabı, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 2016.
- [2] KGM, Trafik Kazaları Özeti 2019. <https://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Trafik/TrafikKazalariOzeti2019.pdf>, Erişim tarihi 10 Ekim 2020.
- [3] Federal Highway Administration, Intersection Safety. <https://highways.dot.gov/research/researchprograms/safety/intersection-safety>, Erişim tarihi 10 Ekim 2020.
- [4] European Commission, Annual Accident Report, 2018. https://ec.europa.eu/transport/road_safety/sites/roadsafety/files/pdf/statistics/dacota/asr2018.pdf, Erişim tarihi 10 Ekim 2020
- [5] KGM, Karayolu Trafik Güvenliği El Kitabı. Trafik Şubesi Müdürlüğü, Ankara. 2007.
- [6] B.W. Robinson, L. Rodegerdts, W. Scarborough, W. Kittelson. Roundabouts: An Informational Guide, Federal Highway Administration, Virginia, USA. 2000.
- [7] AASHTO, A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. The American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO Green Book, Washington DC. 2011.
- [8] J. Bared, W. Prosser and C. Esse. State-of-the-art design of roundabouts. Journal of the Transportation Research Board, 1579, 1-10. 1997.
- [9] A. Flannery, T.K. Datta. modern roundabouts and traffic crash experience in United States. Transportation Research Record, 1553(1), 103–1091. 1996.
- [10] R. A. Retting, B. N. Persaud and P. E. Garder. Crash and injury reduction following the installation of roundabouts in the United States. American Journal of Public Health, 91 (4), 628–631. 2001.
- [11] KGM, Modern Dönel Kavşaklar Planlama, Tasarım ve Uygulama Rehberi. Stratejik Planlama Şubesi Müdürlüğü, Ankara. 2018.
- [12] M. Valdez, Effects of unbalanced approach volumes on roundabout operations. ETD Collection for University of Texas, El Paso. 2010. https://scholarworks.utep.edu/open_etd/2603
- [13] K.W. Huddart, Signaling of Hyde Park corner, elephant and castle and other roundabouts. PTRC 11th Summer Annual Meeting, Proceedings of Seminar K, 193–208. 1983.
- [14] J. Krogscheepers, C. Roebuck, Unbalanced traffic volumes at roundabouts. In: Fourth International Symposium on Highway Capacity, Hawaii, USA. 2000.
- [15] A. Tunç, Trafik Mühendisliği ve Uygulamaları. 1. Baskı, Asil Yayın Dağıtım, 790, 2003.
- [16] R. Akçelik, Roundabouts with unbalanced flow patterns. Presented at the ITE Annual Meeting and Exhibit, Lake Buena Vista, Florida. 2004.
- [17] T. Aydemir ve S. Tanyel, 2005. Çok şeritli dönel kavşaklar üzerinde OD matrisinin etkisi, 6. Ulaştırma Kongresi, 23-25 Mayıs, İstanbul.
- [18] Main Roads Western Australia, Guidelines for the Selection of Intersection Control, 2015.
- [19] C. R. Stevens, Signals and meters at roundabouts. In: The 2005 Mid-continent Transportation Research Symposium, Ames, Iowa, USA. 2005.
- [20] Department for Transport. Local Transport Note 1/09, Signal Controlled Roundabouts. 2009.
- [21] T. Tollazzi Alternative Types of Roundabouts at Development Phases. In: Alternative Types of Roundabouts. Springer Tracts on Transportation and Traffic, 6. Springer, Cham, Switzerland. 2015.
- [22] M. S. Hallworth, Signalling Roundabouts. Traffic Engineering and Control 33.6, 354–363. 1992.
- [23] E. Natalizio, Roundabouts with Metering signals. Presented at ITE Annual Meeting, Melbourne, Victoria, Australia. 2005.
- [24] K. Sides, Assessing the clearwater beach entryway roundabout. In: Institute of Transportation Engineers 2000 Annual Meeting and Exhibit, Tennessee, USA. 2000.
- [25] R. Akçelik, An Investigation of the performance of roundabouts with metering signals. Presented at TRB National Roundabout Conference, Kansas City, Missouri, USA. 2008.
- [26] N.Z. Herald, Tauranga's Barks Corner roundabout metering to begin next week. <https://www.nzherald.co.nz/bay-of-plenty-times/news/taurangas-barkes-corner-roundabout-metering-to-begin-next-week/abo24wdrwv4gvbu3qitbphavm/>. Erişim tarihi 13 Ekim 2020.
- [27] WSDOT, SR 240 - Steptoe roundabout traffic metering. <https://wsdot.wa.gov/projects/sr240/steptoe-roundabout/home>. Erişim tarihi 13 Ekim 2020.
- [28] New Zealand Transport Agency, SH2 Elizabeth Street roundabout metering. <https://www.nzta.govt.nz/projects/sh2-elizabeth-street-roundabout-metering>. Erişim tarihi 13 Ekim 2020.
- [29] KTVZ, Bend reviewing results of metered roundabout test. <https://ktvz.com/videos/localvideos/2020/04/23/bend-reviewing-results-of-metered-roundabout-test/>. Erişim tarihi 13 Ekim 2020.
- [30] Z. Çakıcı, Sinyalize dönel (yuvarlakada) kavşakların tasarım esaslarının araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli. 2014.
- [31] L. Rodegerdts, J. Bansen, C. Tiesler, J. Knudsen, E. Myers, M. Johnson, M. Moule, B. Persaud, C. Lyon, S. Hallmark, H. Isebrands, R. Crown, B. Guichet and A. O'Brien. NCHRP Report 672: Roundabouts: An Informational Guide, 2nd ed. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., USA. 2010.

- [32] VicRoads, Supplement to austroads guide to traffic management Part 6: Intersections, Interchanges and Crossings (2013). 2015.
- [33] R.Akçelik, Capacity and performance analysis of roundabout metering signals. Presented at TRB National Roundabout Conference, Vail, Colorado, USA. 2005.
- [34] New Zealand Transport Agency, Traffic Note 60, 2011. <https://www.nzta.govt.nz/assets/resources/traffic-notes/docs/traffic-note-60.pdf>. Erişim tarihi 14 Ekim 2020.
- [35] R. Akçelik, Roundabout metering signals: capacity, performance, and Timing. Presented at 6th International Symposium on Highway Capacity, TRB, Stockholm, Sweden. 2011.
- [36] L. G. H. Fortuijn, Robustness of roundabout metering systems (RMS). In Transportation Research Board 4th International Roundabout Conference, Seattle, USA. 2014.
- [37] Austroads, Guide to Traffic Management Part 6: Intersections, Interchanges and Crossing. 2017.
- [38] Google Maps, https://www.google.com/maps/@-38.0056606,145.0862517,3a,73.8y,237.64h,91.36t/data=!3m6!1e1!3m4!1sDQP_PEZLxIkryipX06snCQ!2e0!7i13312!8i6656. Erişim tarihi 15 Ekim 2020
- [39] M. Zadid and W. Yue, Comparison of a roundabout model using aaSIDRA and PARAMICS. Papers of the 32nd Australasian Transport Research Forum ATRF, Auckland, New Zealand. 2009.
- [40] H. K. An, W. L. Yue and B. Stazic, Dual signal roundabout evaluation in Adelaide using SIDRA and AIMSUN. Road & Transport Research: A Journal of Australian and New Zealand Research and Practice, 26(2), Jun 2017, 36-49. 2017.
- [41] R. Akçelik, Operating Cost, Fuel consumption and pollutant emission savings at a roundabout with metering signals. Presented at the ARRB 22nd Conference, Canberra, Australia. 2006.
- [42] A. Abdelfatah and M. Alozn, Comparing roundabout and metered roundabout performance under different traffic conditions. International Journal of Structural and Civil Engineering Research, 8(2), 178-182. 2019.
- [43] H. K. An, W. L. Yue and B. Stazic, Estimation of vehicle queuing lengths at metering roundabouts. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 4, 545-554. 2017.
- [44] M. Mosslemi, Using metering signals at roundabouts with unbalanced flows to improve the traffic condition: the case study of kannik area in Stavanger (Dissertation). Retrieved from <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-16429>. 2008.
- [45] D. G. Geers, P. Tyler, B. Hengst, E. Huang and D. Quail, Enhanced roundabout metering. Papers of the 16th ITS World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems, Stockholm, Sweden. 2009.
- [46] A. Buasali, broadening understanding of roundabout operation analysis: planning-level tools and signal application, Civil Engineering Theses, Dissertations, and Student Research. 113. University of Nebraska - Lincoln, USA. 2017.
- [47] J. E. Hummer, J. S. Milazzo II, B. Schroeder and K. Salamadi, Potential for metering to help roundabouts manage peak period demands in the United States. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2402, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., USA, 56-66. 2014.
- [48] M. Martin-Gasulla, A. Garcia, A.T. Moreno, Benefits of metering signals at roundabouts with unbalanced flow: patterns in Spain. Transportation Research Record 2585, 20-28. 2016.
- [49] M. Martin-Gasulla, A. Garcia, A.T. Moreno and C. Llorca, Capacity and operational improvements of metering roundabouts in Spain. Transportation Research Procedia 15, 295-307. 2016.
- [50] Y. Duan, X. Qu, S. Easa and Y. Yan, Optimizing total entry delay at roundabouts with unbalanced flow: A dynamic strategy for smart metering. IET Intelligent Transport Systems. 13. 485-494. 2018. <https://doi.org/10.1049/iet-its.2018.5180>
- [51] K. Mahmood, Improving roundabout performance using roundabout metering technique. Electronic Thesis or Dissertation. University of Akron, 2016.
- [52] X. Ma, P. Yi, and V. Bolla, Priority metering control for an urban circular intersection. Civil Engineering Journal; Prague Iss. 2,292-304. 2019.
- [53] P. Fernandes, J. Teixeira, C. Guarnaccia, J.M. Bandeira, E. Macedo and M.C. Coelho, The Potential of metering roundabouts: influence in transportation externalities. Transportation Research Record, 2672(25), 21-34. 2018.





Coğrafi bilgi sistemleri ile Niğde-Kayseri arası hızlı tren hattı önerisi ve maliyet değerlendirilmesi

High speed rail route proposing using GIS and evaluation of approximate cost between Niğde-Kayseri

Yusuf Kağan Demir^{1,*}, Murat Çoşkun²

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

² Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 51240, Niğde Türkiye

Özet

Günümüzde yüksek hızlı tren (YHT) sistemleri belirli mesafelerde havayolu ulaşımına rakip olmakla beraber özellikle Avrupa bölgesinde havayolu türünün önemli ve tamamlayıcı parçası olarak işletilmektedir. Bu işletme türü düşük yoğunluklu kentlerin hava ulaşım hizmetine ulaşmasının yanında bağlantı kurduğu kentler arasındaki hareketliliğe de katkıda bulunmaktadır. Bu çalışma Türkiye'deki düşük yoğunluklu kentler için yerel havalimanı planlamalarının yerine mevcut demiryolu bağlantılarının iyileştirilmesi düşüncesi ile Niğde-Kayseri arasındaki demiryolu hattının YHT hattına dönüştürülmesini ve bunun kaba maliyetini hesaplamayı amaçlamaktadır. Çalışma sonucunda Niğde-Kayseri hızlı tren hattının uzunluğu 127 km, yolculuk süresi 60 dakika, kaba maliyeti 2,629,206,080.6 TL olarak hesaplanmıştır. Yerel bir havayolu inşasına göre hattın maliyeti dört kat yüksek tahmin edilmiştir. Ancak düşük yoğunluklu kentlerin ürettiği yetersiz havalimanı talebi düşünüldüğünde hızlı tren yolu hattının Niğde kentine orta ve uzun vadede sosyal ve ekonomik açıdan daha fazla katkıda bulunacağı düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: Hızlı tren, Güzergah, CBS, Maliyet

1 Giriş

Havalimanları sürdürülebilir ve etkili işletme için kentin ve çevre yerleşimlerin yarattığı sosyal ve ekonomik değişkenlere bağlı olan belirli bir düzeyde talebe ihtiyaç duyarlar. Niğde gibi düşük yoğunluklu kentlerde bu talebi yaratabilmek için nüfus yoğunluğu ve ekonomik faaliyetler yeterli olmamaktadır. Örneğin nüfusu Niğde'ye benzer büyüklükte olan Uşak havalimanını yılın en kalabalık ayı olan Ağustos ayında 2018'de günlük ortalama 698 yolcu kullanmıştır [1]. Düşük talep; daha az uçuş sıklıklarına, yüksek bilet fiyatlarına ve uçuş noktası çeşitliliğini azaltarak daha fazla aktarmaya neden olmaktadır. Bu nedenle çoğu zaman kente ait yerel bir havalimanı olmasına rağmen yolcular çevre kentlerde fiyat, aktarma ve sıklık bakımından olanakları daha uygun havalimanlarına yönelebilmektedir.

Çalışmanın temel çıkış amacı, yerel bir havalimanı yerine Niğde'yi Kayseri'ye ve Kayseri Havalimanına bağlayan bir

Abstract

High-Speed Rail (HSR) systems are being operated in the European region as an important complement part of air transportation systems though it competes with air transportation in certain distances. The integration of railway systems to air transportation not only gives cities mobility but also access to the airport for cities having a lack of an airport. The study aims to research development of the existing railway line between Niğde and Kayseri into an HSR system that may alternate to local airport construction and evaluate the approximate cost of HSR construction. As a result, the length, the average travelling time, and the total construction costs of the proposed HSR line between Niğde-Kayseri are 127 km, 60 minutes and 2.629.206.080,6 TL, respectively. The approximate construction cost of the proposed HSR line is about four times higher than new local airport construction. Considering that airports located in low-density population regions are far away from generating enough demand, the proposed HSR line may contribute to Niğde socially and economically more than a local airport in the middle and long terms.

Keywords: High speed train, Route, GIS, Cost

hızlı tren güzergahının önerilmesiyle kentin erişilebilirlik ve uçuş sıklığı bakımından uygun olan, düşük aktarmalı ve ucuz biletlerle erişim kolaylığı sağlayan bir havalimanına hızlı bağlantısının kurulması düşüncesine dayanmaktadır. Avrupa'da birçok büyük havalimanı demiryolu bağlantısına sahiptir. Örneğin Lufthansa havayolları demiryolu bağlantısı olan havalimanlarında Rail&Fly [2] programı kapsamında uçak ve tren biletlerini beraber satarak yolcuların tren-uçak ya da uçak-tren arası geçişlerini kolaylaştırmaktadır. Niğde için önerilen hızlı tren hattının da benzer bir model uygulanarak 45~60 dakikalık yolculukla doğrudan uçuşa geçebilecek biçimde işletilmesi mümkün görülmektedir.

Niğde ve Kayseri kentlerinin YHT ile birbirine bağlanmasının nedenleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Karayolu ulaşım sistemlerine göre daha az gürültülü olması, karayoluna göre daha çevreci olması, yük ve yolcu için birim uzaklık başına düşük kirlilik değerlerine sahip olması,

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail ykdemir@ohu.edu.tr:(Y.K. Demir)

Geliş / Received: 31.03.2021 Kabul / Accepted: 05.05.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.907098

- Modern, hızlı, konforlu, güvenli olması ve trafik sıkışıklığından etkilenmemesi,
- Zorlu hava veya iklim koşullarından diğer ulaşım türlerine göre daha az etkilenmesi,
- Kaza riskinin diğer ulaşım sistemlerine göre daha az olması,
- Taşıdığı yolcu sayısı ve taşıdığı navlun oranı dikkate alındığında diğer sistemlere göre avantajlarının olması,
- Uzun vadede Fayda-Maliyet oranlarının daha yüksek değerlere sahip olması
- Kullandığı elektrik enerjisinin üretiminin temiz ve sürdürülebilir kaynaklardan sağlanma olanağı
- İşletme aralıklarının düzenli olması
- İşletme süresince yüksek istihdama sahip bir ulaştırma türü olması.

Bu çalışmada, coğrafi bilgi sistemleri yardımıyla Niğde-Kayseri arasında bulunan mevcut demir yolu hattının, hızlı demiryolu hattına çevrilmesi durumunda, yeni hatta ait güzergah çalışması yapmak ve hattın kaba maliyetini hesaplayarak raylı sistem seçeneğine dikkat çekilmek istenmiştir.

Dünyada raylı sistem güzergah araştırması için yeni yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemlerden en çok kullanılan coğrafi bilgi sistemi (CBS) ve uzaktan algılama temelli güzergah çalışmalarıdır. Bu alanda yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. [3-11]

2 Materyal ve Yöntem

2.1 Coğrafi bilgi sistemi ve güzergah tayini için çok kriterli karar verme

Coğrafi bilgi sistemi (CBS) ulaşım sistemlerinin planlanması, izlenmesi ve yönetilmesinde daha sık kullanılmaktadır. Sürdürülebilir bir ulaşım kararlarının alınması ve ulaşım sistemlerinin planlanmasında coğrafi bilgi sistemi (CBS) tabanlı çok kriterli karar analizi (ÇKKA) kullanılmaya başlanmıştır.

2.1.1 Coğrafi bilgi sistemi

Coğrafi bilgi sistemi, dünya genelindeki karmaşık sosyal, ekonomik ve çevresel sorunları saptama, geniş alanların coğrafi verilerini toplama, depolama, işleme, yönetme, tematik analiz yapma, sorgulama ve sunma işlevlerini yerine getiren bir yazılım, donanım, coğrafi bilgi sistemidir [12]. Yani Coğrafi Bilgi Sistemi, teknolojik yöntemler kullanılarak dünyanın matematiksel haritalamasında kullanılan bilgisayar tabanlı bir sistemdir. Bu sistem, olay ve nesnelerin coğrafi bir ilişki içinde hızlı biçimde belirlenmesini sağladığından stratejik olarak önemlidir.

Uydu teknolojileri ve veri işlemede kat edilen mesafe dikkate alındığında raylı sistem hat güzergahlarının belirlenmesinde yeni bir yaklaşım gün yüzüne çıkmıştır. CBS ve uzaktan algılama (UA) kullanımını dünya çapında yapılan çalışmalarda olumlu sonuçlar vermiştir.

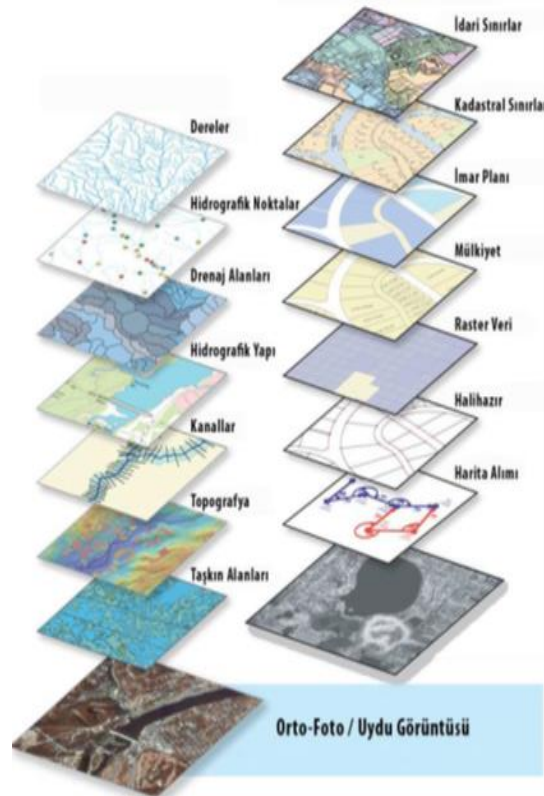
Arazide yapılacak pek çok çalışma, uydu görüntüleri ve hava fotoğrafları sayesinde ofis ortamında yürütülebilmektedir. Toplanan veriler, eldeki diğer verilerle de entegre edilerek CBS platformlarında işlenebilmekte ve bu sayede çok çeşitli analiz ve sorgulama sonuçlarına

erişilebilmektedir [13]. Geleneksel yöntemlere bakılarak daha fazla iş gücünden, zamandan ve bütçeden tasarruf sağlanmaktadır. Ek olarak sayısal çizimlerle ifade edilemeyecek pek çok sözel detay coğrafi nesnelere kolayca ilişkilendirilmektedir.

Uzaktan Algılama; “Dünyanın karasal yüzeyinden belirli mesafelerde konumlandırılmış platformlara yerleştirilen ölçüm aletleri ile yeryüzündeki doğal veya doğal olmayan nesnelere hakkında bilgi edinme ve değerlendirme teknikleri olarak tanımlanmaktadır” [14]. Uzaktan Algılama teknolojisi başlıca şu alanlarda kullanılmaktadır:

- Baraj alanları ve su yataklarının belirlenmesi,
- Deniz ve kıyı araştırmaları ile kirlilik düzeylerinin ve coğrafi değişikliklerin ölçülmesi,
- Raylı sistem, karayolu, gaz ve petrol boru güzergahı seçimi,
- Arazi ve toprak haritalarının oluşturulması,
- Orman kaynakları için varlık değerlendirilmesi
- Orman yangınları, seller, toprak kaymaları gibi doğal afetlerin araştırılması,
- Minerallerin (madenlerin) araştırılmasında jeolojik araştırmaların gerçekleştirilmesi,
- Yerel yönetimlerin kadastro, imar planları ve arazi uygulamalarının yapılması,
- Kaçak inşaatların belirlenmesi vb.

CBS, basit veri katmanlarını nesne sınıfları olarak yönetir (Şekil 1) ve bu veri katmanlarıyla birçok ilişki elde edebilir.



Şekil 1. CBS katmanlama prensibi [15]

2.2 Raylı sistem hatları için güzergah belirleme

Raylı sistem planlamasının en önemli aşaması güzergah belirlemedir. Ulaşım etüdü yapılarak ihtiyaçlar bölgeye göre belirlenir, daha sonra bu bölgeye hizmet edecek hatta ait güzergah araştırmasına başlanır. Yolculuk talebinin yüksek olduğu alanlar belirlenir ve istasyon yerleri seçilir. İstasyon yerleri belirlendikten sonra güzergah bu istasyonlar arasında araştırmaya başlanır.

Yapılan etütler sonucunda bölgeye uygun ulaşım sistemi belirlenir ve hiç raylı sisteme ihtiyaç duymadan diğer ulaşım sistemleri ile çözülebilir. Eğer kara trafiği veya hava trafiği şartları uygun değilse raylı sistemler tercih edilir. Bölgeye en uygun raylı sisteme karar verildikten sonra güzergah araştırmasına başlanır.

Ulaşım yatırımlarının değerlendirilmesi sürecinde ülkeden ülkeye, hatta ülke içinde bölgeden bölgeye ve uygulayan kişiden kişiye değişen pek çok yöntem uygulanmaktadır. Fakat bunlar içinde yaygın kabul gören iki yöntem 'Çok Kriterli Karar Verme Sistemleri' ve 'Fayda Maliyet Analizi' olarak karşımıza çıkmaktadır. Fayda Maliyet analizi yatırıma tekil bir oransal değerle yaklaşır ve kentsel yapı, silüet, tarihi doku vb. bileşenleri hemen hemen tamamen göz ardı eder. Bu çözümle; maliyet kalemini oluşturan öğeleri ve sonuçta elde edilen faydaları listeleyip toplam maliyet ve faydaların oranlanmasına dayanır. Bu çözümlenme ile maliyet ve faydalara, çevre ve sosyal maliyet ve faydalar dâhil edilerek daha sürdürülebilir yatırımları öne çıkaran çözümlenmeler elde etmek mümkündür. Kamu hizmeti taşıyan projelerde maddi olarak ifade edilemeyecek pek çok diğer etken de dikkate alınmalıdır. Bu sebeplerden ötürü, raylı sistem güzergah tasarımı yapılırken konunun bütün açılardan değerlendirilebilmesi amacıyla "Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) Yöntemlerinden" öne çıkmaktadır. Bu yöntem "hem sayısal olarak ifade edilebilen hem de edilemeyen değişkenlerin bir arada değerlendirilmesini sağlamaktadır" [4]. Her iki çalışma da uzun ve detaylı analizler içerir. Çalışma sadece Niğde-Kayseri arasında önerilen hızlı tren hattının mevcut şartlar altında kaba maliyetini hesaplamaktadır. Ayrıca uygunluk (fizibilite) çalışmaları birden fazla güzergah önerisi içermelidir. Ancak bu çalışmada mevcut hattın hızlı tren hattına çevrilmesi durumundaki maliyet araştırıldığından farklı güzergah önerileri üzerinde çalışılmamıştır.

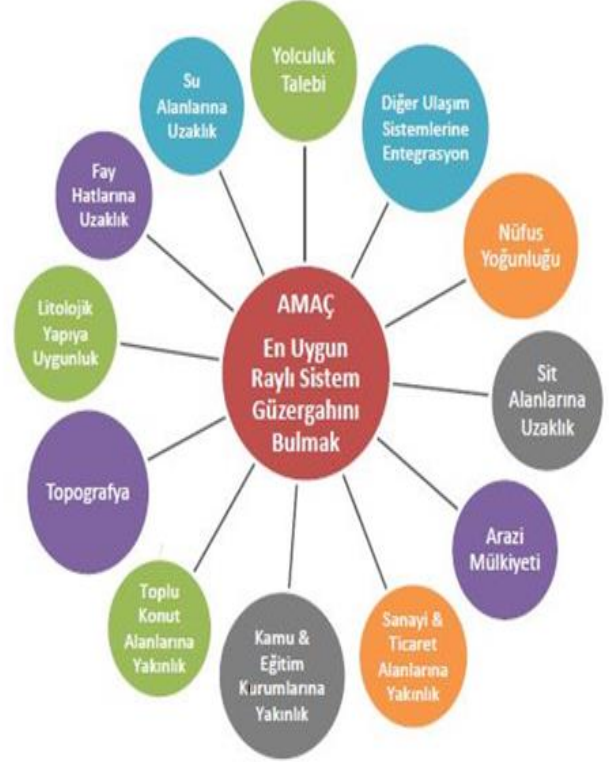
Raylı sistem türleri hakkındaki karar sürecinde değerlendirilmesi gereken ana ölçütler aşağıda verilmiştir [16].

1. Yolculuk taleplerine göre şekillenen sistem kapasitesi
2. İşletme hızı
3. Topografya
4. Lokomotifle bağlı vagon sayısı
5. Yatay kurb büyüklükleri
6. Sinyal sistemi
7. Karayolu ile kesişme oranı
8. İstasyon bölgelerindeki platform uzunlukları
9. İstasyonlar arası mesafe
10. Düşey eğimler
11. Sefer sıklığı

2.2.1 Raylı sistem güzergâh belirlemesine etki eden faktörler

Raylı sistem hattına ait güzergah çalışması için öncelikle ölçütlerin belirlenmesi ve bu kriterlerin hepsinin bir arada değerlendirilerek en uygun çözümün üretilmesi gerekmektedir.

Şekil 2'de literatür taramalarının ardından Niğde-Kayseri arasındaki raylı sistem hattına güzergah çalışması için 12 faktör göz önüne alınmış ancak bunlardan en çok etkili olanları değerlendirilmiştir.



Şekil 2. Raylı sistem güzergah tasarımına etki eden faktörler [4]

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Niğde-Kayseri arasında raylı sistem hattı güzergahı

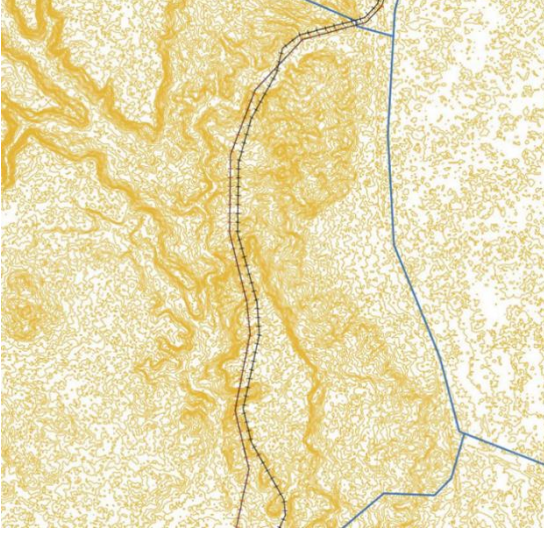
Raylı sistem çalışmalarının en önemli parçası hatta ait güzergahın belirlenmesidir. Güzergah belirlendikten sonra raylı sistem için fen ve mühendislik çözümlenmelerine geçilebilir. Mühendislik çözümünden sonra seçilen güzergahın ekonomik boyutları ele alınabilir.

3.1.1 Yolcu talebi

Niğde-Kayseri arasında havalimanına, büyük sağlık merkezlerine, alışveriş ve eğitim alanlarına günlük yoğun bir talepler oluşmaktadır. Niğde ve Kayseri arasında hafta için günlük tek yönde doğrudan 17 otobüs seferi [17] mevcuttur. 2019 verilerine göre yıllık ortalama günlük trafik 1705 otomobil ve 52 otobüs olarak kaydedilmiştir [18]. Otomobil dolulukları 2 kişi/otomobil olarak kabul edildiğinde Niğde-Kayseri arasında ortalama yolcu talebi günlük 3410 kişi olarak tahmin edilmektedir.

3.1.9 Topografya faktörü

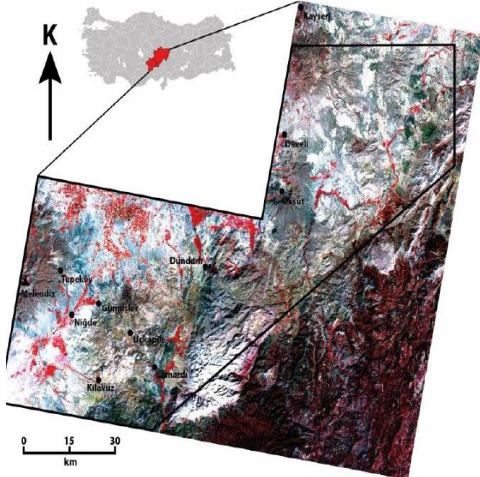
Arazideki eğim ve kot farklılıkları raylı sistem tasarım sürecinde çok önemlidir. Yüksek hızlı trenlerin yüksek hızlarda çalışması nedeniyle boyuna eğimin (maksimum %3.5) belirli sınırlar içinde kalması gerekir. Yeşilhisar-Araplı kesiminde topografya engebeli (Şekil 5) olduğundan bu bölge için yedi kilometre uzunluğunda bir tünel planlanmıştır.



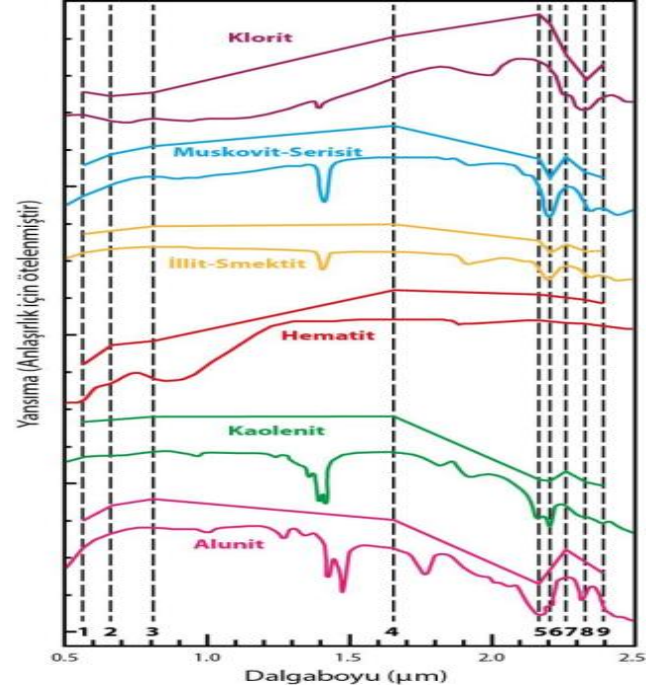
Şekil 5. Niğde-Kayseri hızlı tren hattının QGIS programı yardımıyla çıkarılmış topografik haritası

3.1.10 Litolojik yapıya uygunluk faktörü

Planlanan güzergahın litolojisi maliyet hesaplamaları için önemli bir faktördür. Sert yapıdaki zeminlerden geçen güzergahlarda yarma maliyeleri ve adam-saat süreleri artmaktadır. Aynı şekilde gevşek bir zeminden güzergahın geçmesi halinde ise güzergahta çökmeler meydana gelecektir. Hızlı trenlerde eğimin düşük olmasından dolayı çoğu zaman sanat yapıları yapılması zorunlu olmaktadır. Sanat yapılarının ve hattın iyi etüt edilmemiş zeminlerde yapılması sadece hizmetin aksamasına değil, kaza gibi ciddi sonuçlara neden olabilmektedir. Şekil 6'da Niğde-Kayseri arası uydu analizi yüzey kayaçları gösterilmiştir. Şekil 7'de bu kayaçların türünü göstermektedir.



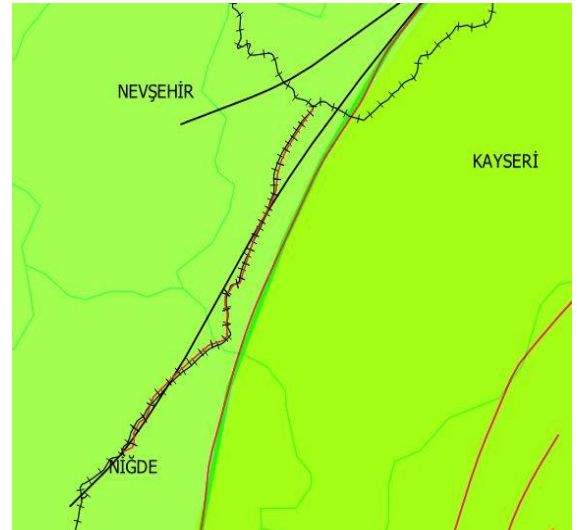
Şekil 6. Niğde-Kayseri bölgesi litolojik analiz [19]



Şekil 7. Niğde-Kayseri bölgesi litolojik analiz [19]

3.1.11 Fay hatlarına uzaklık faktörü

Deprem riski göz önüne alınması gereken bir diğer önemli faktördür. Güzergah çalışmaları sırasında fay hatlarının coğrafi konumları ve özellikleri çok iyi bilinmelidir. Fay hattının dikine yapılacak geçişler olası bir kırılmadan çok etkilenmeyecek olmakla beraber, fay hattının üzerinde ya da yakınında fay hattına paralel yapılacak bir geçiş uygun değildir. Bu nedenle fay hatlarının iyi tanınması ve mümkün olduğunca uzaktan geçilmesi gerekmektedir. Çalışılan güzergahta fay hatlarından kaçınılmaya çalışılmıştır (Şekil 8).

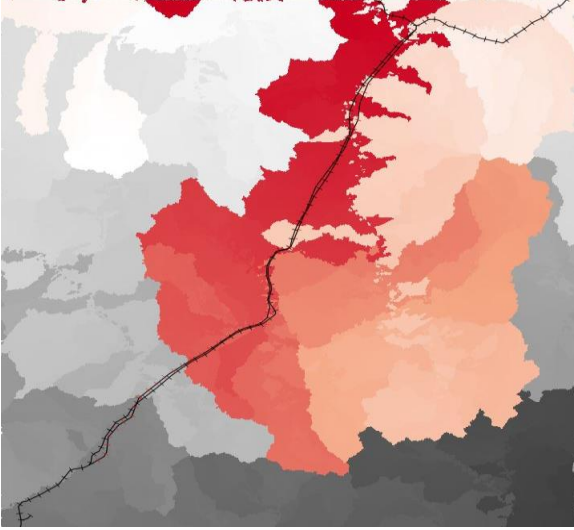


Şekil 8. Niğde-Kayseri bölgesi fay hatları

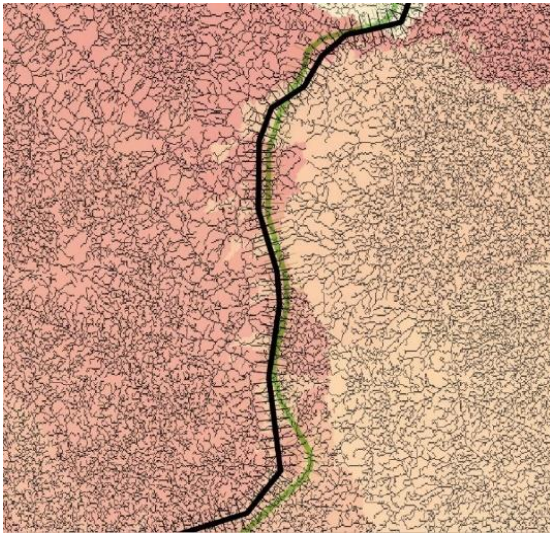
3.1.12 Su alanlarına uzaklık faktörü

Son yıllarda gerçekleştirilen düzenlemelerle dere yataklarında ve havzalardaki yapılaşmalara çok ciddi kısıtlamalar ve yasaklar getirilmiştir. Özellikle içme suyu

havzaları için geniş ve çok katmanlı koruma kuşakları oluşturularak kentleşmenin bu alanlardaki etkileri kontrol altına alınmaya çalışılmıştır (Şekil 9). Yoğun nüfusa ve yolculuk değerlerine sahip olmayan bu alanlardan raylı sistem geçirilmesi konusunda duyarlılık gösterilmesi gerekmektedir. Seçtiğimiz güzergahta vadi alanlarından ve su toplanma havzalarından kaçınılmıştır (Şekil 10). Sel ve ani su baskını olan bölgelerden uzak tutulmuştur.



Şekil 9. Niğde-Kayseri bölgesi QGIS programı ile havza analizi



Şekil 10. Niğde-Kayseri bölgesi QGIS programı ile vadi analizi (Yeşil renk mevcut hat-siyah renk hızlı tren hattı)

3.2 Niğde-Kayseri YHT hattı güzergahının özellikleri

Yukarıdaki ölçütler dikkate alınarak Niğde-Kayseri hattı için seçilen güzergah Şekil 11’de belirlenmiştir. Bu güzergah mevcut tren hattına paralel olarak belirlenmiş, yükseltinin fazla olduğu yerlerde sanat yapıları ile geçilmeye çalışılmıştır. Hattın kent içindeki bölümü, mülkiyet durumu nedeniyle mevcut hattın üzerinden geçirilmiştir.

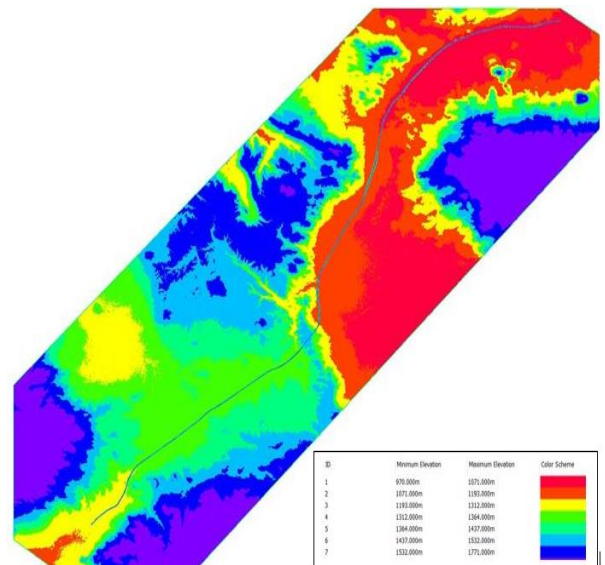
Niğde-Kayseri için belirlenen güzergahı başlangıç istasyonu 0+000,00 m, bitiş istasyonu 127+223.88 m

arasında toplam 127.224 km’dir. Hat; Kayseri-Yeşilhisar (0+000,00-73+000.00), Yeşilhisar-Araplı (73+000,00-80+000.00) ve Araplı-Niğde (80+000.00-127+223.88m) olmak üzere üç kesimden oluşmaktadır. Kayseri-Yeşilhisar kesimi balastlı üst yapı (Şekil 12), Yeşilhisar-Araplı kesimi rijit üst yapı (Şekil 13) ve Araplı-Niğde kesimi yine balastlı üst yapı (Şekil 12) biçiminde planlanmıştır. Ayrıca Yeşilhisar-Araplı kesimi yüksek hızlı demiryolu tasarımında maksimum boyuna eğimden dolayı (%2.5) bu bölümde yedi kilometre uzunluğunda bir tünel ile Şekil 13’deki gibi geçilmiştir. Tünelin İstanbul-Ankara arasındaki tünel benzer biçimde tasarlanmıştır.

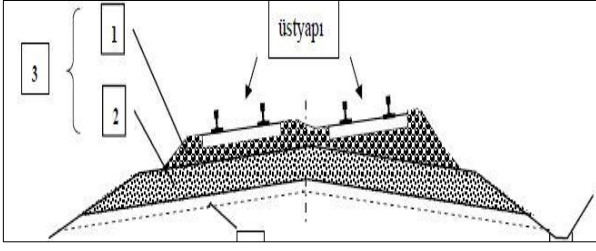
Oluşturulan güzergah üzerinde, Autodesk CIVIL 3D programı yardımı ile dever, eksik dever ve fazla dever hesaplamaları yapılmış ve hat üzerine uygulanmıştır. Şehir merkezlerinde yapılan iyileştirmeler nedeniyle bu kısımlarda hız düşük tutulmuştur. Toplamda 51 yatay kurp oluşturulmuştur. Her bir yatay kurp için dever hesabı yapılmıştır. Yatay kurplardan biri için Şekil 14’de örnek dever grafiği verilmiştir.

Dever hesabından sonra güzergah boy kesiti oluşturulmuştur. Oluşturulan bu boy kesite yapılan kırmızı çizgi (kot) çalışması sonucunda maksimum hat eğimi %2.5 olmuştur. Bu eğim Yeşilhisar-Araplı kesimindeki tünel kısmında kullanılmıştır. Diğer kesimlerde eğim maksimum %1.25 olmuştur. Şekil 15’de güzergaha ait boy kesit görülmektedir.

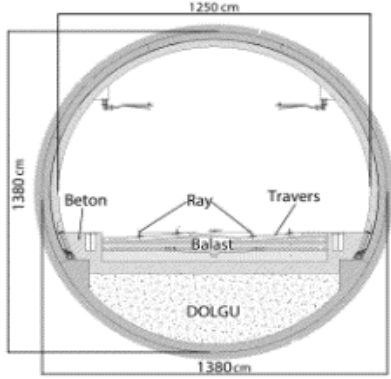
Autodesk CIVIL 3D programı yarma ve dolgu miktarlarını hesaplamıştır. Kayseri-Yeşilhisar, Yeşilhisar-Araplı ve Araplı Mevki-Niğde arası ayrı ayrı hesaplanmıştır. Kayseri-Yeşilhisar kesiminde 6,838,609.0 m³ yarma, 3,748,145.5 m³ dolgu yapılması gerekmektedir. Yeşilhisar-Araplı kesiminde tünel işleri olduğundan sadece yarma hesabı yapılmıştır. Tünel yarma miktarı 933,665.3 m³ dür. Araplı-Niğde kesiminde yarma 46,802.1 m³, dolgu 3,305,139.1 m³’dür. Hattın kütle diyagramı Şekil 16’da görülmektedir.



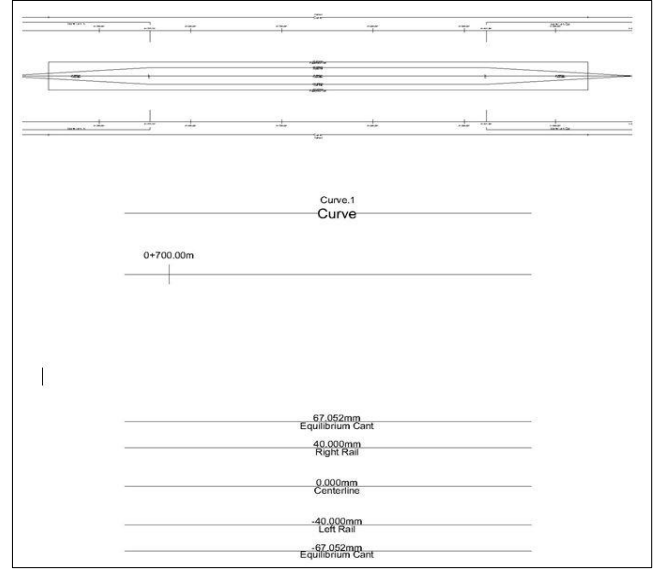
Şekil 11. Niğde-Kayseri arasındaki belirlenen güzergahı



Şekil 12. Balastlı üst yapı

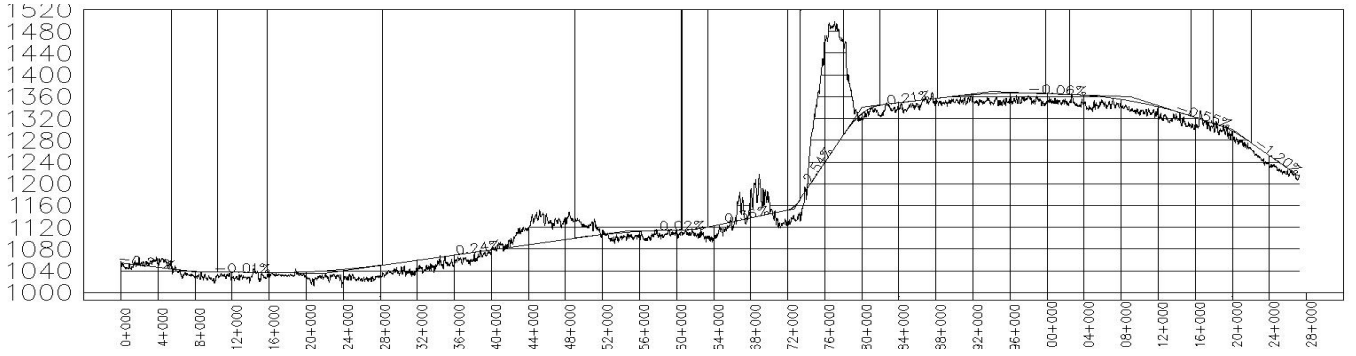


Şekil 13. Yeşilhisar-Araplı arası tünel tip enkesiti

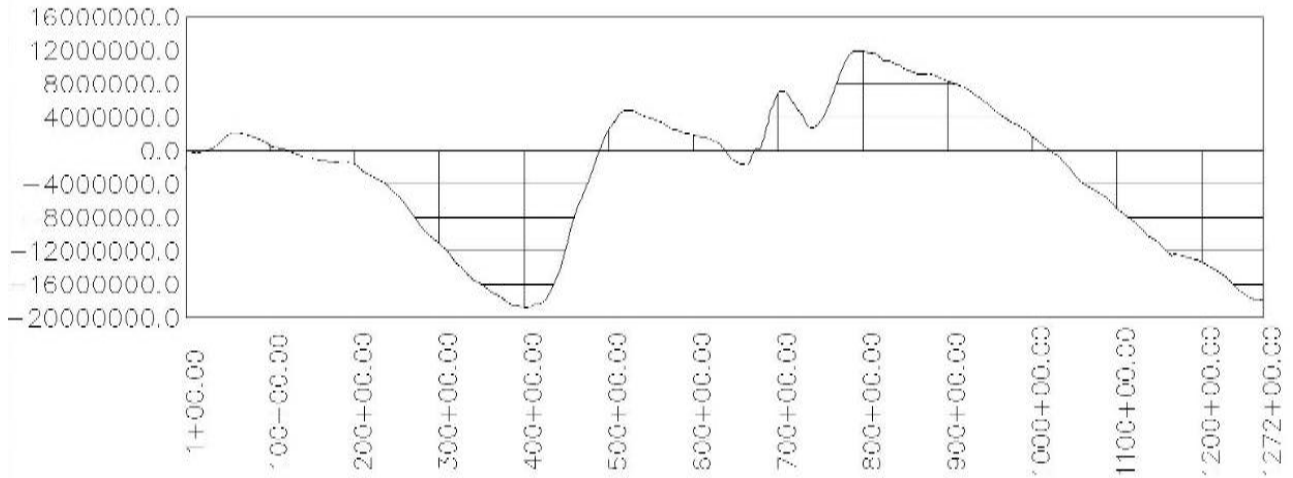


Şekil 14. Yatay karp dever değeri

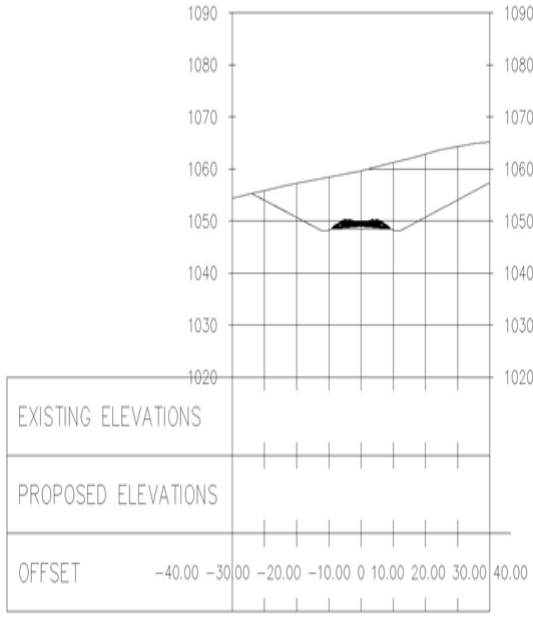
Toplam 1757 adet enkesit oluşturulmuştur. Hat genişliği olarak Fransız TGV hat genişliği alınmıştır. Enkesitler hattın uzun olması sebebi ile 100 metrede bir, kurplarda 50 metrede bir oluşturulmuştur. Şekil 17'de örnek en kesit görülmektedir.



Şekil 15. Niğde-Kayseri arası hızlı tren boy kesiti



Şekil 16. Niğde-Kayseri arası kütle diyagramı



Şekil 17. Uygulanan en kesitten örnek

3.3 Niğde-Kayseri arası hızlı tren hattı maliyeti

Türkiye'nin son yıllarda yapılan İstanbul-Ankara, Ankara-Konya ve Ankara-Sivas hızlı tren hatları ile ilgili maliyet çalışmaları mevcuttur. Bu çalışmalar sayesinde Niğde-Kayseri hızlı tren hattına ait önerilen güzergahın yaklaşık maliyet çalışması yapılmıştır.

İstanbul-Ankara Hızlı Tren Hattı;

Proje, mevcut hattan bağımsız ve tamamen elektrik sinyalli, Ankara ile İstanbul arasında 250 km/saat hızda, yeni bir çift hatlı yüksek hızlı demiryolu yapımını içermektedir. Projenin toplam uzunluğu 533 km'dir. Projenin kesimleri Şekil 18'de gösterilmiştir.



Şekil 18. Ankara ile İstanbul hızlı tren projesi güzergahı ve proje bölümleri [11]

Ankara ile İstanbul hızlı tren hattının toplam maliyeti Tablo 1'deki gibidir.

Tablo 1. Ankara ile İstanbul hızlı tren hattı maliyeti [11]

Ankara- İstanbul Kesimleri	Uzun (km)	Toplam Bedel (TL)	Birim Maliyet (TL/km)
Ankara-Sincan Kuzey Hattı	24	92,000,000	3,833,333.00
Sincan-Esenkent	15	116,000,000	7,333,333.00
Esenkent-Eskişehir	206	1,849,000,000	8,975,728.15
Eskişehir-Gar Geçişi	2.2	293,000,000	133,181,818.18
Eskişehir-İnönü	30	168,000,000	5,600,000.00
İnönü-Vezirhan	54	2,148,000,000	39,777,777.00
Vezirhan-Köseköy	71	2,790,000,000	39,295,774.64
Geyve-Arifiye	36	168,000,000	4,666,666.00
Köseköy-Gebze	56	854,000,000	15,250,000.00
Gebze-Pendik	20	476,000,000	8,500,000.00
Toplam	514.2	8,954,000,000	17,413,457.79

Ankara-Konya Hızlı Tren Hattı;

Toplam uzunluğu 306 km olan hattın 94 kilometresi Ankara-İstanbul Hızlı Tren Projesi kapsamındaki Ankara-Polatlı kesiminden oluşmaktadır. Projenin toplam hat uzunluğu 212 km olup, ihaleye 2 ayrı parça halinde çıkmıştır (Şekil 18). Bölüm 1 (0 + 00-100 + 00 km arası) ilk 100 km, Bölüm 2 (100 + 00 -212 + 50 km arası) 112.5 km olarak belirlenmiştir. Hattın genel özellikleri Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Ankara ile Konya arasındaki hızlı tren hat özellikleri [11]

Tanım	Hat Özellikleri	Birimi
Toplam Uzunluk	306	km
İnşa edilen uzunluk	212	km
Hat sayısı ve tipi	Çift hat, elektrikli, sinyalli	
Hız	250	km/saat
Dingil Yüğü	23	ton
Ekartman	1435	mm
Min Kurp Yarıçapı	6500	m
Maksimum Eğim	%0.16	
Maksimum Dever	130	mm
Düşey gabari	6,72	m
Ray tipi	UIC-60	
Ray Boyu	36	m
Kaynaklı Uzunluk	Sürekli Kaynak	
Ray Kalitesi	900 A	
Traversler	Ön-germeli, ön çekmeli monoblok B70 tipi beton [8].	
Subbalast Miktarı	670000	m ³
Balast Miktarı	988000	m ³
Toplam Ray Miktarı	56135	ton
Travers Miktarı	137687	adet

Güzergah üzerindeki toplam hafriyat miktarı yaklaşık 27,000,000 m³, toplam dolgu miktarı yaklaşık 13,000,000 m³'tür.



Şekil 19. Ankara-Konya hızlı tren güzergahı [11].

Tablo 3' de görüldüğü üzere Ankara ile Konya hattının kilometre başına maliyeti 3,776,780.26 TL'dir. Dünyadaki örnekleri incelediğimizde (Tablo 4) kilometre yapım maliyetleri arasında farklılıklar görülmektedir.

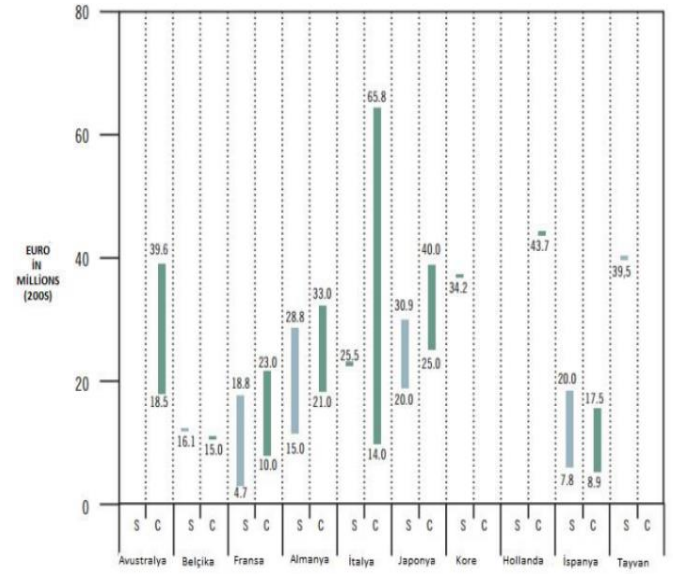
Tablo 3. Ankara-Konya hızlı tren maliyeti [11]

Yapım maliyeti	Toplam (TL)
1. Kesim altyapı işleri	74,890,624.82
1. Kesim altyapı ikmal işleri (keşif artış dâhil)	79,597,097.18
2. Kesim altyapı işleri	83,156,832.00
2. Kesim altyapı ikmal işleri	35,250,000.00
Üstyapı ve elektromekanik işleri	539,630,533.86
Genel toplam	800,677,415.30

Niğde-Kayseri hızlı tren hattı için önerilen güzergahın 1. (Kayseri-Yeşilhisar) ve 3. (Araplı Kesimi-Niğde) kesimleri Ankara-Konya hattı ile benzer özellikler sergilemektedir. Ankara-Konya hızlı tren hattının km maliyeti 2011 yılında 3,776,780.00 TL olup 2011 yılındaki dolar kuru da 1.65 TL'dir. Buna göre dolar cinsinden maliyet 2,288,958.00 \$/km (3,776,780/1.65) olarak hesaplanmaktadır. Hattın 1. Bölümü 73 km, 3. Bölümü 47.2 km uzunluğundadır. Buna göre maliyetler 1. Bölüm için 167,093,934.00 \$, 3. Bölüm için 108,038,818.00 \$ hesaplanmıştır.

Yeşilhisar-Araplı kesimi üzerinde yedi kilometrelik çift hatlı tünel mevcuttur. Bu kesimde jeolojik özellikler açısından, genelde volkanik kayalardan olan, pomzadan oluşmaktadır. Pomza kayacı kolay kazılabilen ve kendini tutabilen bir kayaç türüdür. Tünel kesitinin kazılırken, kazı maliyetlerini aşağıya çekmektedir. HS2 (High Speed Two) verilerine göre çift tüplü tünel maliyeti km başına 33,000,000.00 € olarak belirtilmiştir. Yedi kilometrelik bir tünelin maliyeti buna göre 241,000,000.00 € olarak hesaplanmıştır. Amerikan doları-Euro arasındaki kur oranı 1.188 kabul edilirse tünel maliyeti 284,380,000.00 \$ olmaktadır.

Tablo 4. Yüksek hızlı demiryolu hatları ortalama kilometre yapım maliyetleri [11].



Niğde-Kayseri Arası Hızlı tren hattı kaba maliyeti yaklaşık 392,418,818.00 \$, 2020 kur oranları ile 2,629,206,080.6 TL (392,418,818.00x6.7) bulunmuştur. Tablo 5'de Niğde-Kayseri arası önerilen hızlı tren hattına ait özellikler listelenmiştir.

4 Sonuçlar

Çalışmada, Niğde iline ulaştırma yatırımlarının hangisinin daha uygun ve sürdürülebilir olduğu irdelenmiştir. Bu kapsamda Niğde ilini Kayseri iline daha hızlı bir ulaşım sistemi ile bağlayarak Niğde halkının sosyal, ekonomik ve sağlık alanlarını etkin kullanımı amaçlanmıştır.

Tablo 5. Önerilen Niğde-Kayseri hattına ait özellikler

Hat sayısı ve tipi	Çift hat, elektrikli, sinyalli	
Hız	250	km/sa
Dingil yükü	23	ton
Ekartman	1435	mm
Min. karp yarıçapı	6300	m
Maksimum eğim	%2.5	
Maksimum dever	180	mm
Düşey gabari	6.72	m
Ray tipi	UC-60	
Ray boyu	36	m
Kaynak uzunluğu	Sürekli kaynak	
Ray kalitesi	900 A	
Traversler	Öngermeli, önçekmeli monoblok B70 tipi beton [8]	
Alt balast miktarı	395,237	m ³
Balast miktarı	971,265	m ³
Toplam ray miktarı	30,592	ton
Travers miktarı	336,902	adet
Yarma	781,076	m ³
Dolgu	705,328,4	m ³
Alt temel	632,452	m ³
Hazırlanmış toprak tabakası	667,244	m ³

Coğrafi bilgi tabanlı ve çok kriterli karar analizi süreçleri, güzergah seçimlerinde etkili bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bilgisayar tabanlı programların ve bilgisayar donanımlarının gelişmesiyle birlikte büyük ölçekli alanların etkin analizleri yapılabilmektedir. Bu sayede, yüksek başarılı bilgisayarlar yardımıyla ulaştırma yatırımlarının ön çalışmasını kısa sürelerde tamamlama şansı sunmaktadır. Bu alanda çalışma yapan mühendislere kolaylık sağlamaktadır.

Ayrıca çalışmada programların ne kadar etkili olduğu da irdelenmiştir. Bu çalışmada QGIS [20] ve Autodesk CIVIL 3D programları kullanılmıştır. Açık kaynak kodlu olan QGIS programı etkin analizler yapabilmektedir. QGIS programı, topografik analiz, hidrolojik analiz, harita birleştirme, harita çıkartma gibi birçok işlem ve çözümlenmeyi yapabilmektedir. Program üçüncü taraf uygulamaları için destek vermektedir. Araştırmacı kendi çözümlenme kütüphanesini yazma (Python) ve dağıtma olanağına da sahiptir. Autodesk CIVIL 3D programı, QGIS programında oluşturulan harita ve güzergahları, desteklediği geniş dosya biçimi sayesinde kendi çalışma ortamına aktararak işleyebilmektedir. Autodesk CIVIL 3D oluşturulan bir güzergah üzerine yol yatağı tabakalarını oluşturabilmekte, ayrıca boy kesiti oluşturarak tasarımcıya kolaylıklar sağlamaktadır. Boy kesite kırmızı kotu ekleyerek güzergah alanı üzerinde yarma-dolgu hesaplamalarını, enkesitleri ve güzergah üzerinde kullanılacak rayın, balast tabakasının, alt balast tabakasının, alt temel ve toprak işlerinin analizlerini kolaylıkla yapabilmektedir. Ancak tünel girdilerini tasarımcı kendi oluşturmak zorundadır. Tünel kısmının analizlerinde bazı problemler mevcuttur. Burada tasarımcının tünel kısmındaki verileri kendinin hesaplaması daha faydalı olacaktır.

Araştırılan Niğde-Kayseri hızlı tren hattının tren setleri ile kaba maliyeti 2,629,206,080.6 TL hesaplanmıştır. Yerel bir hava havalimanı için yaklaşık maliyetin 620,849,394.00 TL [21] olduğu düşünüldüğünde dört katı maliyet çıkmaktadır. Ancak işletme maliyetlerinin havalimanlarında %71,6 [21], hızlı tren işletmeciliğinde %25,5 [22] düzeyindedir. Ayrıca hızlı tren, uçuş sıklığı, uçuş noktası çeşitliliği, bilet fiyatı ve aktarma sayısı gibi avantajlı bir havalimanı erişimi sağlamanın yanında Niğde kentinin erişilebilirliğine katkıda bulunacaktır. Diğer yandan, yerel havalimanı benzer yoğunluktaki illerdeki havalimanları göz önüne alındığında, yetersiz talep nedeniyle istenen işletme koşullarını sağlamada yetersiz kalması olasılığının yaratabileceği düşük sıklığa sahip uçuşlar ve yüksek bilet fiyatları, kullanıcıların yeniden çevre illerdeki havalimanlarına yönelmesine yol açabilecektir. Bu da havalimanını, hızlı tren karşısındaki maliyet avantajını orta ve uzun dönem içinde kaybetme tehlikesini beraberinde getirmektedir.

Niğde-Kayseri hattı üzerindeki Yeşilhisar-Araplı kesiminde topografyanın ani değişmesi sebebi ile yedi kilometre uzunluğunda bir tünel planlanmıştır. Bu tünel Niğde-Kayseri hızlı tren hattı maliyetinin önemli parçasını oluşturmaktadır.

Maliyet hesaplamaları ülkemizde yapılmış ve halen devam etmekte olan projelerin kilometre maliyetleri göz önüne alınarak yapılmıştır. İstanbul-Ankara hızlı tren

hattının 2009 yılındaki maliyeti 8,954,000,000.00 TL'dir. Birim maliyeti 17,413,457.79 TL/km olup 2009 yılı dolar kuru (1.65) göz önüne alındığında 10,553,610.78 \$/km'dir. Günümüzde fiyatları ile bu maliyet 71,236,872.78 TL'dir. Ankara-Sivas hızlı tren hattının proje bedeli 13,172,263,000.00 TL, birim maliyeti ise 32,284,958.33 TL/km'dir. Niğde-Kayseri hızlı tren hattı toplam maliyeti 2,629,206,080.6 TL olarak kestirilmiştir. Kilometre başına düşen maliyet ise 20,702,410.09 TL/km'dir. Günümüzde dolar kuruna göre karşılığı 3,089,911.95 \$/km'dir. Dünya'daki örneklerle kıyasladığımızda kilometre başına hat maliyetinin Fransa TGV'sinde 3-5 milyon Euro civarında olduğu görülmektedir.

Hattın uzunluğu 127 km ve proje hızı 200 km/s olarak düşünüldüğünde iki uç istasyon arasındaki mesafe tünel geçişleri ve istasyon duraklamaları ile toplam 60 dakika olarak hesaplanmıştır. Havalimanı erişiminde bu süre 45 dakikaya kadar düşmektedir. Niğde kent merkezinden uluslararası bir havalimanına trenle yapılan 45 dakikalık erişim süresi, bu tür bir erişim için uygun olmasının yanında, Kapadokya bölgesindeki turizm hareketliliğine Niğde'nin de uzun vadede eklenmesini sağlayabilir.

Ayrıca hızlı tren yatırımlarının sadece maliyet açısından değerlendirilmesi hatalı olacaktır. Dünya üzerinde karlı işletmeye sahip tren hatları nadirdir. Ülkeler için dikkatli planlanmış ve bütünleştirilmiş raylı sistemler sürdürülebilirlik açısından ulaştırma politikası olarak benimsenmelidir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (Turnitin): %8

Kaynaklar

- [1] D.H.M.İ., Hava ulaşımı istatistikleri, 2021. <https://www.dhmi.gov.tr/Sayfalar/Istatistikler.aspx> (Erişim Mar. 28, 2021).
- [2] Lufthansa, Rail&Fly Lufthansa. <https://www.lufthansa.com/us/en/rail-and-fly> (Erişim Mar. 31, 2021).
- [3] Y. Bakış, CBS (Coğrafi Bilgi Sistemi) tabanlı katı atık toplama güzergah optimizasyonu için örnek bir çalışma, Yüksek Lisans Tezi, Bahçeşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012.
- [4] C. Kırılangoçlu, Coğrafi bilgi sistemleri tabanlı raylı sistem güzergah tasarımı: İstanbul örneği, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, 2014.
- [5] A. Djenaliev, Multicriteria decision making and GIS for railroad planning in Kyrgyzstan, Master Thesis, KTH, Stockholm (closed 20110301), 2007.
- [6] J. E. Kennedy, S. Lyle, R. Smith, ve G. Jeffress, Using cadastral maps to accommodate high-speed rail systems in Texas. The ACSM Annual Conference, Survey Summit, San Diego, CA, July 7-12, 2011.
- [7] J. Hasse, A Geographic evaluation of gloucester county commuter rail corridor options a geographic evaluation of gloucester county commuter rail corridor options, Research Report, 2006.

- [8] G. C. Martin R., High speed rail alignment generation and optimization using GIS, Esri International User Conference, San Diego, CA: ESRI, 2012.
- [9] W. Bin Zhang, Economic geography and transportation conditions with endogenous time distribution amongst work, travel, and leisure, J. Transp. Geogr., 15(6), 476–493, 2007. doi: 10.1016/j.jtrangeo.2007.01.001.
- [10] O. Ekim, Yüksek hızlı demiryolları için geometrik özellikler ve altyapı, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
- [11] A. N. Yüce, Ülkemizde planlanan, yapılmakta olan ve yapılan yüksek hızlı demiryolu hatlarının incelenmesi ve karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2015.
- [12] HKMO, Coğrafi Bilgi Sistemleri. https://www.hkmo.org.tr/resimler/ekler/KOTM_588e674d3f0faf9_ek.pdf, İstanbul, 2005. (Erişim Mart 2021)
- [13] X. Wei, Using GIS technology for railway design and management, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 978–981.1996
- [14] MTA Genel Müdürlüğü. <https://www.mta.gov.tr/v3.0/birimler/uzaktan-algilama>(Erişim Mar. 28, 2021).
- [15] About ArcGIS | Mapping & Analytics Software and Services. <https://www.esri.com/en-us/arcgis/about-arcgis/overview> (Erişim Mar. 28, 2021).
- [16] İBB, İstanbul metropoliten alanı kentsel ulaşım ana planı (İUAP), İstanbul, 2011.
- [17] Biletall, Uçak ve Otobüs Bileti Satış Sitesi. <https://www.biletall.com/otobus-seferler?NeredenId=990&NereyeId=738>arih=29.03.2021&gidisDonusMu=false&DTarih=05.04.2021>(Erişim Mar. 28, 2021).
- [18] K.G.M., Trafik hacim haritaları. <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Trafik/TrafikHacimHaritasi.aspx> (Erişim Mar. 28, 2021).
- [19] K. Tözün ve A. Özyavaş, Niğde ve Kayseri Bölgelerinde yüzeylemiş kayaların alterasyon özelliklerinin ASTER uydu görüntüleri yardımıyla tespit edilmesi, 6. Uzaktan algılama-CBS sempozyumu (UZAL-CBS 2016), sayfa 557-566, Adana, 5-7 Ekim 2016.
- [20] QGIS Development Team, QGIS Geographic Information System. 2021, [Çevrimiçi]. Available at: <https://www.qgis.org>.
- [21] D.H.İ.G.M., Havayolu Sektör Raporları. <https://www.dhmi.gov.tr/Sayfalar/HavaYoluSektorRaporlari.aspx> (Erişim Mar. 28, 2021).
- [22] A. Levinson, D. Gillen, ve D. Kanafani, UC Berkeley The Full Cost Of Intercity Transportation-A Comparison Of High Speed Rail, Air And Highway Transportation In California Publication Date, June. Research Reports, 1996.





Mansapta trapez daralma olması durumunda baraj yıkılması taşkın dalgası yayılımının sığ su denklemleri ile modellenmesi

Modelling of dam break flood wave propagation in case trapezoidal contraction on downstream using SWEs

Selahattin Kocaman¹ , Kaan Dal^{2*} , Ada Yılmaz³ 

^{1,2,3}İskenderun Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Hatay, Türkiye

Özet

Baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın dalgası can ve mal kayıplarına sebep olabileceği için hidrolik alanında önemli bir çalışma konusudur. Ancak gerçek baraj yıkılması olayına ait veriler yetersizdir ve bu durum konu ile ilgili araştırmacıların bilgisini de sınırlamaktadır. Bu nedenle baraj yıkılması verisi üreten deneysel çalışmalar hem konunun daha iyi anlaşılması hem de nümerik ve analitik yöntemlerin doğrulanması için büyük önem taşımaktadırlar. Bu çalışmada, mansap bölgesinde trapez daralma bulunması durumundaki baraj yıkılması akımına ait yüzey profilleri ve noktasal su seviyesi değişimleri incelenmiştir. Verilerin karşılaştırılması deneysel ve sayısal olarak yapılmıştır. Sayısal veriler ücretsiz BASEMENT yazılımında bulunan 2 boyutlu sığ su denklemleri yardımıyla elde edilmiştir. Riemann çözücü olarak ise tam çözücü kullanılmıştır. Deneysel sonuçlara ise görüntü işleme yöntemi aracılığı ile ulaşılmıştır. Sonuçların uyum içerisinde olduğu ve 2 boyutlu sığ su denklemlerine dayanan analizin mansapta trapez daralma bulunan bir baraj yıkılması problemini çözebilme kapasitesi olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca bu yöntem, daha gelişmiş bilgisayar teknolojisi gerektiren 3 boyutlu Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes denklemlerine kıyasla hızlı çözüm imkanı sunan kullanışlı bir yöntem olarak değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Baraj yıkılması, Kesit daralması, Sığ su denklemleri, Sayısal model

1 Giriş

Akışkanlar mekaniğinde düzenli olmayan akışların araştırılmasında baraj yıkılması olayı kayda değer bir yer tutmaktadır. Baraj yıkılması, gerçekleşmesi durumunda geniş çaplı felakete sebep olabileceğinden araştırmacıların ilgisini çeken bir konu olmuştur. Bu nedenle baraj yıkılması halinde mansapta su altında kalabilecek yerlerin önceden belirlenebilmesi ve erken uyarı sistemleri gibi çeşitli önlemlerin geliştirilebilmesi amacıyla sayısal ve deneysel çalışmalar yapılmaktadır. Bir barajın yıkılması halinde meydana gelecek taşkın dalgasının; taban eğimi, vadi topografyası, bitki örtüsü ve varsa yerleşim biriminin durumu gibi çok çeşitli mansap koşullardan etkilenmesi kaçınılmazdır. Genel olarak bu etkiler kendisini yansıyan

Abstract

Since the flood wave resulting from the dam-break can cause loss of lives and properties, it is a significant field in the hydraulic studies. However, researchers have limited knowledge regarding the phenomena due to the lack of the real case dam-break data. Experimental studies producing the dam-break data are important to better understand the problem and validate the numerical or analytical data. Surface profiles and water levels of a dam-break flow in the case of downstream contraction were analyzed in the present study. Experimental and numerical results were compared using free surface profiles and water level-time curves. 2D shallow water equations (SWEs) with exact Riemann solver inside the free BASEMENT software were employed to obtain the numerical results. Experimental results were acquired using image processing technique. It was concluded that the results agree well and model based on 2D SWEs is able to solve the dam-break problem in case trapezoidal contraction on the downstream. In addition, this method was considered as a useful method that offers faster and reliable solution compared to 3D Reynolds Averaged Navier-Stokes equations, which require more advanced computer technology.

Keywords: Dam break, Contraction, Shallow water equations, Numerical model

dalgalar, hidrolik sıçramalar ve ani şoklar olarak gösterebilmektedir. Kaotik akım koşullarının meydana geldiği böyle bir durumun sayısal olarak modellenmesi karmaşıktır ve deneysel çalışmalarla desteklenmesi gerekmektedir.

Yıkılma olayı sonucu mambadan mansaba doğru ilerleyen kontrolsüz akımın özelliklerini etkileyen önemli unsurlardan birisi kesit daralmasıdır. Akarsudaki yapay veya doğal nedenlerle oluşan kesit daralması akımın karakteristiğinde büyük etkiye sahip olabilmektedir. Bu nedenle yıkılma olayı sonrası ortaya çıkacak akımın özelliklerini tespit etmek için mansap tarafındaki kesit daralmasının akımı nasıl ve ne kadar etkileyeceği iyi belirlenmelidir.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: kaan.dal@iste.edu.tr (K.Dal)

Geliş / Received: 04.03.2021 Kabul / Accepted: 31.05.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.825144

Baraj yıkılması sebebi ile oluşan taşkın dalgasının analizi büyük ölçekli bir hidrolik problemdir. Bu tür problemlerin sayısal analizleri sırasında 3 boyutlu Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RONS) denklemleri kullanılmaktadır. Bu çözümler için hassas sonuçlar elde edilmek istendiğinde ileri derecede gelişmiş bilgisayar teknolojilerinden istifade edilmekte ve analizler birkaç aya varan uzun sürelerde yapılabilmektedir. Analizler için başvurulabilecek bir diğer yöntem ise sığ su denklemlerine (Shallow Water Equations, SWE) dayanan 1 ve 2 boyutlu çözümlerdir. Bu denklemlerin sayısal çözümleri, RONS denklemlerini kullanan 3 boyutlu çözümlere göre daha az işlemci gücü gerektirmektedir. Ayrıca analiz süreleri de kayda değer biçimde düşmektedir. Gerçek bir baraj yıkılması olayı 3 boyutlu olsa da, ideal koşullar sağlanarak problemin analizinde etkin olan kuvvetlerin 1 veya 2 boyuta indirgenmesi mümkün olabilmektedir. Bu durumda SWE kullanımını çözüm açısından önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Denklemler su derinliğinin tespit edilmesi için çözülmekte ve çözüme yük olan su yüzeyinin konumunun belirlenmesi durumu ortadan kalkmaktadır. Diğer yandan, düşey yöndeki ivme bileşeni ihmal edilip basınç dağılımının hidrostatik olduğu varsayıldığı için denklemlerin çözümü sırasında ayrıca bir basınç hesabına da gerek kalmamaktadır. Bu gibi durumlar, özellikle çözümün sadeliği açısından SWE'nin diğer analiz yöntemlerine kıyasla üstünlükleri olarak gösterilebilmektedir. Ancak bahsedilen varsayımlar bazı problemlerin çözümünde kritik hatalara yol açabileceğinden SWE'nin kullanımında ve yorumlanmasında mevcut problem şartlarının göz önünde tutulması gerekmektedir. Bu çalışmada baraj yıkılması akımı ince ve uzun bir kanalda incelendiği için akım üzerinde 3. boyut etkisinin diğer eksenlere kıyasla göreceli olarak az olacağı ve problemdeki baskın kuvvetlerin daralma bölgesi dışında iki eksenle meydana geleceği kabul edilmiştir. Kendisine göre daha gelişmiş ve daha hassas çözümler yapabilen yöntemler bulunmasına rağmen, SWE bahsi geçen avantajlarından dolayı halen önemini kaybetmemiştir ve günümüzde pek çok araştırmacı tarafından yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Araştırmacıların elinde baraj yıkılması konusunda gerçek bir vakaya ait veriler olmadığı için, sayısal analiz sonuçlarının doğrulanması ancak deneysel veriler ile mümkün olmaktadır.

Literatürde baraj yıkılması akımının düzensiz kanal koşulları için incelendiği deneysel ve nümerik pek çok çalışma bulunmaktadır. Kanal geometrisinde güçlü değişimlerin [1], deneysel ve sayısal olarak kesitte daralma etkisinin [2, 3], 2 boyutlu bir sayısal modelin daralan kesitli bir kanala uygulanmasının [4], düzensiz yatak topografyası için geliştirilen 2 boyutlu bir modelin daralan kesit problemine uygulanmasının [5] ve tabanda eşik bulunmasının deneysel ve sığ su denklemlerine dayanan nümerik analiz sonuçlarının karşılaştırılmasının [6] araştırıldığı çalışmalar yapılmıştır. Son zamanlarda görüntü işleme metodunun baraj yıkılmasına uygulandığı çalışmalar da yaygınlaşmaktadır [7-11]. Ayrıca görüntü işleme metodu ile daralan kanal kesiti içeren baraj yıkılması problemi de incelenmiştir [12].

Sığ su denklemlerine baraj yıkılması akımının analizlerinde yaygın şekilde başvurulmakta [13-16] ve son yıllarda farklı çözüm yöntemleriyle birlikte kullanılarak birleşik çözüm modelleri de geliştirilmektedir [17, 18]. Ayrıca literatürde ardışık baraj yıkılması akımının eğimli yatak koşullarında incelendiği çalışmalar da mevcuttur [19]. Bu çalışmada, eğimsiz ve kuru yatak şartlarında baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın dalgasının mansap tarafında trapez şekilde daralan bir kesit bulunması durumunda yayılmasının deneysel verileri görüntü işleme yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar, iki boyutlu sığ su denklemlerini kullanarak çözüm yapan ve ücretsiz olan BASEMENT yazılımından elde edilen nümerik veriler ile karşılaştırılmıştır.

2 Teori

Sığ su denklemleri, Navier-Stokes denklemlerinden düşey ivmenin ihmal edilmesi ile elde edilebilmektedir. Serbest yüzeyli akımlarda, akarsu taşkın analizlerinde, okyanuslardaki tsunami dalgasının ve baraj yıkılması taşkın dalgasının yayılması gibi problemlerin sayısal çözümünde yaygın biçimde kullanılmaktadır.

Sığ su denklemleri korunumlu ve korunumlu olmayan çeşitli formlarda ifade edilmektedir. Baraj yıkılması gibi içerisinde şok dalgası bulduran problemlerin çözümünde korunumlu denklemler korunumlu olmayan formdan daha iyi sonuçlar vermektedir. BASEMENT yazılımı, korunumlu formda iki boyutlu denklemleri çözmektedir [20]. Bu denklemlerin sonlu hacimler yöntemi kullanılarak yapılan sayısal çözümü ile birbirine dik iki farklı doğrultudaki ortalama hız ve akım derinlikleri elde edilmektedir. Sistemin vektör formatındaki eşitliği aşağıdaki gibidir;

$$Ut + \nabla \cdot (F, G) + S = 0 \quad (1)$$

Burada; U bağımlı değişkenlerin vektörüdür. Alt indis t zamana göre türevi göstermektedir. F ve G sırası ile x ve y doğrultularındaki akım, S ise kaynak terimidir.

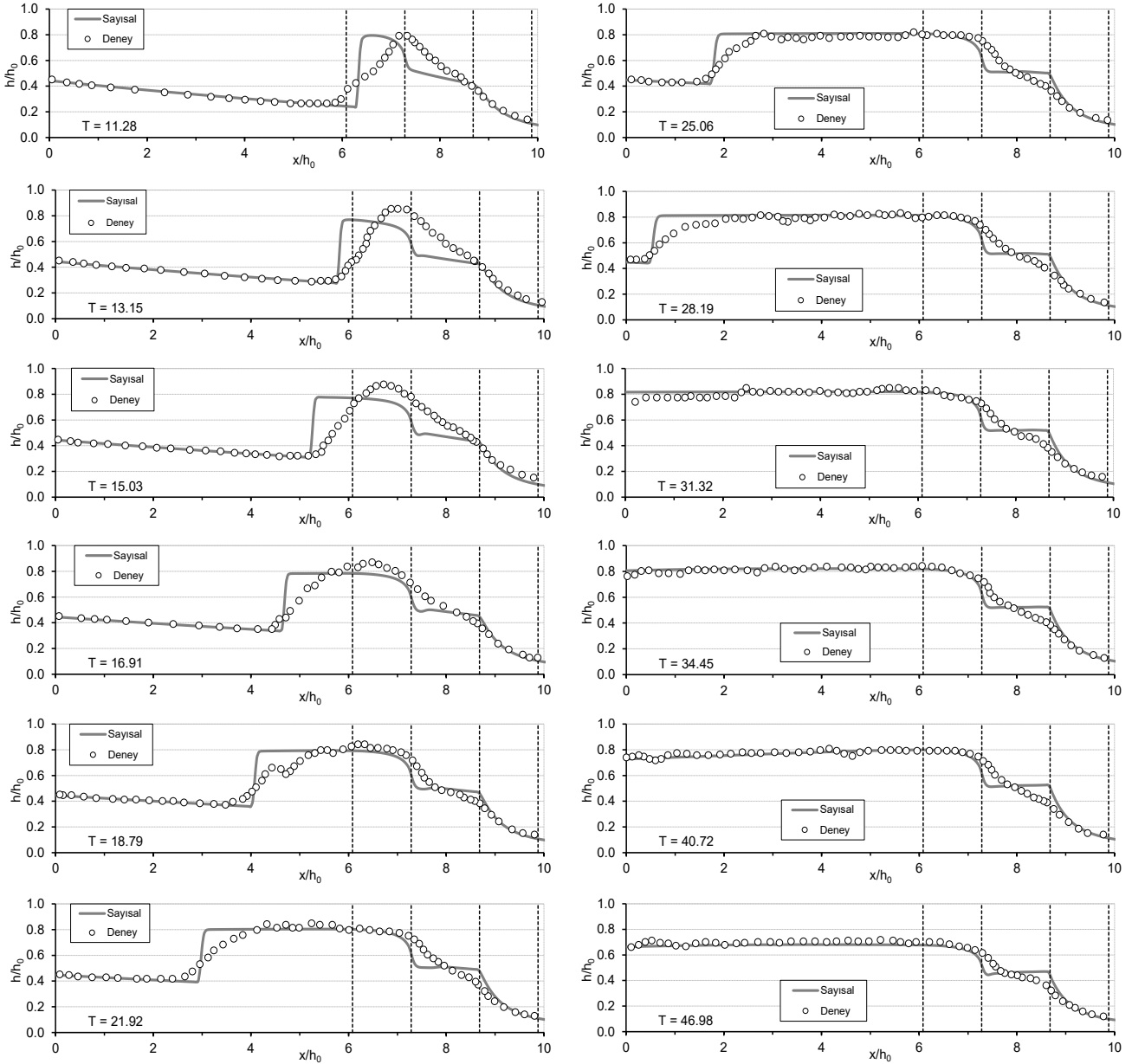
$$U = \begin{pmatrix} h \\ uh \\ vh \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$F = \begin{pmatrix} uh \\ u^2h + \frac{1}{2}gh^2 - v_t h \frac{\partial u}{\partial x} \\ uvh - v_t h \frac{\partial u}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$G = \begin{pmatrix} vh \\ uvh - v_t h \frac{\partial v}{\partial x} \\ v^2h + \frac{1}{2}gh^2 - v_t h \frac{\partial v}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$S = \begin{pmatrix} 0 \\ gh(S_{fx} - S_{Bx}) \\ gh(S_{fy} - S_{By}) \end{pmatrix} \quad (5)$$

Burada; h akım derinliği (metre), u ve v sırasıyla x ve y doğrultularındaki derinlik ortalamalı hız bileşenlerini (m/s),



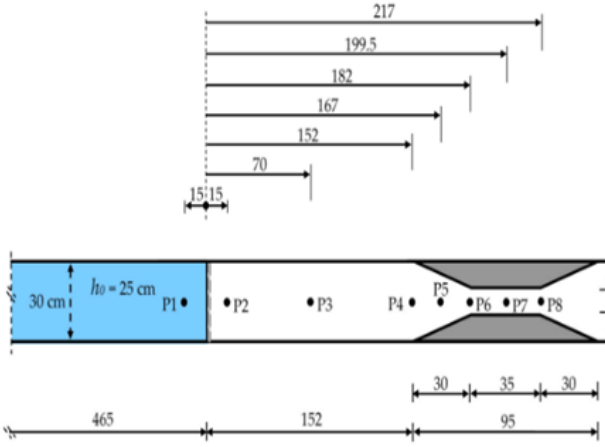
Şekil 4. Deneysel ve nümerik su yüzü profilleri sonuçlarının karşılaştırılması

Bu durum negatif dalganın ön kısmında oluşmakta ve memba yönünde ilerlemektedir. Değişken akım için deneysel olarak akım rejimlerinin belirlenmesi zordur. Bununla birlikte sayısal modeller ile rejim değişiklikleri ve Froude sayısının belirlenmesi kolaylıkla hesaplanabilmektedir [22-23].

Ayrıca daralma sebebiyle oluşan kabarmanın memba tarafına doğru ilerlemesi $T=15.03$, $T=18.79$ ve $T=31.32$ zamanlarına ait grafikler incelendiğinde görülmektedir. Mansap tarafında meydana gelen daralma sebebiyle kanal boyunca memba ve mansap taraflarında rejim geçişlerinin bulunduğu karmaşık bir akım ortamı oluşmuştur. Bu nedenle laboratuvar ortamında oluşturulan deney ortamının nümerik modelin çözüm yeteneklerinin doğrulanabilmesi için iyi bir test ortamı olduğu düşünülmüştür.

Hidrolik sıçramanın oluşmaya başladığı ve negatif dalganın membaya doğru ilerlediği $T=11.28$, $T=15.03$, $T=18.79$ ve $T=25.06$ grafiklerinde kabarma dalgasının önünde süreksizlikler olduğu ve sonuçlar arasındaki uyumun bu bölgelerde azaldığı görülmektedir. Sığ su denklemleri, hiperbolik karakterli kısmi diferansiyel denklemlerdir. Hidrolik sıçrama gibi su yüzeyinde meydana gelen şok dalgalarından dolayı bu denklemlerin çözümlerinde süreksizlikler bulunmaktadır. Sığ su denklemlerinin doğası gereği oluşan bu süreksizliklerin çözümünde Riemann çözücülerden yararlanılmaktadır. Denklemlerin türetilmesinde düşey ivme bileşenleri ihmal edilip, basınç dağılımının hidrostatik olduğu kabul edilmektedir. Ancak bu varsayım, daralma bölgesinde taşkın dalgasının geçişi esnasında, su seviyesinin kabardığı negatif dalganın olduğu

kısımda ve kanalın en dar boğazının başladığı ve bittiği noktalar gibi su yüzeyinde meydana gelen eğriliklerin olduğu durumlarda geçerli olmamaktadır.



Şekil 5. Ölçüm noktalarının konumları [22]

Deney ve sayısal sonuçlara ait su yüzü profilleri karşılaştırıldığında bu durumlar dışında sığ su denklemlerinin su seviyelerini başarılı bir biçimde belirleyebildiği görülmektedir. Ayrıca, hareketli bir hidrolik sıçrama olarak düşünülen negatif dalga önu sayısal çözümde bir şok dalgası olarak öngörüldüğünden bu bölgede de süreksizlik şeklinde uyumsuzluklar göze çarpmaktadır. Buna karşın deneysel çalışmadaki negatif dalganın yayılma hızının başlangıç aşaması dışında sayısal çözüm ile uyumlu olduğu göze çarpmaktadır.

Kanal boyunca biri rezervuarda olmak üzere toplam 8 farklı noktada deney görüntülerinden sanal derinlik ölçer kullanılarak su seviyelerinin zamana bağlı değişimleri elde edilmiştir. Şekil 5'te ölçüm noktalarının konumları gösterilmiştir. Şekil 6'da tüm ölçüm noktalarında (P1-P8) deney ve sayısal sonuçlar arasında zamana bağlı su seviyesi değişimlerinin boyutsuz karşılaştırılması görülmektedir. Genel olarak kesitin en dar kısmın başladığı P6 ve P8 noktaları dışında deneysel ölçümler ile sayısal veriler arasında oldukça iyi bir uyumun olduğu görülmektedir. Sayısal çözümde P6 noktasında su seviyeleri deney sonuçlarının altında, P8 ölçüm noktasında ise üstünde çıkmaktadır. Su seviyesinde ani değişimlerin olduğu ve yüzü eğriliğinin çok fazla olduğu bu noktalarda düşey ivme bileşenleri baskın olduğundan dolayı hidrostatik basınç dağılımı kabulü geçerli olmadığından bu ölçüm noktalarında sayısal sonuçlarla deney sonuçları arasında uyumsuzluk olduğu düşünülmektedir. Bu durum Şekil 4'de verilen su yüzü profili grafiklerinde de en dar kesitin başlangıç ($x/h_0=7.28$) ve bitiş ($x/h_0=8.68$) noktalarında da açıkça görülmektedir. Bu etkilerin dahil edildiği RONS denklemlerine dayalı literatürdeki çözümlerde sığ su denklemlerinin sayısal çözümünün aksine deney sonuçları ile oldukça iyi bir uyum olduğu gözlenmiştir [22].

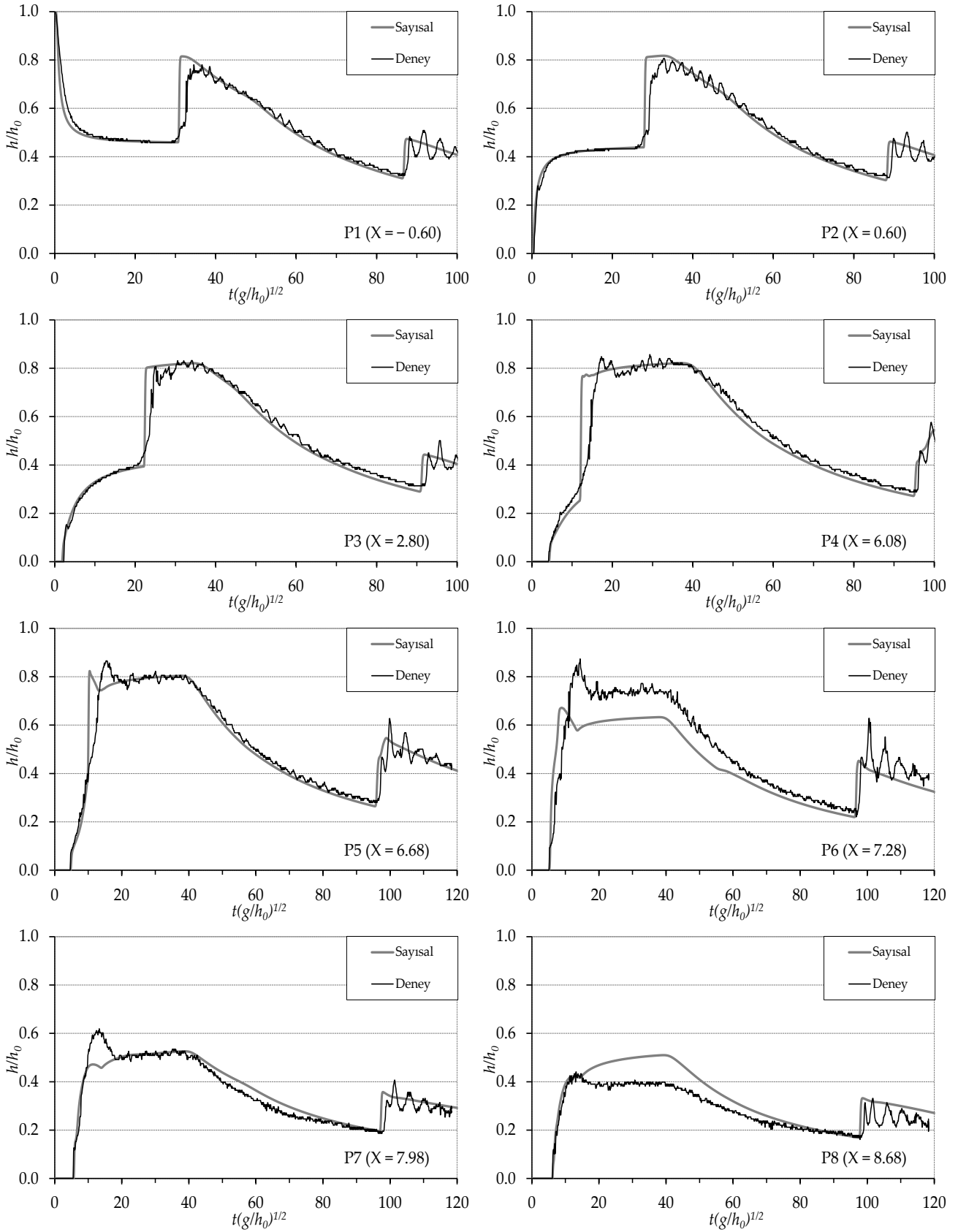
Barajı temsil eden kapağın ani bir şekilde kalkmasıyla birlikte rezervuarda barajın hemen membasında bulunan P1 noktasında $T=5$ anına kadar ani bir seviye düşmesi, barajın hemen mansabında bulunan P2 noktasında ise bir yükselme

gözlenmektedir. Her iki nokta için de bu andan sonra debinin zamanla azalmasıyla birlikte yaklaşık $T=30$ anına kadar daha su seviyesindeki değişim yavaş seyretmektedir. Yansıyan dalganın P1 ve P2 noktalarına tekrar ulaşmasıyla birlikte (yaklaşık olarak $T=30$) su seviyesinde tekrar ani bir artış gözlenmektedir. Bu ana kadar sayısal ve deneysel sonuçlar arasında oldukça iyi bir uyum olduğu görülmektedir. Bununla birlikte P1 noktasında su seviyesinin azalması esnasında ($T=0-5$ anları arası) sayısal çözümün deney ölçümlerinden biraz daha aşağı seviyede kaldığı diğer bir ifade ile sayısal çözümde rezervuarın daha erken boşaldığı görülmektedir. Negatif dalganın geçişi ile birlikte kesitlerde maksimum su seviyelerinin meydana geldiği ($T=35$) ve sayısal sonuçların deney sonuçlarının üzerinde su seviyesine sahip oldukları gözlenmiştir. Sayısal çözümde negatif dalga önünün bir miktar daha hızlı hareket ettiği ve hidrolik sıçrama şeklinde ilerleyen dalga önündeki süreksizlikten dolayı daha dik bir şekilde meydana geldiği görülmektedir. Rezervuarın sonlu bir uzunluğa sahip olmasından dolayı debinin zamanla azalması ve daralan kesitten suyun tahliye edilmesi ile birlikte ölçüm alınan noktalardaki su seviyelerinde zamanla azalan ($T=35-85$) bir düşüş görülmektedir. Bu aşamada deneysel ölçümlerde hidrolik sıçramanın da etkisiyle su yüzeyinde küçük salınımlar meydana gelmesine karşın sayısal çözümde su yüzeyinin daha düzgün bir profile sahip olduğu göze çarpmaktadır.

Grafiklerde su seviyeleri alçalmakta iken kanal memba ucundan yansıyan kabarma dalgasının ölçüm alınan kesitlere tekrar ulaşmasıyla birlikte bu noktalarda su seviyelerinin tekrar hızla yükseldiği ($T>85$) ve su yüzeyinde dalgalanmaların meydana geldiği görülmektedir. Sayısal çözümde dalganın önünün bu noktaya tekrar gelme zamanı yaklaşık aynı olmakla birlikte sayısal modelin bu dalgalanmaları tam olarak belirleyemediği ve su seviyelerinin dalgalanmaların ortalama çizgisi şeklinde hareket ettiği görülmektedir. Benzer akım davranışlarının diğer ölçüm noktalarında da meydana geldiği göze çarpmaktadır. Buna karşın, ölçüm alınan noktalarda daralma bölgesine yaklaştıkça baraj yıkılması taşkın dalgasının bu noktalara ulaşması ile yansıyan dalganın ulaşması arasında geçen sürenin kısa olması sebebiyle kesintisiz ani bir seviye yükselmesi gözlenmektedir. Bu durum özellikle daralmanın başlangıcı olan P4 ve P5 noktalarında belirgin biçimde göze çarpmaktadır ($T=5-15$). Bu kısımlarda sonuçlar arasında eğilim olarak uyum olsa da; sayısal çözümün deneysel verilere göre pik değerleri biraz daha aşağı bir seviyede belirlediği ve pik değerlerin oluşma süresini biraz daha erken olarak tahmin ettiği görülmektedir.

Seviye değişiminin yavaş bir şekilde devam ettiği ($T=20-80$) anlarda da sayısal çözüme ait veriler deneysel verilere göre biraz daha düşük bir seviyede seyretmiştir. Ölçüm alınan P6, P7 ve P8 noktalarında ise daralma sebebiyle oluşan yansıma dalgası hissedilmemiş ve sürekli bir şekilde seviye artışı meydana gelmiştir.

Sığ su denklemlerine dayalı sayısal çözümün akımın davranışını, yansıyan dalganın oluştuğu ve taşkın dalgasının daralan kesitten geçtiği anlar hariç genel olarak doğru tahmin ettiği görülmektedir. Bahsi geçen kısımlarda deneysel ve sayısal verilerin uyumsuzluğunun, su yüzü profillerine ait



Şekil 6. Deneysel ve nümerik noktasal ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

veriler yorumlanırken de bahsedildiği gibi sığ su denklemleri ile problem çözülürken düşey ivme bileşenlerinin ihmal edilip, basınç dağılımının hidrostatik olduğunun kabul edilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Gerçekte ise dalga yansıması veya kesit daralması gibi durumlarda yüzey eğriliği oluşmakta ve basınç dağılımının hidrostatik olması mümkün olmamaktadır. Bu durum deneysel ve sayısal verilerin tutarsız olduğu kısımların temel sebebi olmaktadır.

Genel olarak bakıldığında deneysel olarak elde edilen dalga önünün ilerleme hızlarının ve su yüzü profillerinin tam Riemann çözücü ile yapılan sayısal çözüm sonuçları ile iyi bir uyum içerisinde oldukları söylenebilir.

Yapılan çalışmada, yatay dikdörtgen bir kanalda rijit yatak koşullarında, mansapta trapez daralma olması durumu için ideal koşullara sahip baraj yıkılması problemi iki boyutlu sığ su denklemleri kullanılarak ele alınmıştır. Gerçek arazi verilerinin bulunmamasından dolayı baraj yıkılması problemine ait sayısal modellerin doğrulanması için deneysel çalışmalardan yararlanılmaktadır. Gerçekte baraj yıkılması problemi arazi topoğrafyasında oyulma, yığılmaların olduğu ve taşkın sürüklediği enkaz etkilerinin bulunduğu daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Bunun yanında, taşkın güzergâhı üzerinde topografyada daralmalar, taban eğimlerinde ani değişimlerin olması; yerleşim birimlerinin, yolların, köprülerin vb. varlığı ve topoğrafyadaki farklı bitki örtülerinin bulunması olası su seviyeleri ve dalga yayılım hızları gibi akım karakteristiği üzerinde önemli etkilere sahip olacaktır. Ayrıca bu etkiler pürüzlülük değerlerinin doğru belirlenmesinde güçlükler de neden olacaktır. Bununla birlikte, dar vadelerde baraj yıkılması analizlerinin yapılabilmesi için sığ su denklemlerine ait 1 boyutlu denklemler kullanılabilirken, taşkın geniş arazilerde olması durumunda Giriş kısmında da belirtildiği gibi arazi şartları göz önüne alınarak 2 boyutlu çözümlere de ihtiyaç duyulacaktır [24]. Ayrıca, taşkın güzergâhı üzerinde köprü gibi yapıların varlığı durumunda hassas sonuçlar istenildiğinde türbülans modellerini de içeren 3 boyutlu sayısal çözümlere gereksinim duyulacaktır. Baraj yıkılması taşkınları gibi büyük ölçekli gerçek arazi topoğrafyasına uygulanacak 3 boyutlu modellerde çözüm süreleri oldukça uzun zaman alacak ve yüksek çözüm kapasitesine sahip bilgisayar sistemlerinin kullanılması gerekecektir. Buna karşın, topoğrafya iki boyutlu sığ su denklemleri ile modellenirken köprü gibi engellerin civarında akımın 3 boyutlu RONS denklemleri kullanılarak modellendiği hibrit yöntemlere başvurulması problemin çözüm süresini önemli ölçüde azaltabilecektir. Sığ su denklemlerinin sağladığı en önemli avantaj sayısal modele ait çözüm sürelerinin 3 boyutlu modellere kıyasla daha kısa olmasıdır [25]. Sonuç olarak, baraj yıkılması taşkın analizi konusunda güvenilir modellerin yapılabilmesi ve hassas sonuçların elde edilebilmesi için bu etkilerin mutlaka dikkate alınması ve sayısal modellerin bu koşulları içeren kapsamlı deneysel çalışmalarla doğrulanması gerekecektir.

5 Sonuçlar

Eğimsiz ve kuru yatak şartlarında baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın dalgasının, mansap tarafında trapez şekilde daralan kesit olması durumunda yayılmasının deneysel verileri görüntü işleme metodu ile elde edilmiştir.

Mansapta bulunan kesit daralmasının akıma önemli bir etkisi olduğu gözlenmiştir. Akımın bir kısmı daralmış kesitten geçerken bir kısmının daralma karşısında kabardığı ve membaya doğru negatif şok dalgasının yayıldığı görülmüştür. Negatif dalga yayılmasına ait su yüzü profilleri görüntü işleme metodu ile belirlenmiş ve bu yöntemin sığ su denklemlerine dayalı ve tam Riemann çözücü kullanılarak çözüm yapılan BASEMENT yazılımından elde edilen sayısal sonuçlar ile kabul edilebilir uyum içerisinde olduğu gözlemlenmiştir.

Ayrıca 3 boyutlu RONS denklemlerini kullanan sayısal analiz yöntemleri yerine, daha az gelişmiş bilgisayar teknolojisi ve hesaplama gücü gereksinimi sayesinde daha kısa sürede çözüm yapabilen 2 boyutlu sığ su denklemlerini kullanan yazılımların da karmaşık hidrolik problemlerden biri olan baraj yıkılması taşkın dalgalarının analizlerinde iyi bir alternatif olarak kullanılabilirliği görülmüştür. Öte yandan daha düşük bilgisayar teknolojisi ihtiyacının, daha düşük maliyet anlamına gelmesinin de önemli bir avantaj olduğu düşünülmüştür.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %5

Kaynaklar

- [1] P. Garcia-Navarro, A. Fras and I. Villanueva, Dam-break flow simulation: some results for one-dimensional models of real cases, *Journal of Hydrology*, 216 (3), 227-247, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00007-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00007-4).
- [2] F. Aureli, P. Mignosa and M. Tomirotti, Numerical simulation and experimental verification of dam-break flows with shocks. *Journal of Hydraulic Research*, 38 (3), 197-206, 2000. <https://doi.org/10.1080/00221680009498337>.
- [3] S. Kocaman, Baraj yıkılması probleminin deneysel ve teorik incelenmesi. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye, 2007.
- [4] P. Brufau and P. Garcia-Navarro, Two-dimensional dam break flow simulation, *International Journal for Numerical Methods In Fluids*, 33 (1), 35-57, 2000. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)10970363\(20000515\)33:1<35:AID-FLD999>3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/(SICI)10970363(20000515)33:1<35:AID-FLD999>3.0.CO;2-D).
- [5] Q. Liang, Simulation of shallow flows in nonuniform open channels, *Journal of Fluids Engineering*, 130 (1), 011205, 2008. <https://doi.org/10.1115/1.2829593>.
- [6] F. Aureli, A. Maranzoni, P. Mignosa and C. Ziveri, Dam-break flows: acquisition of experimental data through an imaging technique and 2D numerical modeling, *Journal of Hydraulic Engineering*, 134 (8),

- 1089-1101, 2008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:8\(1089\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:8(1089)).
- [7] H. Ozmen-Cagatay ve S. Kocaman, Dam-break flows during initial stage using SWE and RANS approaches, *Journal of Hydraulic Research*, 48 (5), 603-611, 2010. <https://doi.org/10.1080/00221686.2010.507342>.
- [8] S. Soares-Frazão and Y. Zech, Experimental study of dam-break flow against an isolated obstacle, *Journal of Hydraulic Research*, 45 (sup1), 27-36, 2007. <https://doi.org/10.1080/00221686.2007.9521830>.
- [9] K. Dal, Eğimli kanalda ardışık baraj yıkılmasının deneysel ve sayısal incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay, Türkiye, 2018.
- [10] A. Yılmaz, Akışkan-yapı etkileşimi problemlerinin deneysel ve sayısal incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay, Türkiye, 2019.
- [11] B. Erdoğan, Dikdörtgen tank içerisindeki çalkantı hareketinin deneysel ve nümerik olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay, Türkiye, 2018.
- [12] S. Kocaman, H. Ozmen-Cagatay, The effect of lateral channel contraction on dam break flows: laboratory experiment, *Journal of Hydrology*, 432, 145-153, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.02.035>.
- [13] S. Kocaman, C. Ateş ve K. Dal, Dikdörtgen kesitli kanalda kuru yatak üzerinde yayılan baraj yıkılması akımının sığ su denklemleri ile modellenmesi, 2nd International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies, Samsun, Türkiye, 30 Kasım - 02 Aralık 2018.
- [14] Y. Zhang and P. Lin, An improved SWE model for simulation of dam-break flows. *Institution of Civil Engineers-Water Management*, 169 (6), 260-274, 2016. <https://doi.org/10.1680/wama.15.00021>.
- [15] S. Kocaman and H. Ozmen-Cagatay, Investigation of dam-break induced shock waves impact on a vertical wall. *Journal of Hydrology*, 525, 1-12, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.040>.
- [16] X. G. Zheng, J.H. Pu, R.D. Chen, X.N. Liu and S.D. Shao, A novel explicit-implicit coupled solution method of SWE for long-term river meandering process induced by dam break. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 9 (6), 2647-2660, 2016. <https://doi.org/doi:10.29252/jafm.09.06.25969>
- [17] O. Castro-Orgaz and H. Chanson, Undular and broken surges in dam-break flows: a review of wave breaking strategies in a boussinesq-type framework, *Environmental Fluid Mechanics*, 20, 1383-1416, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10652-020-09749-3>
- [18] Y. Wu, L. Tian, M. Rubinato, S. Gu, T. Yu, Z. Xu and Q. Zhao, A new parallel framework of SPH-SWE for dam break simulation based on OpenMP, *Water*, 12 (5), 1395, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12051395>
- [19] S. Kocaman ve K. Dal, A new experimental study and SPH comparison for the sequential dam-break problem. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8 (11), 905, 2020. <https://doi.org/10.3390/jmse8110905>
- [20] W. Bechteler, M. Nujic and A. J. Otto, Program package FLOODSIM and its application, *Advances in Hydro-Science and-Engineering*, 762-767, 1993.
- [21] R. Faeh, R. Mueller, P. Rousselot, R. Veprek, D Vetsch, C. Volz, L. Vonwiller, L., Farshi, D, BASEMENT – basic simulation environment for computation of environmental flow and natural hazard simulation, VAW, ETH Zurich. <http://www.basement.ethz.ch>, (Erişim tarihi: Temmuz, 27, 2017).
- [22] S. Kocaman, H. Güzel, S. Evangelista, H. Ozmen-Cagatay ve G. Viccione, Experimental and numerical analysis of a dam-break flow through different contraction geometries of the channel, *Water*, 12 (4) 1124, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12041124>
- [23] H. Ozmen-Cagatay ve S. Kocaman, Dam-break flow in the presence of obstacle: experiment and CFD simulation. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics* 5(4), 541-552, 2011. <https://doi.org/10.1080/19942060.2011.11015393>
- [24] B.N. İşcen, N. Öktem, B. Yılmaz ve İ. Aydın, Sığ akım denklemlerinin hidrolikte kullanılması üzerine değerlendirmeler, *İMO Teknik Dergi*, 28 (1), 7747-7764, 2017.
- [25] S. Kocaman, S. Evangelista, H. Guzel K. Dal, A. Yılmaz, G. Viccione. Experimental and numerical investigation of 3D dam-break wave propagation in an enclosed domain with dry and wet bottom. *Applied Sciences*, 11(12),5638, 2021. <https://doi.org/10.3390/app11125638>





Bacillus sp. ile iyileştirilmiş zeminlerin donma çözülme etkisindeki davranışı The behavior of Bacillus sp. improved soils under freeze-thaw effect

Baki Bağrıaçık^{1,*}, Fatıma Masume Uslu², Esra Sunduz Yiğittekin³, Anıl Delik⁴,
Sadık Dinçer⁵

¹ Çukurova Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 01330, Adana, Türkiye
^{2,3,4,5} Çukurova Üniversitesi, Biyoloji Bölümü, 01330, Adana, Türkiye

Özet

Son yıllarda, özellikle büyük kentlerde artan nüfusa bağlı olarak arazi kullanımı git gide artmaktadır. Bu durumda, temel zemini bakımından yeterli kriterli sağlayan arazilerin kullanımının yanı sıra bu kriterleri sağlamayan arazilerin kullanımını da zorunlu hale getirmiştir. Temel zemini bakımından yeterli kriterleri sağlamayan arazilerde, kireç, uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi katkılarla zemin iyileştirme yapılarak istenilen kriterlere ulaşılmaktadır. Ancak bu katkılar doğada CO₂ salınımını artırdığı için çevre dostu değildir. Bu nedenle, bu katkıların yerini yeni nesil çevre dostu zemin iyileştirme katkıları almaktadır. Bu katkılardan bir tanesi enjekte edildiği zemin içerisinde CaCO₃ üretmekle iyileşme sağlayan Bacillus Sp.'dir. Bu bağlamda çalışma kapsamında, yüksek plastisiteli kil (CH) ve kumlu kil (SC) türü iki farklı zemin türünde yeni nesil iyileştirme katkısı olan Bacillus Sp. kullanılarak, donma çözülme döngüleri altında mukavemet ve şişme basıncı davranışları araştırılmıştır. Sonuçlara göre, Bacillus Sp.'nin CH ve SC türü zeminlerde, mukavemet ve şişme basıncı parametrelerinin iyileştirilmesinde olumlu yönde katkısı olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Zemin iyileştirme, Bacillus sp. Serbest basınç mukavemeti, Şişme basıncı

1 Giriş

Zemin iyileştirme yöntemleri, zeminlerin mühendislik özellikleri bakımından yetersiz kalması halinde derin temel sistemlerine alternatif bir yöntem olarak son yıllarda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin, derin temel sistemlerine göre daha ekonomik olması ve problemin çözüm süresi daha hızlı olması nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir. Zemin iyileştirme yöntemleri arasında çeşitli katkı malzemelerinin kullanımına yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Bu bağlamda, çok sayıda araştırmacı, çimento [1], kireç [2], uçucu kül [3], fırın cürufu [4], geri dönüştürülmüş beton agregaları [5], jeopolimer tozu [6], cam lifi [7], kenaf lifi [8], mermer tozu [9-11] gibi katkılar kullanmaktadırlar. Bu katkılar, genellikle üretimi ve/veya kullanımı sırasında çevreye CO₂ gibi bazı doğaya zarar verecek gaz salınımları meydana gelmektedir.

Bu yüzden, bu katkılara alternatif olarak zeminlerin iyileştirilmesinde bakteriyel kalsiyum karbonat (CaCO₃) kullanımı, yeni ve çevre dostu bir yaklaşım olarak git gide

Abstract

In recent years, the need for land has been increasing due to the increasing population, especially in big cities. In addition to the use of lands that meet sufficient criteria in terms of foundation soils, it has become compulsory to use lands that do not meet these criteria. In lands that do not meet sufficient criteria in terms of basic soils, improvement is made by using classical additives such as lime, fly ash, blast furnace slag. However, these additives are not environmentally friendly as they increase CO₂ emissions in nature. Therefore, in recent years, there has been an interest in new environmentally friendly additives alternative to these additives. One of these additives is Bacillus Sp. which provides improvement in the soils by producing CaCO₃ in the soil where it is injected. In this study, strength and swelling pressures were investigated under freeze-thaw cycles on high plasticity clay (CH) and sandy clay (SC) soils injected with Bacillus Sp. According to the results, it was determined that Bacillus Sp. contributed positively to the improvement of the strength and swelling pressure parameters of soils.

Keywords: Soil improvement, Bacillus sp., Strength, Swelling pressure

önem kazanmaktadır [12]. Bu çevre dostu yaklaşımda, bakteriler tarafından harekete geçirilen kalsit çökeltisi kullanılarak, zeminlerin mühendislik özellikleri iyileştirilebilmektedir. Zemin iyileştirmesi esnasında, bakterilerin kalsit biriktirme sürecindeki ana rolü, çeşitli fizyolojik eylemler sırasında alkali bir ortam üretme yeteneği ile bağlantılıdır [13]. Bakteriler kullanılarak, üretilen CO₂ ve amonyağa hidrolizini katalize ederek, bakteriyel ortamda pH ve karbonat konsantrasyonunda bir artış meydana gelmesi sağlanır [14]. Böylece, bu bakteriler vasıtasıyla, bakteriyel kalsiyum karbonat çökeltisi meydana gelmiş olur. Bu bakteriler arasında, yüksek üreaz üretimi sergileyen Bacillus pasteurii bakterileri CaCO₃ çökeltmesinde önemli rol oynamaktadır [15, 16]. Literatürde bakıldığında, bu bakterinin, zeminlerin geçirgenliğinin azaltılması ve/veya mukavemet özelliklerinin artırılmasına yönelik çalışmalar bulunduğu gözlenmiştir. Yapılan araştırmalarda, araştırmacılar farklı özelliklere sahip bazı zeminlerde

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: bbagriacik@cu.edu.tr (B. Bağrıaçık)

Geliş / Received: 17.03.2021 Kabul / Accepted: 03.07.2021 Yayımlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.898554

üretile kalsit miktarına bağı olarak zemin geçirgenliğinde, Whiffin vd. [17] tarafından % 22-% 75, Yasuhara vd. [18] tarafından % 60-% 70, Soon vd. [19] tarafından % 90, Nemati ve Voordouw [20] tarafından %98'lere varan oranlarda azalmalar meydana geldiği bildirilmiştir. Ayrıca, Ferris vd. [21] ve Ivanov ve Chu [22] gibi araştırmacılar da zemin geçirgenliğinde kayda değer oranlarda azalmalar meydana geldiğini ifade etmişlerdir. Literatürdeki sonuçlara göre, bu tür kalsit üreten bakterilerin, zeminlerin geçirgenliğinin azaltılmasında kullanılabileceğini göstermiştir. Ayrıca, yine bu tür kalsit üreten bakterilerin zeminlerin dayanım parametrelerinin araştırıldığı çalışmalar da mevcuttur [12, 17-24]. Bu çalışmalarda, araştırmacılar bu bakterilerin ürettikleri kalsit nedeniyle, zeminlerin sertliklerinin arttığı, penetrasyon kabiliyetinin azaldığı, basınç mukavemetinin önemli ölçüde arttığı, sıkışabilirliğinin ve kesme mukavemetinin iyileştiği ifade edilmiştir.

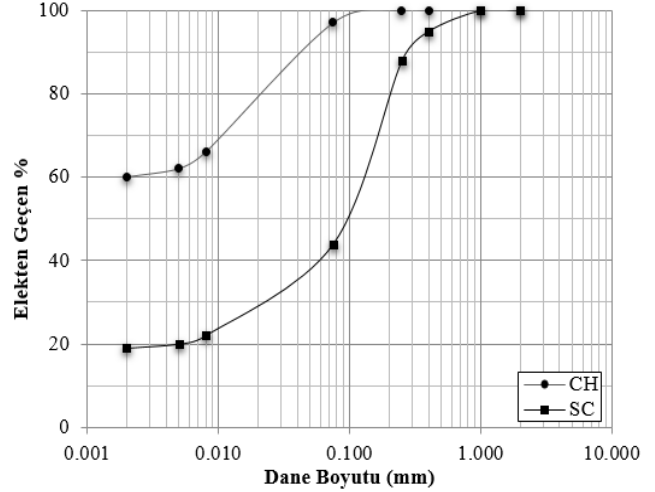
Literatüre bakıldığında, Bacillus Sp. ile iyileştirilmiş zeminlerin mukavemet ve konsolidasyon özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar mevcuttur. Ancak, Bacillus Sp. ile iyileştirilmiş zeminlerin donma çözülme döngüleri altında literatürde yapılan herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle, çalışma kapsamında, Bacillus Sp. ile iyileştirilmiş CH ve SC türü iki farklı zemin türünde, donma çözülme döngüleri altında mukavemet ve şişme basıncı davranışları araştırılmıştır.

2 Materyal ve metot

Çalışmada, kullanılan iki farklı tip zemin araziden getirildikten sonra ilk olarak kurutulmuş sonrasında ise elek analizi deneyleri yapılmıştır. Yapılan elek analizleri sonuçlarına göre, elde edilen gradasyon eğrileri Şekil 1'de verilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, zeminlerin sınıfları, TS 1500 [25]'e göre yüksek plastisiteli kil (CH) ve kumlu kil (SC) olarak belirlenmiştir. CH zeminin likit limit değeri yaklaşık olarak %55, plastik limit değeri yaklaşık olarak %25 ve dane birim hacim ağırlık değeri 26.8 kN/m³, SC zeminin ise likit limit değeri yaklaşık olarak %28, plastik limit değeri yaklaşık olarak %16 ve dane birim hacim ağırlık değeri 26.4 kN/m³ olarak saptanmıştır.

Bakteri izolasyonu için Thuja orientalis (doğu mazısı) ve Pinus pinea (fıstık çamı) ağaçlarından zemin numuneleri toplanmıştır. Her numuneden 2 gr tartılarak 10 ml steril serum fizyolojik içinde vorteksenerek homojenize edildikten sonra zemin süspansiyonu 850C'de 15 dakika inkübe edilerek istenmeyen spor oluşturan bakteriler yok edilmiştir. İnkübasyonun sonunda, her bir numuneden 100 µl, yayma yöntemi ile üre agar plağına ekilerek 3700 °C'de 24 saat inkübe edildi. İzole edilmiş mikroorganizmaların tanımlanması için 16S ribozomal DNA dizisi, bilinen dizilerle karşılaştırma için bir çevrim içi veri tabanına (NCBI DNA dizisi veri tabanı) sunulmuştur. Bu çalışmada kullanılan bakteriler Bacillus Sp. olarak tanımlanmıştır (Erişim numarası: NR_1149191.1). Deneysel çalışma için üre ortamı olarak "Nutrient broth powder 3g.L-1, Urea 20 g.L-1, NH₄Cl 10g.L-1, NaHCO₃ 2.12g.L-1" kullanılmıştır [24]. Üre ortamının tüm bileşeni çözünene kadar 900 mL damıtılmış su içinde karıştırılmıştır ve elde edilen üre ortam

çözeltisinin pH'ı 6.0'a olarak ayarlanmıştır. Daha sonra son hacme (1 L) ulaşmak için damıtılmış su eklenerek 120°C'de 15 dakika otoklavlandı. Otoklav işleminin sonunda, üre ortamına 20 ml hacimde kalsiyum klorür çözeltisi (CaCl₂. 2H₂O 18.5 g / 100 mL) ilave edildi.



Şekil 1. CH ve SC zeminlerinin gradasyon eğrileri

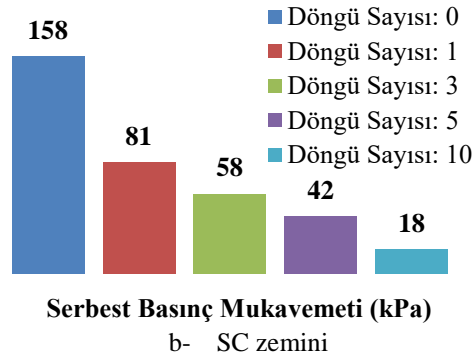
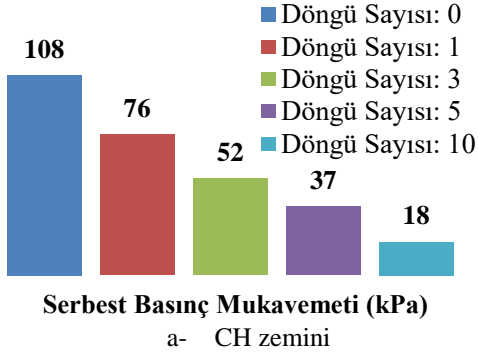
CH, SC, Bacillus Sp. enjekte edilmiş CH ve SC zeminleri için numuneler oluşturulduktan sonra su muhtevalarında değişiklik olmaması için desikatörlerde bekletilmiştir. Hazırlanan numuneler literatürdeki çalışmalardaki sıcaklık, zaman dilimi ve çevrim sayılarına uygun olarak [26-30] donma çözülme döngülerine maruz bırakılmıştır. Donma çözülme çevrim sayısı 1, 3, 5 ve 10, sıcaklık değerleri donma için -20 °C ve çözülme için +25 °C, her bir sıcaklıkta bekleme süresi ise 6 saat olarak alınmıştır. Numuneler, donma-çözülme kabinine folyo ile sarılmış ve deney süresince donma-çözülme kabininden çıkarılmamıştır. Numuneler, donma-çözülme kabinine konulduktan sonra, ilk olarak -20 °C'ye getirilerek 6 saat beklenmiş ve sonrasında +25 °C'ye getirilerek 6 saat daha beklenmiştir. 12 saatin sonunda tamamlanan bu işlem ise 1 çevrim olarak kabul edilmiştir [26, 29, 30]. Numunelerin çevrimleri tamamlandıktan sonra, TS 1500 [25] ve TS 1900 [31]'e göre serbest basınç mukavemeti ve şişme basıncı deneyleri yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

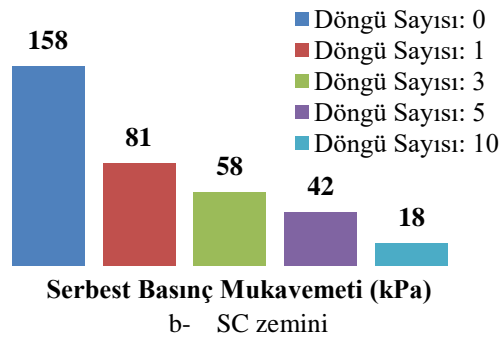
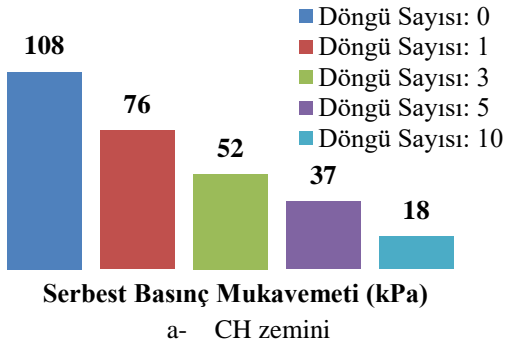
3.1 İyileştirilmemiş zeminlerin mukavemet ve şişme basıncı parametreleri

Şekil 2'de, CH ve SC zeminlerinin farklı donma çözülme döngüleri sonrasında serbest basınç mukavemetleri görülmektedir. Şekil 3'te ise, her iki zeminin donma çözülmeye bağı olarak mukavemetlerindeki azalma oranları bulunmaktadır. Sonuçlara göre, artan döngü sayılarına bağı olarak CH zemininde mukavemet değerlerinde % 83.3 oranında azalmalar meydana gelirken SC zemininde ise % 88.6 oranında azalmalar meydana gelmiştir. Aynı döngü sayısında SC zeminin de mukavemet değerlerinde daha fazla azalmanın olmasının sebebi, bu zemin içinde CH zeminine göre daha büyük taneciklerin bulunmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Donma çözülmeye bağı olarak, bu

taneciklerin birbirinden daha çabuk ayrılarak dağılması sonucunda da mukavemetin daha fazla düştüğü düşünülmektedir.



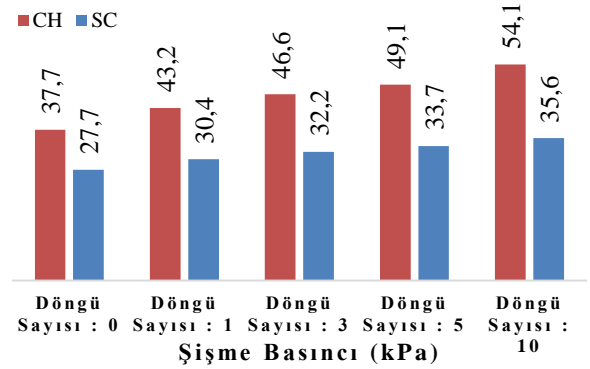
Şekil 2. Serbest basınç mukavemetleri



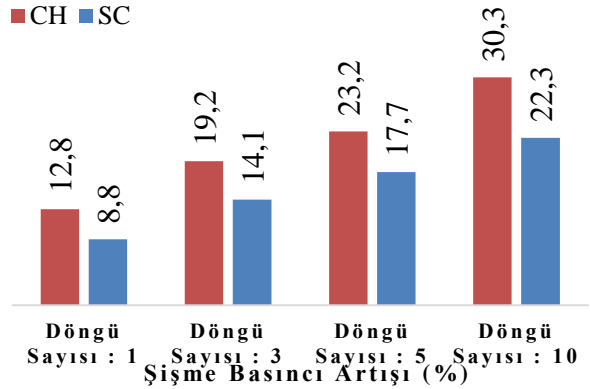
Şekil 3. Serbest basınç mukavemetlerindeki azalmalar

Şekil 4'te, her iki zemine ait farklı döngülerdeki şişme basınçları ve Şekil 5'te ise her iki zemin içinde şişme

basınçlarındaki artışlar görülmektedir. Sonuçlara göre, CH zeminin şişme basınçları artan döngü sayılarına bağlı olarak şişme basınçları 37.7 kPa'dan 54.1 kPa' a kadar yükseldiği belirlenmiştir. CH zeminin şişme basıncı değerlerinde, % 30.3'e varan artışlar meydana gelmiştir. Ayrıca, SC zeminin şişme basınçları artan döngü sayılarına bağlı olarak şişme basınçları 27.7 kPa'dan 35.6 kPa' a kadar yükselerek % 22.3'e varan artışlar meydana gelmiştir. CH zemininin, SC zeminine göre artan döngü sayılarında şişme basınçlarındaki artışların daha da fazla olmasının sebebinin CH zemini içindeki ince dane oranının daha fazla olması olarak düşünülmektedir. CH içindeki, ince dane oranının fazla olmasına bağlı olarak ta zemin içindeki suyun drenesinin SC zeminine göre daha da zorlaştığı görülmüştür. Bu durum da, CH zeminin şişme basınçlarının daha da yüksek çıkacağını göstermektedir.



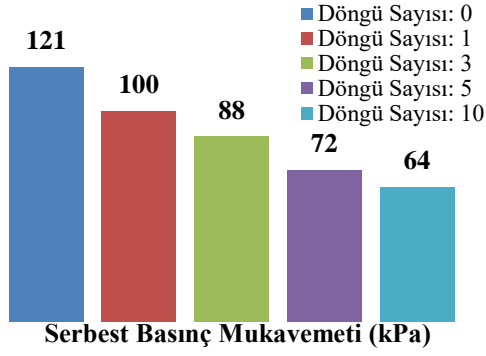
Şekil 4. Şişme basınçları



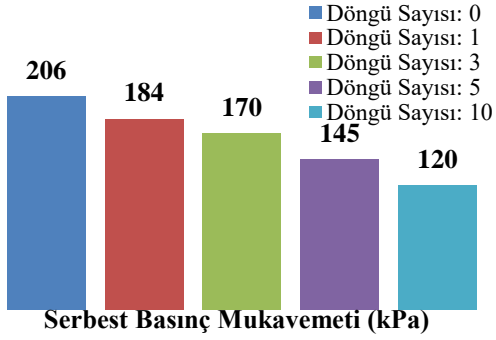
Şekil 5. Şişme basınçlarındaki artışlar

3.2 Bacillus sp. ile iyileştirilmiş zeminlerin mukavemet ve şişme basıncı parametreleri

Şekil 6'da ve Şekil 7'de, CH ve SC zeminlerinin farklı donma çözülme döngüleri sonrasında serbest basınç mukavemetleri ve mukavemet değerlerindeki azalma oranları görülmektedir. Bacillus Sp. enjekte edilerek güçlendirilen CH ve SC zeminlerinde, artan döngü sayılarına bağlı olarak sırasıyla 121kPa'dan 64 kPa'a ve 206 kPa'dan 120 kPa'a kadar mukavemet değerleri elde edilmiş ve yaklaşık olarak % 47.1 ve % 41.7 oranlarında azalmalar meydana gelmiştir. SC zemininde, artan döngü sayılarına bağlı olarak mukavemet değerlerindeki azalma oranının daha düşük çıkmıştır.

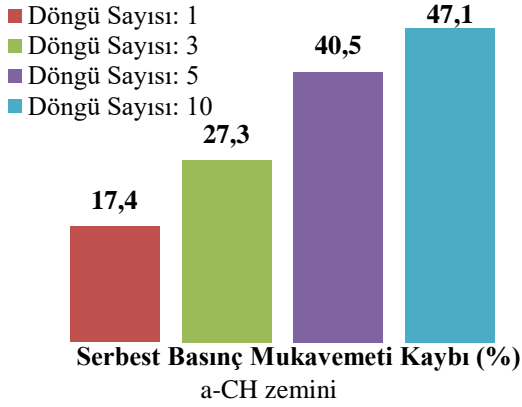


a- CH zemini

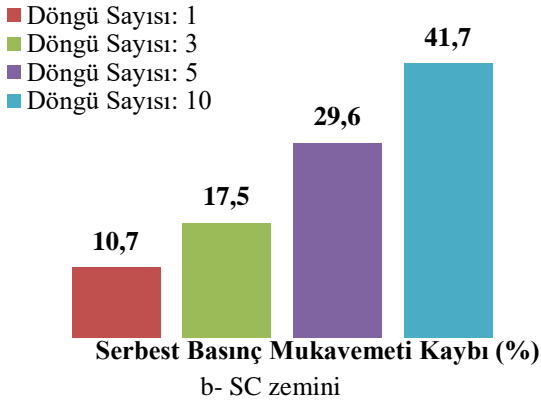


b- SC zemini

Şekil 6. Serbest basınç mukavemetleri



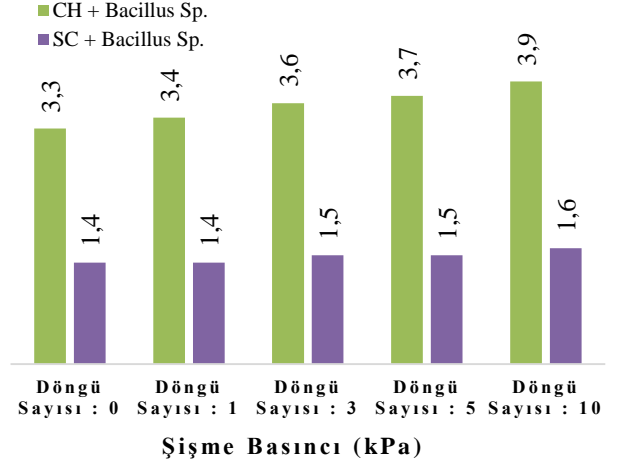
a-CH zemini



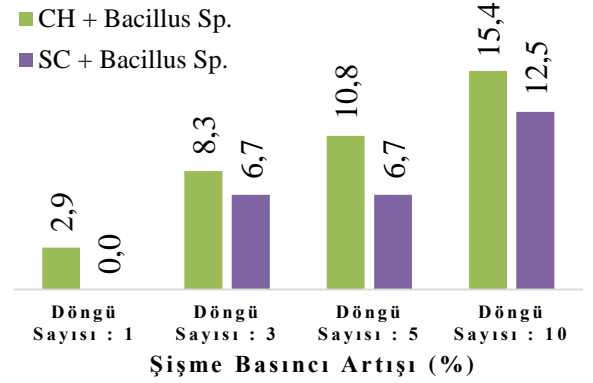
b- SC zemini

Şekil 7. Serbest basınç mukavemetlerindeki azalmalar

Şekil 8 ve Şekil 9'da, CH ve SC zeminlerinin farklı donma çözülme döngüleri sonrasında şişme basınçları ve şişme basınçlarındaki artma oranları görülmektedir. Artan döngü sayılarına bağlı olarak CH ve SC zeminleri için sırasıyla 3.3kPa'dan 3.9 kPa'a ve 1.4 kPa'dan 1.6 kPa'a kadar şişme basınçları belirlenmiştir. Döngü sayısı arttıkça CH zemininde % 3.9 ve SC için ise % 1.6 oranlarında şişme basınçlarında artışlar meydana gelmiştir.



Şekil 8. Şişme basınçları



Şekil 9. Şişme basınçlarındaki artışlar

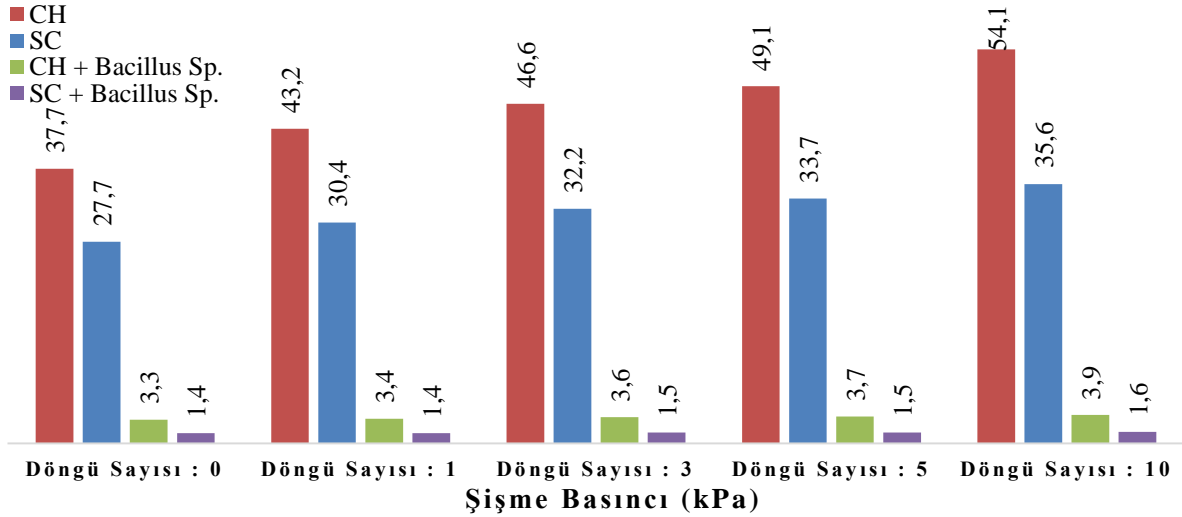
3.3 Bacillus sp. ile iyileştirilmiş ve iyileştirilmemiş zeminlerin mukavemet ve şişme basıncı parametrelerinin karşılaştırılması

Şekil 10 ve Şekil 11'de, CH ve SC zeminlerinin farklı donma çözülme döngüleri sonrasında serbest basınç mukavemetleri ve mukavemet değerlerindeki azalma oranları görülmektedir. Sonuçlara bakıldığında, zeminler herhangi bir donma çözülme döngüsüne maruz bırakılmadan Bacillus Sp, enjekte edilmesi sonucunda, CH zeminin mukavemeti 108 kPa'dan 121 kPa'a yükselerek % 10.7 oranında artış gözlenmiştir. SC zeminin mukavemeti ise, aynı şartlar altında, 158 kPa'dan 206 kPa'a yükselerek % 23.3 oranında artış meydana gelmiştir. Bacillus Sp. enjekte edilmiş her iki zemine bakıldığında SC zemininde CH zeminine göre % 12.6 oranında fazladan iyileşme olduğu görülmüştür. Bunun sebebi olarak ise, Bacillus Sp.'nin SC zemininde daha fazla CaCO₃ üretmesi olarak

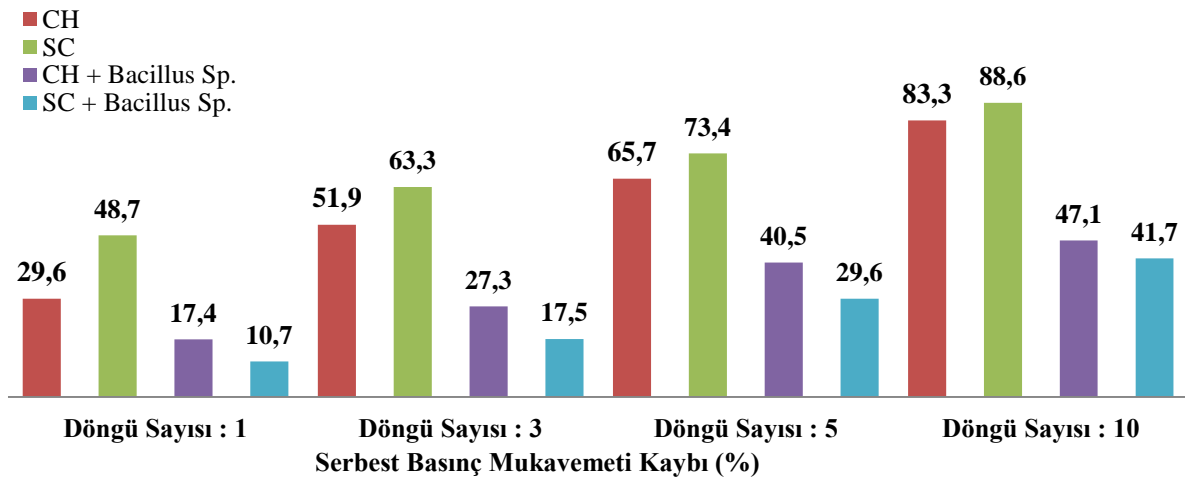
düşünülmektedir. SC zemininde dane boyutları CH zemininin dane boyutlarına göre bir miktar daha büyük olması nedeniyle, Bacillus Sp.'nin SC'nin boşluklarında daha aktif olarak CaCO₃ üretim yapmasıdır. Üretilen CaCO₃ ise her iki zeminin de bağlayıcılığını artırarak sadece CH ve SC zeminlerinin mukavemetlerine göre daha yüksek mukavemet göstermiştir. 1'den 10'a kadar artan donma çözülme döngülerinde, donma çözülme öncesi değerlere göre, CH, SC, Bacillus Sp. enjekte edilmiş CH ve SC zeminlerinin mukavemet değerlerinde sırasıyla, % 83.3, % 88.6, % 47.1 ve % 41.7 oranlarında azalmalar gözlenmiştir. Her iki zemin içinde Bacillus Sp. tarafından üretilen CaCO₃ miktarına bağlı olarak her iki zeminin de bağlayıcılığının arttığı, buna bağlı olarak ta donma çözülme durumlarında daha kararlı bir zemin ortamı oluştuğu gözlenmiştir. Bu nedende de, Bacillus Sp.'nin zeminlerin donma çözülme durumlarında da olumlu yönde katkısının olduğu ancak bu katkının zeminin cinsine göre farklılık gösterebileceği belirlenmiştir.

Şekil 12 ve Şekil 13'te, her iki zeminin farklı donma çözülme döngüleri sonrasında şişme basınçları ve bu

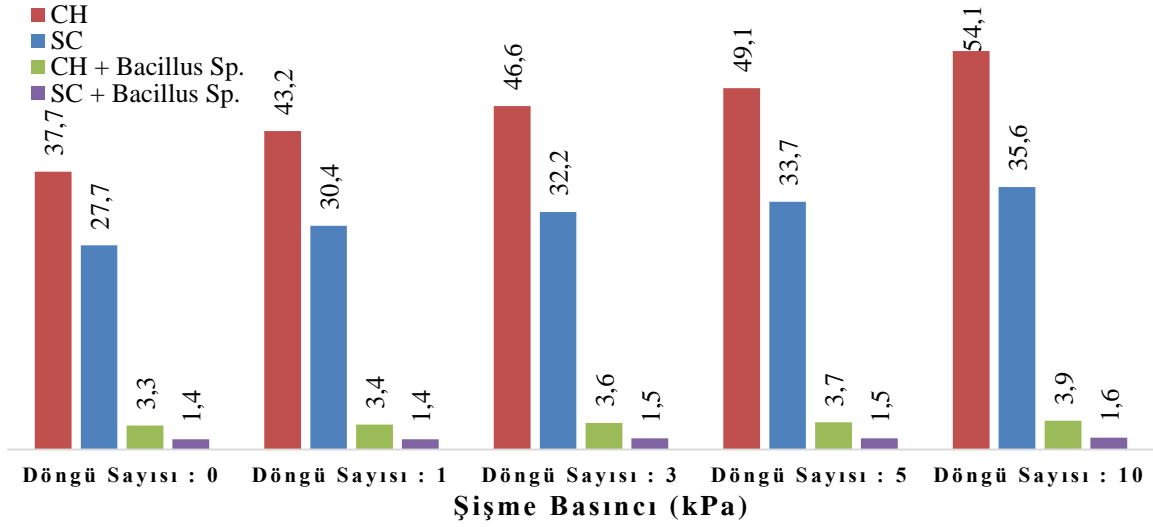
basınçlardaki artma oranları görülmektedir. Sonuçlara bakıldığında, her iki zeminin de aynı döngüleri için, Bacillus Sp. enjekte edilmesi ile şişme basınçlarının kayda değer oranlarda düştüğü gözlenmiştir. Ancak, SC zeminin de aynı döngü için CH zeminine göre şişme basıncının daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bunun sebebinin ise, Bacillus Sp.'nin SC zemininde daha fazla CaCO₃ üretme ortamı bulması olarak düşünülmüştür. CaCO₃ miktarının fazla olması ile zeminin bağlayıcılık özelliğinin daha da arttığı buna bağlı olarak daha kararlı bir hale gelerek şişme basıncının kayda değer düştüğü gözlenmiştir. Artan donma çözülme döngülerinde ise, CH, SC, Bacillus Sp. enjekte edilmiş CH ve SC zeminlerinin şişme basınçlarında sırasıyla, % 30.3, % 22.3, % 15.4 ve % 12.5 oranlarında artışlar gözlenmiştir. Bacillus Sp. enjekte edilmiş her iki zeminde de, enjekte edilmemiş durumlara göre şişme basınçlarındaki artışlarda iyileşmeler gözlenmiştir. Bacillus Sp. enjektisinin zeminlerin donma çözülme durumlarında da olumlu etkisinin olduğu belirlenmiştir. Ancak, iyileşme derecesinin zemin cinsine göre farklılık gösterebileceği belirtilmiştir.



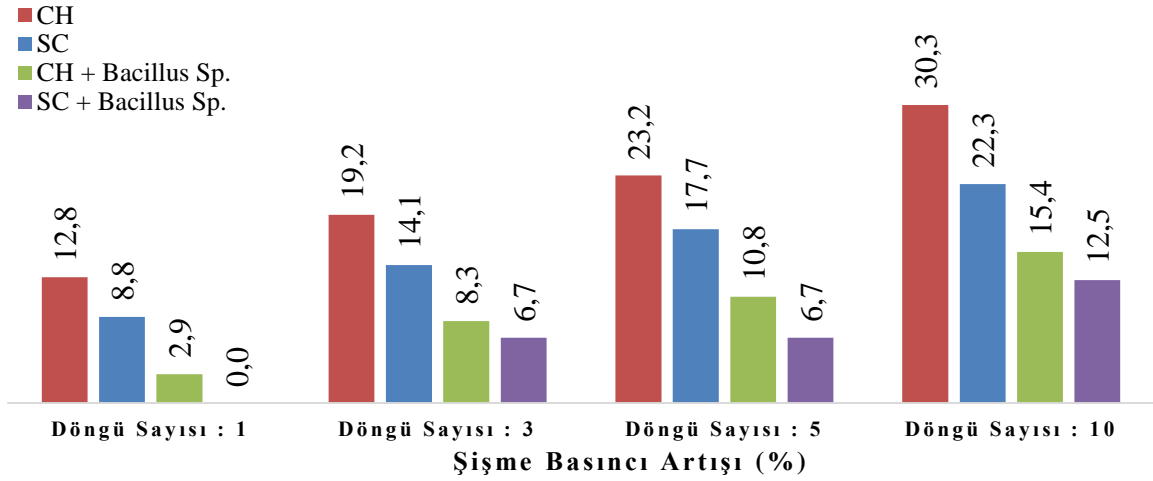
Şekil 10. Serbest basınç mukavemetlerinin karşılaştırılması



Şekil 11. Serbest basınç mukavemeti kaybı



Şekil 12. Şişme basınçlarının karşılaştırılması



Şekil 13. Şişme basınçlarındaki artışlar

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, CH ve SC türü zeminlerinin Bacillus Sp. enjektisi ile iyileştirilebilirliğinin araştırılmasına yönelik bir seri mukavemet ve şişme basıncı deneyleri yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

1- CH ve SC zemin numuneleri herhangi bir donma çözülme döngülerine maruz bırakılmadan serbest basınç mukavemetleri sırasıyla 108 ve 158 kPa belirlenmiştir. SC türü zeminin dayanımının gradasyondaki dane boyutlarının büyük olmasından dolayı, CH zeminine göre daha yüksek çıkmıştır.

2- Artan donma çözülme döngü sayısına bağlı olarak, CH ve SC zeminlerinin mukavemet değerlerinde sırasıyla % 83,3 ve % 88,6 oranlarında azalmalar gözlenmiştir. Bu azalmaların nedeni ise, numunelerin içindeki suyun donma anında hacminde artış ve çözülme anında ise hacminde azalma meydana gelmesine bağlı olarak numunelerin danelerindeki tutunma özelliğinin azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, SC zemininin mukavemetinden daha fazla azalma olmasının sebebi ise,

gradasyondaki dane boyutları büyük olduğundan daneler arasında daha fazla su tutmasına bağlı olarak donma çözülme döngüsünde, danelerin tutunma özelliklerinin daha fazla azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

3- CH ve SC zeminlerinin şişme basınçları artan döngü sayılarına bağlı olarak şişme basınçları sırasıyla 37,7 kPa'dan 54,1 kPa' a ve 27,7 kPa'dan 35,6 kPa' a kadar yükseldiği belirlenmiştir. Bu durumda, CH ve SC zeminlerinin şişme basıncı değerlerinde, sırasıyla % 30,3 ve % 22,3'e varan artışlar meydana gelmiştir. CH zemini içinde, ince dane oranının fazla olmasına bağlı olarak zemin içindeki suyun drenesinin SC zeminine göre daha da zorlaşmasından dolayı şişme basıncı değerlerinin daha da yüksek çıktığı öngörülmüştür.

4- CH ve SC zeminlerine, Bacillus Sp, enjekte edilmesi sonucunda, CH zeminin mukavemeti sırasıyla 108 kPa'dan 121 kPa'a ve 158 kPa'dan 206 kPa'a yükselerek % 10,7 ve % 23,3 oranında artış meydana gelmiştir. Bacillus Sp. enjekte edilmiş zeminlerde CaCO₃ üretimi olması nedeniyle danelerin bağlayıcılık özelliği artarak her iki zeminin de mukavemeti artmıştır. SC zemininde CH zeminine göre mukavemet değerinde % 12,6 oranında

fazladan artış olmasının sebebi, SC zemininde dane boyutları CH zemininin dane boyutlarına göre büyük olması nedeniyle, Bacillus Sp.'nin SC'nin boşluklarında daha aktif olarak CaCO₃ üretim yapması olarak öngörülmüştür.

5- Donma çözülmeye maruz bırakılan CH, SC, Bacillus Sp. enjekte edilmiş CH ve SC zeminlerinin mukavemet değerlerinde, donma çözülmesiz durumlara göre sırasıyla % 83.3, % 88.6, % 47.1 ve % 41.7 oranlarında azalmalar gözlenmiştir. Ayrıca, Bacillus Sp. enjekte edilmiş CH ve SC zeminlerinin, enjekte edilmemiş durumlara göre şişme basınçlarındaki artışların daha düşük oranlarda olduğu belirlenmiştir. Bacillus Sp. enjekte edilmiş zeminlerde CaCO₃ üretimi ile zemin danelerinin bağlayıcılığı arttığı için Bacillus Sp.'nin zeminlerin donma çözülme durumlarında da mukavemet ve şişme basınçları değerlerinde olumlu yönde katkısının olduğu anlaşılmıştır. Ancak bu olumlu yöndeki katkının zeminin cinsine göre farklılık gösterebileceği belirlenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] H. Tremblay, D. Josée, L. Jacques, and L. Serge, Influence of the nature of organic compounds on fine soil stabilization with cement. *Canadian Geotechnical Journal* 39(3), 535-46, 2020. <https://doi.org/10.1139/t02-002>
- [2] F. G. Bell, Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering geology* 42(4), 223-37, 1996. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(96\)00028-2](https://doi.org/10.1016/0013-7952(96)00028-2)
- [3] A. Arulrajah, Y. Mohammadjavah, M.D. Mahdi, H. Suksun, W.B. Myint and L. Melvyn, Evaluation of fly ash-and slag-based geopolymers for the improvement of a soft marine clay by deep soil mixing. *Soils and Foundations* 58(6):1358-70, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.07.005>
- [4] A. Kumar and P.V. Sivapullaiah, Improvement of strength of expansive soil with waste granulated blast furnace slag. In *GeoCongress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering*, 3920-8, 2012. <https://doi.org/10.1061/9780784412121.402>
- [5] M. Kianimehr, T.S. Piltan, M.B.Seyed, M. Alireza and A. Arul, Utilization of recycled concrete aggregates for light-stabilization of clay soils. *Construction and Building Materials* 227, 116792, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116792>
- [6] M.P. Bilondi, M.T. Mohammad and T. Vahid, Experimental investigation of using a recycled glass powder-based geopolymer to improve the mechanical behavior of clay soils. *Construction and Building Materials* 170, 302-13, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.049>
- [7] A. Ateş, Mechanical properties of sandy soils reinforced with cement and randomly distributed glass fibers (GRC). *Composites Part B: Engineering* 96, 295-304, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.04.049>
- [8] S. N. Esmailpour, T. G. Abbasali, K. T. Mohammadreza and J. C. Asskar, Improvement of the engineering behavior of sand-clay mixtures using kenaf fiber reinforcement. *Transportation Geotechnics* 19, 1-8, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2019.01.004>
- [9] O. Sivrikaya, F. Uysal, A. Yorulmaz and K. Aydın. The efficiency of waste marble powder in the stabilization of fine-grained soils in terms of volume changes. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45, 8561-8576, 2020. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04768-0>
- [10] A. Yorulmaz, O. Sivrikaya and F. Uysal, Evaluation of the bearing capacity of poor subgrade soils stabilized with waste marble powder according to curing time and freeze-thaw cycles. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 360, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06749-5>
- [11] K. Aydın, O. Sivrikaya and F. Uysal, Effects of curing time and freeze-thaw cycle on strength of soils with high plasticity stabilized by waste marble powder. *J Mater Cycles Waste Manag* 22, 1459-1474, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01035-0>
- [12] J. T. Dejong, M. B. Fritzges and K. Nusslein. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 132, 1381-1392 ASCE 1090-0241, 2006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:11\(1381\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:11(1381))
- [13] S. Douglas, T.J. Beveridge, Mineral formation by bacteria in natural Communities, *FEMS Microb. Ecol.* 26, 79-88, 1998. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.1998.tb00494.x>
- [14] F. S. Stocks, J. K. Galinat and S. S. Bang, Microbiological precipitation of CaCO₃, *Soil Biol. Biochem.* 31(11), 1563-1571, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00082-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00082-6)
- [15] J. T. Dejong, B. M. Mortensen, B. C. Martinez and D. C. Nelson, Biomediated soil improvement, *Ecol. Eng.*, 36(2), 197-210, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.029>
- [16] S. S. Bang, J. K. Galinat and V. Ramakrishnan, Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized *Sporosarcina pasteurii*. *Enzym. Microb. Technol.* 28, 404-409, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0141-0229\(00\)00348-3](https://doi.org/10.1016/S0141-0229(00)00348-3)
- [17] V. S. Whiffin, L. A. van Paassen, and M. P. Harkes, Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique. *Geomicrobiol. J.* 25(5), 417-423, 2007. <https://doi.org/10.1080/01490450701436505>
- [18] H. Yasuhara, D. Neupane D., Hayashi K. and M. Okamura, Experiments and predictions of physical properties of sand cemented by enzymatically-induced carbonate precipitation, *Soils and Foundations*, 52(3), 539-549, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2012.05.011>
- [19] N. W. Soon, L. M. Lee, T. C. Khun and H. S. Ling, Improvements in engineering properties of soils through microbial-induced calcite precipitation, *KSCE*

- Journal of Civil Engineering, 17(4), 718-728, 2013. <https://doi.org/10.1007/s12205-013-0149-8>
- [20] M. Nemati and G. Voordouw, Modification of porous media permeability, using calcium carbonate produced enzymatically in situ, Enzyme and Microbial Technology, 33(5), 635-642, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0141-0229\(03\)00191-1](https://doi.org/10.1016/S0141-0229(03)00191-1)
- [21] F. G. Ferris, L. G. Stehmeier, A. Kantzas and F. M. Mourits, Bacteriogenic mineral plugging, Journal of Canadian Petroleum Technology, 36 (9), 1997. <https://doi.org/10.2118/97-09-07>
- [22] V. Ivanov and J. Chu, Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ, Reviews in Environmental Science and Biotechnology, 7(2), 139-153, 2008. <https://doi.org/10.1007/s11157-007-9126-3>
- [23] J. Chu, V. Stabnikov and V. Ivanov, Microbially induced calcium carbonate precipitation on surface or in the bulk of soil, Geomicrobiology Journal 29(6), 544-549, 2012. <https://doi.org/10.1080/01490451.2011.592929>
- [24] H. Canakci, W. Sidik, and I. H. Kilic, Effect of bacterial calcium carbonate precipitation on compressibility and shear strength of organic soil, Soils and Foundations, Part A 55(5), 1211-1221, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.09.020>
- [25] TS 1500, İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara, 2000.
- [26] M. Ghazavi and M. Roustaie, The influence of freeze-thaw cycles on the unconfined compressive strength of fiber-reinforced clay, Cold Regions Science and Technology, 61, 125-131, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.12.005>
- [27] J. Liu, T. Wang and Y. Tian, Experimental study of the dynamic properties of cement- and lime- modified clay soils subjected to freeze-thaw cycles. Cold Regions Science and Technology, 61, 29-33, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.01.002>
- [28] K. Hazirbaba, Y. Zhang, and J.L. Hulsey, Evaluation of temperature and freeze-thaw effects on excess pore pressure generation of fine-grained soils. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 31, 372-384, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.09.006>
- [29] A. Ş. Zaimoğlu, F. Hattatoğlu and R. K. Akbulut, Yüke maruz ince taneli zeminlerin donma-çözülme davranışı. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19(3), 117-121, 2013. <https://doi.org/10.5505/pajes.2013.35744>
- [30] B. Mahmutluoğlu and B. Bağrıaçık, Killi zeminlerin donma-çözülme davranışlarında cam atık çamurunun etkisi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 35(3) , 783-796, 2020. <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.846739>
- [31] TS 1900-2, İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneylemleri-Bölüm 2: Mekanik Özelliklerin Tayini. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara, 2006.





Ağır metal iyonlarının tarımsal atıklar ile biyosorpsiyonunun araştırılması

Investigation of biosorption of heavy metal ions by the agricultural wastes

Elif Hatice Gürkan^{1,*} 

¹Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 55100, Samsun, Türkiye

Özet

Su, yaşamın sürdürülebilirliği için gerekli bir kaynaktır. Endüstriyel, tarımsal ve insan aktiviteleri, su kaynaklarının kirliliğine katkı sağlamaktadır. Ağır metaller, su kaynaklarındaki en önemli kirleticilerden biridir. Düşük konsantrasyonlarda bile ciddi hastalıklara sebep olur. Su kaynaklarından ağır metallerin giderilmesi için kimyasal, fiziksel ve biyolojik arıtma yöntemleri kullanılır. Düşük maliyetli tarımsal ürünler, ağır metal gideriminde çevre-dostu ve ekonomik çözüm sağlar. Bu çalışmanın amaçları, (1) biyokütle karakterizasyonu, (2) Cu(II) ve Zn(II) iyonlarının biyokütle üzerine adsorpsiyonun değerlendirilmesi, (3) biyokütle biyosorpsiyon analizidir.

Anahtar kelimeler: Biyokütle, Biyosorpsiyon, Tarımsal atık, Bakır, Çinko

1 Giriş

Bilimsel ve teknolojik gelişmeler, yaşam koşullarını iyileştirmeye katkı sağlarken uzun vadede yaşamı ve ekolojiyi tehdit eden sorunları beraberinde getirmektedir [1]. Sanayileşme, insan ve çevre üzerine etkileri açısından değerlendirildiğinde, bilimsel ve teknolojik gelişmelerin en önemlisidir. Artan sanayileşme faaliyetleri ile makineleşme ve üretim artarken, yaşam standartları ve kentleşmede de artış görülmektedir. Bunun sonucunda şehir merkezlerinde, sanayi tesislerinde ve tarımsal faaliyetler sonucunda önemli miktarlarda sağlığa zararlı biyolojik ve kimyasal maddeleri içeren atık sular oluşmaktadır [2-3].

Atık sular; yer altı suları, akarsu, göl ve denizlerde oluşan çevre kirliliğinin en önemli kaynağıdır. Atık sularda çevre kirliliğine neden olan; radyoaktif atıklar, ağır metal bileşikler, siyanür, organik ve çözücüler, aromatik ve alifatik hidrokarbonlar bulunmaktadır.

Sağlık Ölçüm ve Değerlendirme Enstitüsü (Institute for Health Metrics and Evaluation, IHME) verileri; ağır metallerin toksisiteleri ve biyolojik sistemlerde birikme eğilimlerinin, onların sağlık için yüksek risk faktörü olduğunu göstermiştir. Ağır metal kirliliği, havada (yanma, ayırma ve işleme), yüzey sularında (depolama ve taşınma sırasında sızıntı) ve toprakta (yer altı suları ve tarım) olmaktadır. Çevreye dağılan ağır metallerin insan vücudundaki etkisi, konsantrasyon, temas süresi, temas

Abstract

Water is an essential source for the sustainable of life. Industrial, agricultural and human activities contribute to pollution of water sources. Heavy metals are one of the most important contaminants in the water sources. They are toxic elements even at low concentration which can cause severe diseases. Chemical, physical and biological treatment methods are used to remove the heavy metals from the water sources with a different degree of success. Low-cost by-products from agricultural have been recognized as an eco friendly and economically solution for the removal of heavy metals. The objectives of this study were (1) characterization of the biomass, (2) assessment of the biosorption experiments of the biomass to compare Cu(II) and Zn(II), and (3) analysis of the biosorption ability of the biomass.

Keywords: Agricultural waste, Biomass, Biosorption, Copper, Zinc

sıklığı, çevresel ve bireysel etmenlere göre değişiklik gösterir.

Ağır metaller limit değerleri aştığında, insan fizyolojisi ve diğer biyolojik sistemler üzerinde zararlı bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Ağır metaller organizmaya solunum, sindirim ve deri teması ile alınır ve vücuttan kolaylıkla atılamazlar. Dışarıdan alınan bu maddeler, canlı organizmalarda biyolojik olarak parçalanmadığı için kolaylıkla besin zincirine girebilmekte ve canlı organizmalarda birikmektedir [4-5]. Birlikte organa, etkilediği sisteme bağlı olarak psikolojik rahatsızlıklardan fizyolojik sorunlara kadar geniş bir yelpazede hastalık oluşturabilir.

Metalik kirlenmelerin çoğu sularda toplanır. Çünkü; çevre kirliliğinden en çok, en çabuk ve en kolay etkilenen sudur. Endüstriyel faaliyetlerden kaynaklanan atıksulardaki metal içeriği, çevreye verilmeden önce arıtılarak su kirliliği kontrolü yönetmeliğine göre izin verilen değerlerin altına düşürülmesi gerekmektedir [6].

Ağır metal içeren endüstriyel atıksular iyon değiştirme, koagülasyon, filtrasyon, ters osmoz, nötralizasyon ve kimyasal çöktürme, biyosorpsiyon, buharlaştırma, membran filtrasyon ve elektrokimyasal yöntemleriyle arıtılmaktadır. Biyosorpsiyon, kirleticilerin biyolojik olarak aktif olmayan, ucuz, doğal ve ölü biyokütleler ile giderimi prosesidir [7].

Bu çalışmada, fıstık kabuğu ve pirinç kabuğu ile atıksulardan Cu(II) ve Zn(II) gideriminde pH, temas süresi

* Sorumlu yazar/ Corresponding author, e-posta / e-mail: elif.gurkan@omu.edu.tr (E. H. Gürkan)

Geliş / Received: 17.08.2021 Kabul / Accepted: 22.03.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.780933

ve başlangıç metal konsantrasyonu gibi değişkenlerin etkisi incelenmiştir. Deneysel verilerin, çeşitli kinetik ve izoterm modelleri kullanılarak kinetik ve denge analizleri gerçekleştirilmiştir.

1.1 Ağır Metaller

Ağır metal yoğunluğu 5 g/cm³'den daha büyük olan metaller olarak tanımlanmaktadır [8, 9]. Bu gruba bakır (Cu), cıva (Hg), çinko (Zn), demir (Fe), gümüş (Ag), kadmiyum (Cd), krom (Sn), kobalt (Co), kurşun (Pb), mangan (Mn), ve nikel (Ni) olmak üzere 60' dan fazla metal dahil edilebilir. Bakır, çinko, nikel, demir, bor, molibden gibi metaller düşük konsantrasyonlarda ve limit değerlerini aşmadığı sürece canlıların büyümesine katkı sağlamaktadır.

Ağır metallerin ekolojik sistemde salınımının, doğal çevrimlerden çok insanın neden olduğu etkiler nedeniyle olduğu görülmektedir. Doğal çevrimler ve kullanıma bağlı kirlenmenin yanı sıra kazaların da ağır metallerin çevreye salınımında önemli bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Araştırmalara göre, doğal çevrimler sonucu; 7600 ton/yıl kadmiyum, 18800 ton/yıl arsenik, 3600 ton/yıl cıva, 332000 ton/yıl kurşun atmosfere salınmakta iken insan faaliyetleri sonucu; selenyumun (19 kat), kadmiyumun (8 kat), cıva, kurşun, kalayın (6 kat), arsenik, nikel ve kromun (3 kat) daha fazla miktarda deşarj edildiği görülmüştür [9]. Ağır metallerin çevreye salınımında etken olan en önemli endüstriyel faaliyetler; madencilik, ilaç, elektrokaplama, kauçuk ve plastik, organik kimyasallar, pestisitler ve demir çelik gelmektedir [9-13]. Farklı endüstriyel faaliyetlerden açığa çıkan metaller Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Temel endüstrilerden açığa çıkan metaller [14].

Endüstri Kolu	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Ni	Sn	Zn
Kağıt	-	+	+	+	+	+	-	-
Petrokimya	+	+	-	+	+	-	+	+
Klor-alkali üretimi	+	+	-	+	+	-	+	+
Gübre	+	+	+	+	+	+	-	+
Demir-çelik	+	+	+	+	+	+	+	+
Enerji üretimi (Termik)	+	+	+	+	+	+	+	+

1.2.1. Ağır metallerin etkileri

Ağır metaller, biyolojik reaksiyonlara katılma derecelerine göre yaşamsal ve yaşamsal olmayan olarak sınıflandırılırlar. Organizma yapısında belirli bir konsantrasyonda bulunması gerekli olan vitamin ve hormonların bileşenlerinde bulunan ve biyolojik reaksiyonlara katıldıkları için düzenli olarak besin yoluyla alınmaları zorunlu olanlar yaşamsal olarak sınıflandırılır. Ancak, limit konsantrasyonların (1-10 ppm) üzerinde toksik etki gösterirler (Cu, Fe, Ni Se ve Zn). Yaşamsal olmayan ağır metaller (Cd, Hg ve Pb) ise, çok düşük konsantrasyonlarında bile toksik etki göstermektedir. Bir ağır metalin yaşamsal olup olmadığı organizmaya bağlı olarak değişmektedir (nikel, bitkiler için toksik etki gösterirken, hayvanlarda iz elementi olarak bulunması gerekir) [4, 11].

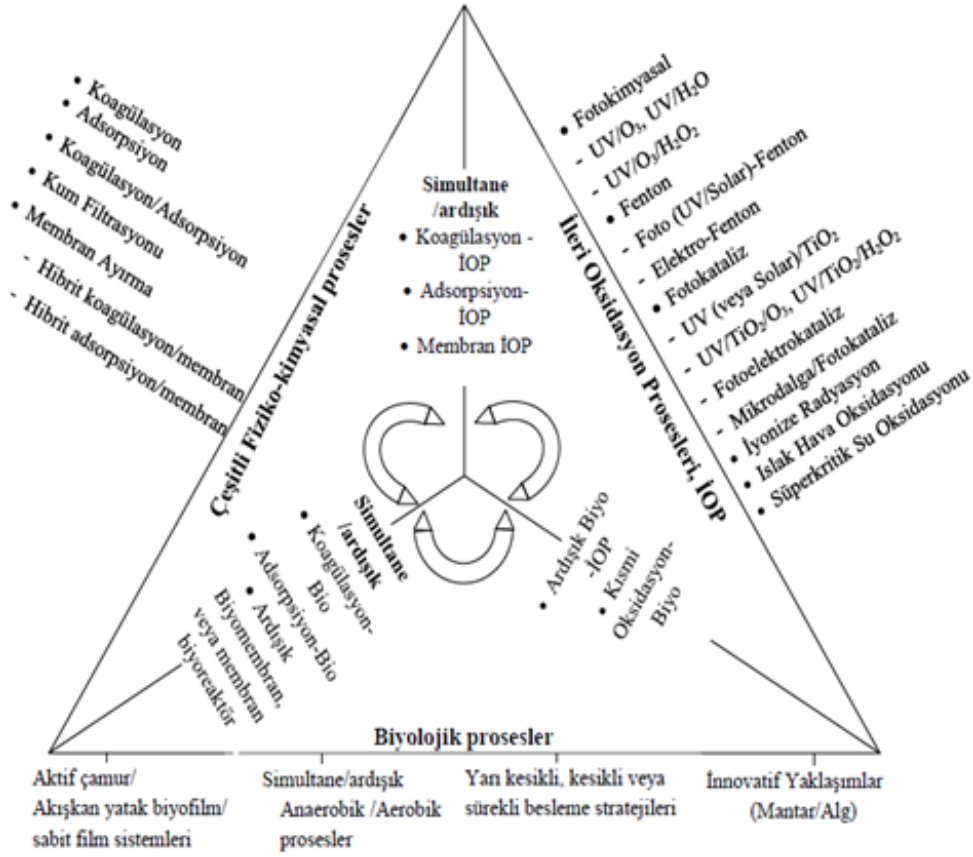
Ağır metaller, antropolojik yani volkanik faaliyetler ve endüstriyel faaliyetler sonucu atmosfere, pedosfere ve hidrosfere yayılmaktadır. Organizmaya solunum, sindirim ve deri yolu ile giren biyolojik olarak parçalanamayan ağır metaller, metabolizmadan çok yavaş atılabildiği için, birikerek tehlikeli konsantrasyonlara ulaşmakta ve toksikolojik etki yaratmaktadır. Ağır metallerin vücutta meydana getirdiği hastalıklar, otoimmün hastalıklar (kardiyovasküler hastalıklar, ülseratif kolit, tümör, romatizma vb.) organik hastalıklar (alerji, astım, böbrek hastalığı, egzama, kısırlık vb) ve nörolojik bozuklukları (alzheimer, parkinson, depresyon, migren) olarak sıralanabilir [8, 15]. Aynı zamanda, tarımsal ve sucul alanları koruma, kötü koku ve görünümü engelleme, içme ve kullanma suyu kaynaklarındaki kirliliği önleme, sucul yaşamı korumak ve su kanallarındaki kirliliği önlemek için atıksulardan ağır metal giderimi yapılmalıdır [16].

1.2.2. Ağır metallerin giderim yöntemleri

Atıksulardan ağır metal kirliliğini gidermek için fiziksel, kimyasal ve biyolojik esaslı yöntemler geliştirilmiştir (Şekil 1). Ağır metal giderimi için; kimyasal koagülasyon ve flokülasyon, elektrokimyasal yöntemler, membran filtrasyonu, iyon değişimi, biyoremediasyon ve biosorpsiyon en çok kullanılan yöntemlerdir [17, 18].

Koagülasyon, ağır metal içeren atıksuların arıtımında veya ön arıtımında düşük maliyetleri nedeniyle yaygın olarak uygulanmaktadır. Bununla birlikte çamur üretimine sebep olmaktadır. Fizikokimyasal ve biyolojik prosesler, fazla çamur oluşumu, yüksek işletme maliyetleri, atıksu türüne bağlı olarak değişkenlik gösterir.

Elektrokoagülasyon, kolloidlerin, süspansiyonların ve emülsiyonların elektriksel yüklerden etkilenmesi prensibine dayanır [20]. Bazı avantajları nedeniyle elektrokoagülasyon prosesi, endüstriyel atıksuların arıtılmasında etkili bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Elektrokimyasal prosesler, uzun süreli kullanımlarda az problemlidir ve daha az masraflı olabilir. Ağır metal içeren atıksuların arıtımında, hızlı ve iyi kontrol edilebilir bir yöntemdir. Bu avantajlar elektrokoagülasyon yönteminin yaygın olarak kullanılmasını sağlamaktadır, Ancak çamur oluşumuna neden olmazken, yüksek elektrik maliyeti prosesin uygulanabilirliğini kısıtlamaktadır [17, 21]. Membran filtrasyonu, atıksulardan ağır metal gideriminde etkili bir yöntemdir [22]. Bu yöntemin en büyük avantajı, düşük işletme maliyeti ile yüksek giderim verimi sağlamasıdır. Prosesin dezavantajı, giderim sonrası açığa çıkan kirlenmiş membranlar ve yüksek enerji maliyetleridir [23]. İyon değişim prosesinde, çözelti içerisinde giderilmesi amaçlanan iyonlar elektrostatik kuvvetler yardımıyla reçine üzerindeki iyonlar ile yer değiştirir. İyon değiştirme yönteminde, yatırım ve işletme maliyetleri yüksektir. Bu yöntem, yüksek konsantrasyonlarda kirlilik içeren endüstriyel atıksuların arıtımı için uygulandığında, iyon değiştirici reçineleri kısa sürede doymuluğa ulaşır ve rejenerasyonla yeniden kullanılabilir. Reçinelerin rejenerasyonunda kullanılan kimyasallar, ikincil kirlenme olarak çevreye zarar vermektedir [24, 25].



Şekil 1. Atıksuların arıtımında kullanılan prosesler [19].

Adsorpsiyon en ekonomik, etkili ve verimli bir prosestir. Proses, maddenin bir fazdan ayrılarak diğer bir fazda birikmesi esasına bağlı olarak, ara yüzeylerde gerçekleşmektedir. Atıksuların arıtımında sıvı-katı adsorpsiyonu kullanılır. Katı-sıvı adsorpsiyonu, çözelti içindeki çözünmüş (adsorbat) maddelerin adsorbent yüzeyinde tutularak çözeltiden uzaklaştırılması esasına dayanır. Atıksudan adsorbent üzerine iyon akışı, çözeltide kalan iyonların, adsorplanmış madde konsantrasyonu ile denge haline gelinceye kadar devam eder. Dengeye ulaşıldığında iyon transferi durur ve kararlı hal şartları meydana gelir [26, 27].

1.2.3. Sorbentler

Adsorpsiyona etki eden faktörlerin başlıcaları yüzey alanı, adsorbent yapısı ve tanecik boyutu, karıştırma hızı, adsorbatın çözünürlüğü ve molekül büyüklüğü, ortamın pH değeri, temas süresi ve sıcaklıktır. Adsorpsiyon işlemi için etkin ve verimli adsorbent seçimi oldukça önemlidir.

Aktif karbon, farklı hammaddelerden üretildiği için yüzey alanı, fonksiyonel gruplar, yüzey yükleri, büyüklük ve porozite gibi farklı yüzey özelliklerine sahiptir [28]. Farklı yüzey özellikleri, atıksulardan ağır metal gideriminde etkin kullanım alanı sağlar [29-31].

Ancak; yüksek maliyet ve sınırlı rejenerasyon davranışları, aktif karbon uygulamalarını kısıtlamaktadır. Tarımsal faaliyetler sonucunda açığa çıkan atıklar (şeker kamışı küspesi [32], greyfurt kabuğu [33], patates kabuğu

[34], çay atığı [35], Hindistan cevizi kabuğu [36], çekirdek kabuğu [37], pirina [38], atıksulardan ağır metal gideriminde alternatif adsorbent olarak kullanılmaktadır (Tablo 2).

Tarımsal atıkların yapısında, potansiyel adsorpsiyon kapasitesini etkileyen hemiselüloz, lignin, yağlar, proteinler, şeker, su, hidrokarbonlar ve nişasta bulunmaktadır [39, 40]. Tarımsal atıklar, doğal ve modifiye formda kullanılır. Doğal formda; materyal yıkanır, kurutulur ve istenilen partikül büyüklüğüne kadar eleme işlemine tabi tutulur ve adsorpsiyon prosesinde kullanılırken modifiye formda, materyal modifikasyon teknikleri ile ön işleme tabi tutulur ve adsorpsiyon prosesinde kullanılabilir. Bu ön işlemlerin amacı, aktif alanları genişletmek için fonksiyonel grup potansiyelini artırmaktır [40]. Endüstriyel faaliyetler sonucu açığa çıkan endüstriyel atıklar da adsorbent olarak kullanılmaktadır. Endüstriyel atıklar; (i) uçucu kül, (ii) demir-çelik endüstrisi atıkları (yüksek fırın cürufu, atık çamuru, toz)(iii) alüminyum endüstrisi atıkları (kırmızı çamur), (iv) gübre endüstrisi atıkları ve (v) diğer endüstriyel atıklar olarak ayrılır.

Son yıllarda yapılan çalışmalarda, arıtma çamurunun atıksulardaki fenollerin, ağır metallerin ve boyaların gideriminde kullanıldığı görülmektedir [41, 42]. Kitosan, turba yosun, deniz yosunu ve alger adsorbent olarak kullanılmaktadır. Adsorbent olarak yaygın olarak kullanılan diğer bir grup; kil, zeolit, sediment ve topraktır.

Tablo 2. Farklı biyokütlelerin ağır metal gideriminde sorbent olarak kullanımı

Adsorbent	Ağır metal	Biyosorpsiyon kapasitesi (mg g ⁻¹)	Referans
Agave küspesi	Zn(II)	7.84 mg g ⁻¹	[32]
Fındık kabuğu	Cu(II)	8.00 mg g ⁻¹	[43]
Arpa küspesi	Cu(II)	4.64 mg g ⁻¹	[44]
Pomelo kabuğu	Cu(II)	21.10 mg g ⁻¹	[45]
Hindistan cevizi ağacı talaşı	Cu(II)	3.89 mg g ⁻¹	[46]
Hindistan cevizi ağacı talaşı	Zn(II)	23.81 mg g ⁻¹	[46]
Patates kabuğu	Cu(II)	0.38 mg g ⁻¹	[34]
Nar kabuğu	Cu(II)	1.32 mg g ⁻¹	[47]
Mercimek kabuğu	Cu(II)	15.62 mg g ⁻¹	[48]
Buğday kabuğu	Cu(II)	11.00 mg g ⁻¹	[48]
Limon kabuğu	Cu(II)	1111.10 mg g ⁻¹	[49]
Yerfıstığı kabuğu	Cu(II)	13.1579 mg g ⁻¹	Bu çalışmada
Yerfıstığı kabuğu	Zn(II)	6.9444 mg g ⁻¹	Bu çalışmada
Pirinç kabuğu	Cu(II)	12.9870 mg g ⁻¹	Bu çalışmada
Pirinç kabuğu	Zn(II)	11.6279 mg g ⁻¹	Bu çalışmada

2 Materyal ve metot

2.1 Materyal

Çalışmada kullanılan pirinç kabuğu (PK) Samsun, Terme'de bulunan pirinç fabrikasından, yer fıstığı kabuğu (YK) Samsun, Tekkeköy'de bulunan kuruyemiş fabrikasından temin edilmiştir. Biyosorpsiyon öncesi, yer fıstığı ve pirinç kabuğu saf su ile yıkanarak, 50°C'de etüvide 48 saat kurutulmuş, öğütülmüş ve elenerek biyosorpsiyon işlemleri için kullanılabilir hale getirilmiştir.

Kullanılan kimyasallar, standart yöntem ve metotlara uygun hazırlanmıştır. Çinko ve bakır stok çözeltileri (1000 ppm); C₄H₆O₄Zn.2H₂O ve Cu(NO₃)₂.6H₂O, 1000 mL deiyonize su içerisinde çözülerek elde edilmiştir.

2.2 Materyallerin karakterizasyonu

Numunelerin biyosorpsiyon öncesi ve sonrası yüzey element analizleri, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı spektrometresi (EDS) ile yapılmıştır. Ayrıca, numunelerin moleküler bileşimini ve yapısını belirlemek için Fourier transform kızılötesi spektroskopisi (FTIR) kullanılmıştır.

2.3 Biyosorpsiyon çalışmaları

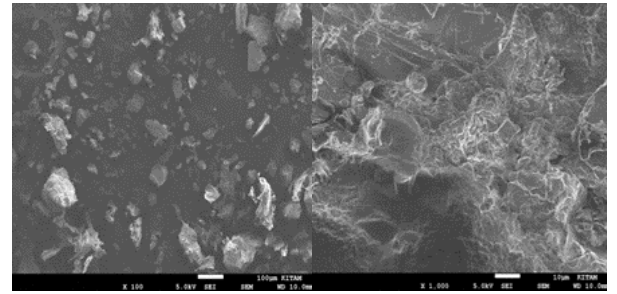
Biyosorpsiyon çalışmaları, adsorban miktarı, pH ve ağır metallerin başlangıç konsantrasyonu parametrelerindeki değişime göre yürütülmüştür.

Biyosorpsiyon çalışmaları, 25°C sıcaklıkta, 50 mL çalışma hacminde, 250 mL'lik erlenlerde, 150 rpm karıştırma hızına sahip çalkalamalı su banyosunda gerçekleştirilmiştir. Biyosorpsiyon çalışmaları süresince, sıcaklık (20-70°C), sorbent miktarı (5-20 g/L), pH (3-11), temas süresi ve başlangıç konsantrasyonu (25-200 mg L) etkisi incelenmiştir. Çözeltilerin pH'ı HCl ve NaOH kullanılarak ayarlanmıştır. Çözeltide kalan Cu(II) ve Zn(II) konsantrasyonu atomik adsorpsiyon spektrofotometresi (Unicam 929) ile analiz edilmiştir.

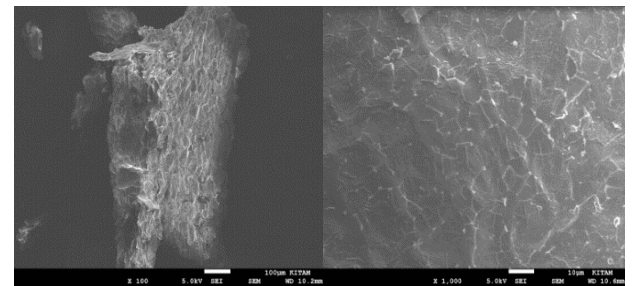
3 Bulgular ve tartışma

3.1 Materyallerin karakterizasyonu

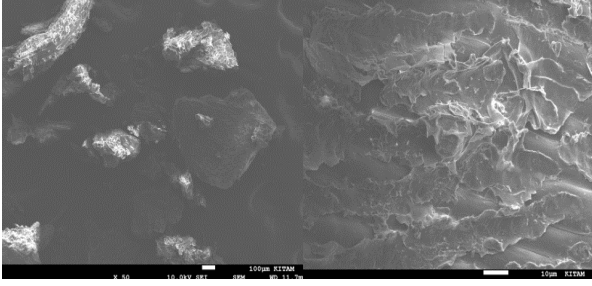
Şekil 2'de YK'na ait SEM görüntüsünde gözenekli yapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu gözenekli yapı, biyosorpsiyon prosesine olumlu yansımakta ve Cu(II) ve Zn(II) iyonlarının adsorplanmasını arttırmaktadır YK'nun bakır biyosorpsiyonu sonrası SEM görüntüleri (Şekil 3) ve çinko biyosorpsiyonu sonrası SEM görüntüleri (Şekil 4) incelendiğinde ise adsorplanan ağır metallerin YK yüzeyine etkileri gözlemlenmektedir.



Şekil 2. YK'nun biyosorpsiyon öncesi SEM görüntüleri, (a) x100, (b) x1000



Şekil 3. YK'nun bakır biyosorpsiyon sonrası SEM görüntüleri, (a)x100,(b) x1000



Şekil 4. YK'nun çinko biyosorpsiyon sonrası SEM görüntüleri, (a)x100,(b) x1000

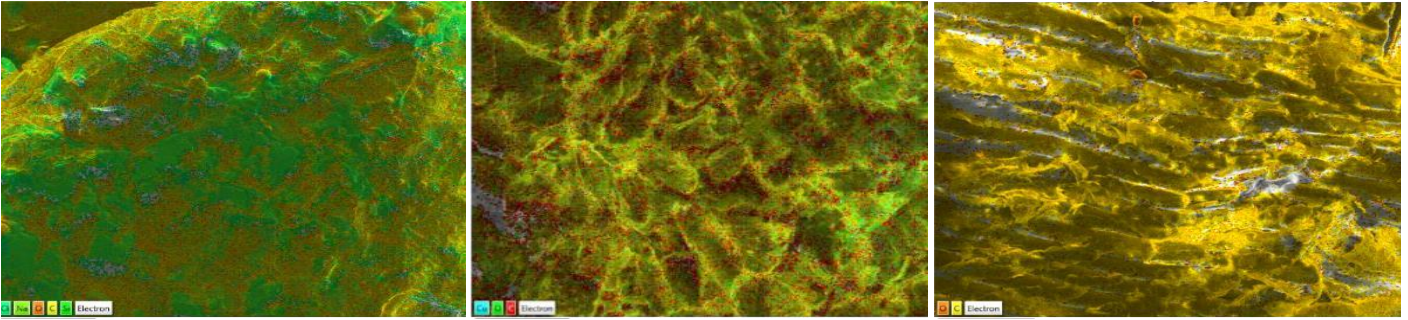
YK'nun biyosorpsiyon öncesi, bakır ve çinko biyosorpsiyonu sonrası EDS görüntüleri Şekil 5(a,b,c)'de yer almaktadır. YK'nun biyosorpsiyon öncesi EDS spektrumu (Şekil 6a); oksijen, potasyum, alüminyum, magnezyum, demir, sülfür, sodyum vb. gibi yapıların varlığını göstermektedir. YK'nun bakır biyosorpsiyonu sonrasında çekilen EDS spektrumu; bakır biyosorpsiyonunun başarılı bir şekilde gerçekleştiğini gösteren bakır pikini (Şekil 6b), çinko biyosorpsiyonu sonrasında çekilen EDS spektrumu; çinko biyosorpsiyonunun başarılı bir şekilde gerçekleştiğini gösteren çinko pikini (Şekil 6c) göstermektedir. Biyosorpsiyon sonrası spektrumlarında, biyosorpsiyon öncesi

spektrumunda çıkan diğer elementler işaretlenmediği için gösterilmemiştir.

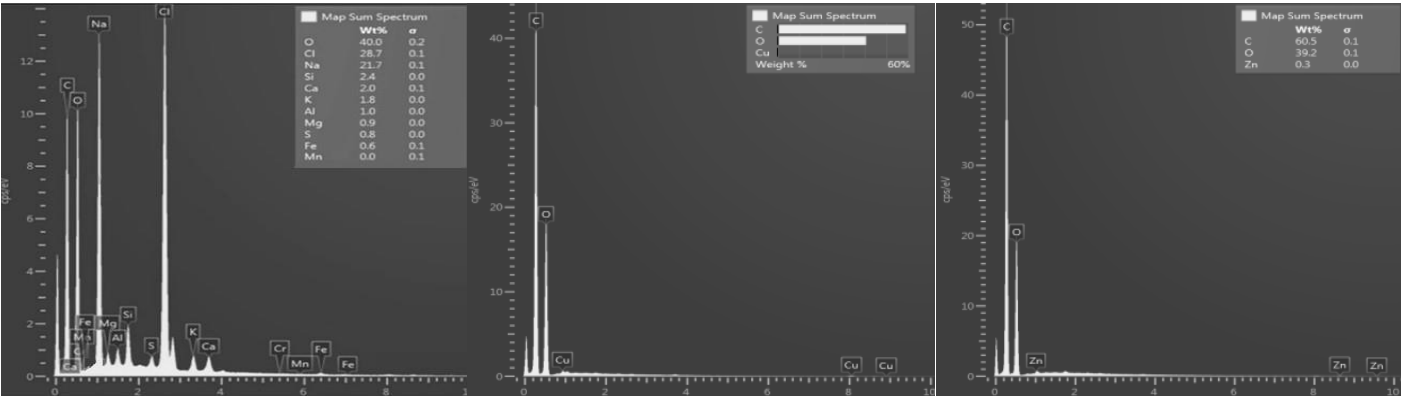
PK'nun SEM görüntüleri (Şekil 7), yüzeyin sıralı şekilde tepciklere sahip olan bir yapıda olduğunu göstermektedir. PK'nun bakır biyosorpsiyonu sonrası SEM görüntüleri (Şekil 8) ve çinko biyosorpsiyonu sonrası SEM görüntüleri (Şekil 9) incelendiğinde; adsorplanan metal iyonlarının PK yüzeyine etkileri görülmektedir.

PK'nun biyosorpsiyon öncesi, bakır ve çinko biyosorpsiyonu sonrası EDS görüntüleri Şekil 10(a,b,c)'de yer almaktadır. PK'nun bakır biyosorpsiyonu sonrasında çekilen EDS spektrumunda bakır biyosorpsiyonunun başarılı bir şekilde gerçekleştiğini gösteren bakır pikini (Şekil 11.b), çinko biyosorpsiyonu sonrasında çekilen EDS spektrumunda çinko biyosorpsiyonunun başarılı bir şekilde gerçekleştiğini gösteren çinko pikini (Şekil 11.c) gözlemlenmiştir.

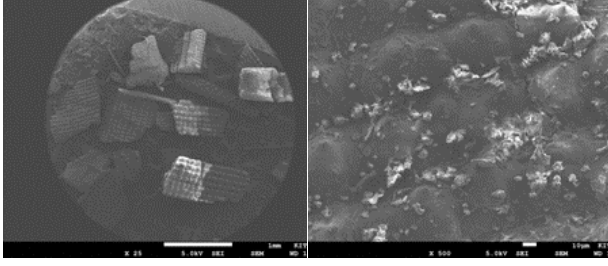
YK ve PK'nun FTIR spektrumları Şekil 12'de gösterilmiştir. Şekil 12'de verilen pirinç kabuğuna ait FTIR spektrumunda, 1000cm⁻¹'de (Si-O-Si) da C-OH bağı ve Si-O bağının titreşimlerinin üst üste gelmesinden kaynaklandığı kabul edilmiştir. Bu noktadaki yüksek pik, C-OH grubunun 1200-1000cm⁻¹ aralığındaki gerilme piklerinin ve Si-O bağının gerilme piklerinin üst üste binmesinden kaynaklanmaktadır [50]. Yer fıstığı kabuğu için FTIR spektrumları incelendiğinde, 1024cm⁻¹'de karakteristik pik C-O esnemesine titreşimini göstermektedir[51].



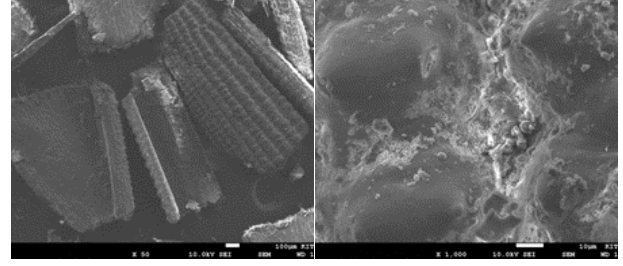
Şekil 5. (a) YK'nun biyosorpsiyon öncesi EDS görüntüsü, (b) YK'nun bakır biyosorpsiyonu sonrası EDS görüntüsü (T:25°C, C₀: 25mg L, pH: 5,9 t: 2h) (c) YK'nun çinko biyosorpsiyonu sonrası EDS görüntüsü (T:25°C, C₀: 25mg L, pH: 5,7, t: 2h)



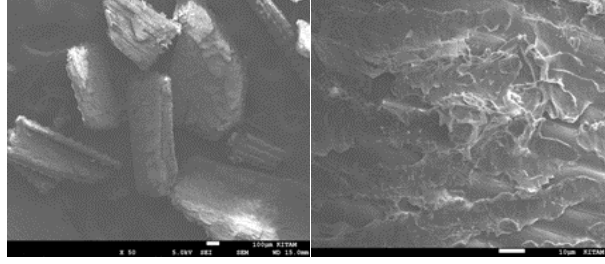
Şekil 6. (a) YK'nun biyosorpsiyon öncesi EDS spektrumu, (b) YK'nun bakır biyosorpsiyonu sonrası EDS spektrumu, (c) YK'nun çinko biyosorpsiyonu sonrası EDS spektrumu



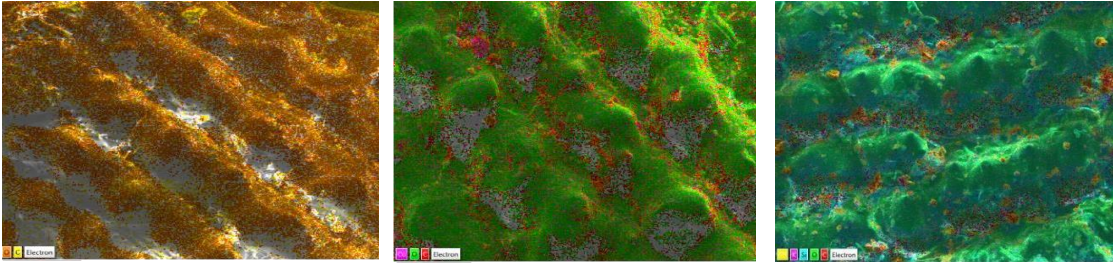
Şekil 7. PK'nun biyosorpsiyon öncesi SEM görüntüleri, (a)x100, (b)x1000



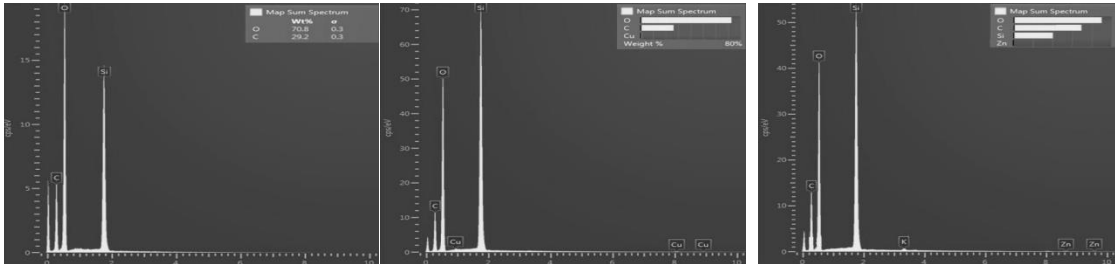
Şekil 8. PK'nun bakır biyosorpsiyon sonrası SEM görüntüleri, (a)x100,(b)x1000



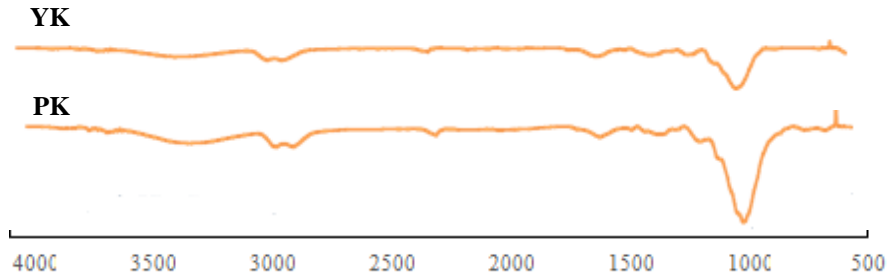
Şekil 9. PK'nun çinko biyosorpsiyon sonrası SEM görüntüleri, (a)x100,(b)x1000



Şekil 10. (a) PK'nun biyosorpsiyon öncesi EDS görüntüsü, (b) PK'nun bakır biyosorpsiyonu sonrası EDS görüntüsü (T:25°C, C₀: 25 mg L⁻¹, pH: 5,9, t: 2h) (c) PK'nun çinko biyosorpsiyonu sonrası EDS görüntüsü (T:25°C, C₀: 25 mg L⁻¹, pH: 5,7, t: 2h)



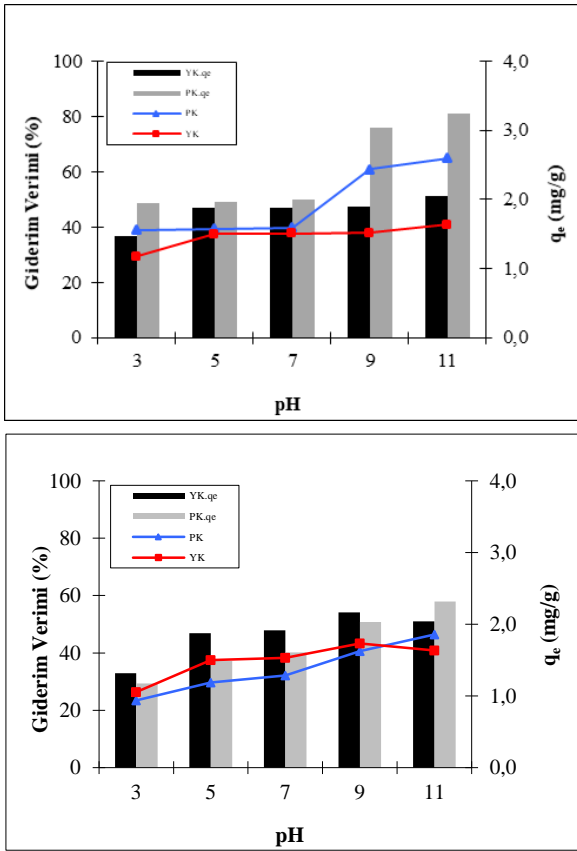
Şekil 11 (a) PK'nun biyosorpsiyon öncesi EDS spekturumu, (b) PK'nun bakır biyosorpsiyonu sonrası EDS spekturumu (c) PK'nun çinko biyosorpsiyonu sonrası EDS spekturumu



Şekil 12. YK ve PK'nun FTIR spektrumları

3.2 pH Değişiminin biyosorpsiyon üzerine etkisi

Biyosorpsiyon çalışmaları, pH; 3-11 aralığında, 25°C sıcaklıkta, 25 mg L⁻¹ başlangıç metal konsantrasyonunda, 180 dk sürede gerçekleştirilmiştir. Şekil 13’de, pH artarken, Cu(II) ve Zn(II) sorpsiyon kapasitesinin arttığı görülmektedir. Düşük pH’larda, ortamda daha fazla H⁺ iyonlarının bulunması; sorbent üzerindeki aktif bölgelere metal iyonlarının bağlanmasını engellemektedir. pH değeri arttıkça, fonksiyonel grupların deprotonize olması (proton bırakma) ile sorbent yüzeyinin negatif yükü artar. Sorbent üzerindeki negatif yüklü aktif bölgelere, pozitif yüklü metal iyonlarının bağlanması ile biyosorpsiyon kapasitesinde artış görülmektedir [52, 53].



Şekil 13. (a) YK ve PK ile bakır biyosorpsiyonu üzerine pH etkisi, (b) YK ve PK ile çinko biyosorpsiyonu üzerine pH etkisi

3.3 Biyosorpsiyon izotermeleri

Biyosorpsiyon izotermeleri, adsorpsiyon sistemlerinin dizaynı ve analizi için kullanılan temel araçlardır. İzoterm, sabit sıcaklıktaki bir adsorpsiyon prosesinin dengeye ulaştığı anda adsorbent birim kütlesine başına adsorbentte bulunan madde miktarı ve akışkan fazdaki madde konsantrasyonu arasındaki ilişkiyi verir. Biyosorpsiyon çalışmalarında elde edilen veriler, Langmuir, Freundlich ve Temkin izotermine göre değerlendirilmiş ve eşitliklerin düzenlenmiş halleri Tablo 3’de ifade edilmiştir [53].

Langmuir izoterm model, homojen bir yüzeyde tek tabakalı adsorpsiyonun varlığını gösterir. Yüzeyin her noktasında, adsorpsiyon enerjisinin aynı olduğunu ve yüzeyde tutunan adsorbat molekülleri arasında etkileşimin olmadığı varsayımına dayanmaktadır. Freundlich izoterm model, heterojen bir yüzeyde çok tabakalı adsorpsiyonun varlığını gösterir. Temkin izoterm model, yüzeyde adsorplanan adsorbat molekülleri arasındaki etkileşimi açıklamaktadır [54].

Adsorpsiyon izoterm modelleri korelasyon katsayılarına (R²) göre karşılaştırıldığında, her bir izoterm modelin deneysel çalışma verileri ile uyumlu olduğu görülmüştür (Tablo 4). Deneysel verilerin, Langmuir, Freundlich ve Temkin izoterm modellerine uygunluk göstermesi, biyosorpsiyon çalışmalarının hem heterojen hem de homojen yüzeylerde gerçekleşebildiğini ve adsorbat molekülleri arasında etkileşim olabildiğini göstermektedir.

3.4 Biyosorpsiyon kinetikleri

Biyosorpsiyon kinetik çalışmaları ile, sorpsiyon işleminin tamamlanması için gerekli temas süresini belirleyen sorpsiyon hızı belirlenebilmektedir

FK ve PK üzerine Cu(II) ve Zn(II) iyonlarının biyosorpsiyon kinetiği, yalancı birinci dereceden, yalancı ikinci dereceden, Elovich ve Bangham modellerine göre incelenmiş ve eşitliklerin düzenlenmiş halleri Tablo 5’de ifade edilmiştir.

Cu(II) ve Zn(II) iyonlarının FK ve PK ile giderilmesinde, biyokütle yüzeyindeki ağır metal konsantrasyon değişimini esas alan yalancı birinci derece, yalancı ikinci derece, Elovich ve Bangham kinetik modellerine ait regresyon katsayıları (R²) incelendiğinde, en yüksek değerlerin yalancı ikinci derece kinetik modelinden elde edildiği görülmektedir (Tablo 6). Bu sonuçlara göre, ağır metallerin biyokütle ile sorpsiyonu için en uygun kinetik model; yalancı ikinci derece kinetik modeldir.

Tablo 3. Cu(II) ve Zn(II) iyonlarının biyosorpsiyonunun izoterm modelleri

İzoterm Model	İzoterm Eşitlikleri	Parametreler
Langmuir	$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{C_e}{q_m}$	q_e dengedeki metal iyonu konsantrasyonu (mg g ⁻¹), q_m maksimum biyosorpsiyon kapasitesi (mg g ⁻¹), K_L Langmuir biyosorpsiyon sabiti (L mg ⁻¹),
Freundlich	$\log q_e = \log K_f + \left(\frac{1}{n}\right) \log C_e$	n boyutsuz bir parametre, K_f Freundlich izoterm sabiti (L mg ⁻¹),
Temkin	$q_e = B \cdot \ln K_T + B \cdot \ln C_e$	B adsorpsiyon enerjisinin değişmesidir (J mol ⁻¹), K_T Temkin izotermi bağlanma sabiti (L mg ⁻¹),

Tablo 4. Cu(II) ve Zn(II) iyonlarının biyosorpsiyonunun izoterm parametreleri

İzoterm modelleri		Cu (II)		Zn (II)	
		YK	PK	YK	PK
Langmuir	q_m (mg g ⁻¹)	13.1579	12.9870	6.9444	11.6279
	K_L (L mg ⁻¹)	0.0115	0.0136	0.0147	0.0091
	R^2	0.9420	0.9450	0.9100	0.9450
Freundlich	n	0.6119	0.7027	0.5952	0.7220
	K_f (L mg ⁻¹)	4.3954	5.2844	9.3325	9.3541
	R^2	0.9760	0.9210	0.9250	0.9390
Temkin	b	909.1912	830.0080	1570.7617	1034.7815
	K_T (L mg ⁻¹)	0.1275	0.1294	0.1393	0.1031
	R^2	0.9553	0.9601	0.9896	0.9944

Tablo 5. Cu(II) ve Zn(II) iyonlarının biyosorpsiyonunun kinetik modelleri

Kinetik Model	Kinetik Eşirlikleri	Parametreler
Yalancı birinci derece	$\log(q_e - q_t) = \log(q_e) - \frac{k_1}{2.303} t$	q_e dengedeki metal iyonu konsantrasyonu (mg g ⁻¹)
		q_t t anında adsorplanan adsorbat derişimi (mg g ⁻¹)
		k_1 yalancı birinci dereceden hız sabiti (dk ⁻¹)
Yalancı ikinci derece	$\left[\frac{t}{q_t}\right] = \frac{1}{kq_e} + \frac{1}{q_e} t$	q_t t anında adsorplanan adsorbat derisimi (mg g ⁻¹)
		k_2 yalancı ikinci dereceden hız sabiti (dk ⁻¹)
		α başlangıç adsorpsiyon hız sabiti (mg dk ⁻¹)
Elovich	$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta} \ln(t)$	β desorpsiyon sabiti (g mg ⁻¹)
Bangham	$\log \log\left(\frac{C_0}{C_0 - q_t m}\right) = \log\left(\frac{k_0 m}{2.303V}\right) + a \log t$	C_0 Çözeltideki adsorbatın başlangıç konsantrasyonu (mg L ⁻¹)
		V Çözelti hacmi
		q_t t anında adsorplanan adsorbat derişimidir (mg g ⁻¹)

Tablo 6. Cu(II) ve Zn(II) iyonlarının biyosorpsiyonunun kinetik parametreleri

Kinetik modelleri		Cu (II)		Zn (II)	
		YK	PK	YK	PK
Yalancı birinci derece	q_e (mg g ⁻¹)	4.1700	4.2500	4.1700	4.2500
	k_1 (L mg ⁻¹)	5.3760	7.9360	5.3760	7.9360
	R^2	0.8251	0.7054	0.8251	0.7054
Yalancı ikinci derece	q_e (mg g ⁻¹)	2.8000	2.3100	3.6400	4.1000
	k_2 (g mg ⁻¹ .dk ⁻¹)	0.0200	5.2890	0.0100	0.0060
	R^2	0.8428	0.8649	0.8404	0.8447
Elovich	β (g mg ⁻¹)	1.9400	2.2400	1.9400	1.7000
	a (mg g ⁻¹ .dk ⁻¹)	0.1800	1.2000	0.1200	0.1000
	R^2	0.8125	0.8816	0.8536	0.8359
Bangham	a (mg g ⁻¹ .dk ⁻¹)	0.4345	0.6101	0.8100	0.8094
	k (mL(g L ⁻¹))	0.0040	0.0010	0.0009	0.0008
	R^2	0.8407	0.8017	0.8255	0.8255

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, atıksulardan bakır ve çinko metal iyonlarının gideriminde fıstık kabuğu ve pirinç kabuğu biyokütlelerinin kullanımı araştırılmıştır. Biyokütlelerin karakterizasyonu, SEM-EDS, FTIR analizleri ile gerçekleştirilmiştir. YK ve PK'nun, bakır ve çinko biyosorpsiyonu öncesi ve sonrası SEM-EDS görüntüleri

incelenmiştir. FTIR spektrumları incelendiğinde, YK ve PK; 995 cm⁻¹'deki karakteristik pik, C=C gerilme titreşimine aittir. Biyosorpsiyon çalışmaları, pH; 3-11 aralığında, 25°C sıcaklıkta, 25 mg L⁻¹ başlangıç metal konsantrasyonunda ve 180 dk sürede gerçekleştirilmiştir. pH'ın artarken, Cu(II) ve Zn(II)'un sorpsiyon kapasitesinin arttığı görülmektedir.

Biyosorpsiyon çalışmaları, Langmuir, Freundlich ve Temkin izotermine göre değerlendirilmiştir. İzoterm modelleri, korelasyon katsayılarına (R^2) göre karşılaştırıldığında, uygulanan izoterm modellere uygunluk göstermektedir. Biyosorpsiyon çalışmaları, hem heterojen hem de homojen yüzeylerde gerçekleşmektedir ve adsorbat molekülleri ile biyosorbentler arasında etkileşim olmaktadır.

Kinetik çalışmaları, yalancı birinci dereceden, yalancı ikinci dereceden, Elovich ve Bangham modellerine göre değerlendirilmiştir. Kinetik modellere ait regresyon katsayıları (R^2) incelendiğinde, en yüksek değerlerin yalancı ikinci derece kinetik modelinden elde edildiği görülmektedir. Atıksulardaki Cu(II) ve Zn(II) iyonlarının gideriminde en uygun kinetik model; yalancı ikinci derece kinetik modeldir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %20

Kaynaklar

- [1] Ş. Kaypak, Bilim ve teknolojinin gelişiminin çevreye yansımaları. Uluslararası Sosyal Bilimler Kongresi, Adana, Türkiye, 8-10 Mart 2019.
- [2] Z. Öztemel, Ş. Tüfenkçi ve T. Çakmakkı, motorlu taşıtlardan kaynaklanan ağırmetal kirliliğinin belirlenmesi: Şanlıurfa-Viraneşehir karayolu örneği, YYÜ Tar. Bil. Derg., 26(2), 282-287, 2016.
- [3] M. Ş. Dündar, H. Altundağ, S. Kaygaldurak, V. Şar ve A. Acar, Çeşitli endüstriyel atık sularda ağır metal düzeylerinin belirlenmesi. SAÜ Fen Bilimleri Dergisi, 16(1), 6-12, 2012.
- [4] A. Esmaili, and N. Khoshnevisan, Optimization of process parameters for removal of heavy metals by biomass of Cu and Co-doped alginate-coated chitosan nanoparticles. Bioresource technology, 218, 650-658. 2016. <https://doi:10.1016/j.biortech.2016.07.005>
- [5] F. Fu, and Q. Wang, Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. J. Environmental Management, 92(3), 407-414, 2011. <https://doi:10.1016/j.jenvman.2010.11.011>.
- [6] M. Fomina, and G. M. Gadd, Biosorption: current perspectives on concept, definition and application, Bioresource Technology, 160, 3-14, 2014. <https://doi:10.1016/j.biortech.2013.12.102>.
- [7] M. Edelstein, and M. Ben-Hur, Heavy metals and metalloids: Sources, risks and strategies to reduce their accumulation in horticultural crops. Sci. Hort. 234, 431-444, 2018. <https://doi:10.1016/j.scienta.2017.12.039>.
- [8] K. H. Vardhan, P. S. Kumar, and R. C. Panda, A review on heavy metal pollution, toxicity and remedial measures: Current trends and future perspectives. Journal of Molecular Liquids, 290, 111-197, 2019. <https://doi:10.1016/j.molliq.2019.111197>.
- [9] M. Xu, P. Hadi, G. Chen, and G. McKay, Removal of cadmium ions from wastewater using innovative electronic waste-derived material. J. Hazard. Mater. 273, 118-123, 2014. <https://doi:10.1016/j.molliq.2020.111197>
- [10] A. Maleki, B. Hayati, F. Najafi, F. Gharibi, and S. W. Joo, Heavy metal adsorption from industrial wastewater by PAMAM/TiO₂ nanohybrid: Preparation, characterization and adsorption studies. J. Mol. Liq. 224, 95-104, 2016. <https://doi:10.1016/j.molliq.2020.09.060>.
- [11] A. Kolbasov, S. Sinha-Ray, A. I. Yarin, and B. Pourdeyhimi, Heavy metal adsorption on solution-blown biopolymer nanofiber membranes. J. Membr. Sci. 530, 250-263, 2017. <https://doi:10.1016/j.memsci.2017.02.019>.
- [12] J. Singh, M. Sharma, and S. Basu, Heavy metal ions adsorption and photodegradation of remazol black XP by iron oxide/silica monoliths: Kinetic and equilibrium modelling. Adv. Powder Technol., 29(9), 2268-2279, 2018. <https://doi:10.1016/j.apt.2018.06.011>.
- [13] V. Manirethan, K. Raval, R. Rajan, H. Tharia, and R. M. Balakrishnan, Kinetic and thermodynamic studies on the adsorption of heavy metals from aqueous solution by melanin nanopigment obtained from marine source: Pseudomonas stutzeri. J. Environmental Management, 214, 315-324, 2018. <https://doi:10.1016/j.jenvman.2018.02.084>.
- [14] A. Rether, Entwicklung und charakterisierung wasserlöslicher benzoylthioharnstoffnalisierungspolymere zur selektiven abtrennung von schwermetallionen aus abwassern und prozesslösungen, Doktora Tezi, Münih Teknik Üniversitesi, München, Almanya, 2002.
- [15] G. Özbolat and A. Tuli, Effects of heavy metal toxicity on human health, Archives Medical Review Journal, 25(4), 502-521, 2016.
- [16] A. Şama, Taşkoprü (Kastamonu) Atıksu Arıtma Tesisi İçin Proje Aşamasında öngörülen ve mevcut durumda sağlanan verimin sürekliliğinin karşılaştırılması. Journal Of Personality And Social Psychology, 1(1), 118-1197, 2017.
- [17] F. Zhao, W. Yang, Z. Zeng, H. Li, X. Yang, Z. He, B. Gu, M. T. Rafiq, and H. Peng, Nutrient removal efficiency and biomass production of different bioenergy plants in hypereutrophic water. Biomass Bioenergy, 42, 212-218, 2012. <https://doi:10.1016/j.biombioe.2012.04.003>.
- [18] Y. Yao, B. Gao, J. Chen, and I. Yang, Engineered biochar reclaiming phosphate from aqueous solutions: mechanisms and potential application as a slow-release fertilizer. Environ. Sci. Technol. 47(15), 8700-8708, 2013. <https://doi:10.1021/es4012977>.
- [19] E. H. Gürkan, and S. Çoruh, Equilibrium and kinetic adsorption study of aqueous basic dye solutions using waste foundry sand. International Journal of Global Warming, 11(1), 87-106, 2018. <https://doi:10.1504/IJGW.2017.080991>.
- [20] S. Bayar, R. Boncukcuoglu, B. A. Fil ve A. E. Yılmaz, Elektrokoagülasyon yöntemi kullanılarak Direct Red 23 boyar maddesinin gideriminin incelenmesi. İğdir Üni. Fen Bilimleri Enst. Der., 2(2), 21-28, 2012.

- [21] A. K. Verma, R. R. Dash, and P. Bhunia, A review on chemical coagulation/flocculation technologies for removal of colour from textile wastewaters. *Journal of Environmental Management*, 93, 154-168, 2012. <https://doi:10.1016/j.jenvman.2011.09.012>.
- [22] B. Lam, S. Deon, N. Morin-Crini, G. Crini, and P. Fievet, Polymer-enhanced ultrafiltration for heavy metal removal: Influence of chitosan and carboxymethyl cellulose on filtration performances. *J. Clean Prod.*, 171, 927-933, 2018. <https://doi:10.1016/j.jclepro.2017.10.090>.
- [23] P. R. Choudhury, S. Majumdar, G. C. Sahoo, S. Saha, and P. Mondal, High pressure ultrafiltration CuO/hydroxyethyl cellulose composite ceramic membrane for separation of Cr(VI) and Pb(II) from contaminated water. *Chem. Eng. J.*, 336, 570-578, 2018. <https://doi:10.1016/j.cej.2017.12.062>.
- [24] V. J. Inglezakis, M. M. Fyrillas, and M. A. Stylianou, Two-phase homogeneous diffusion model for the fixed bed sorption of heavy metals on natural zeolites. *Microporous Mesoporous Mater.* 266, 164-176, 2018. <https://doi:10.1016/j.micromeso.2018.02.045>.
- [25] S. S. Obaid, D. K. Gaikwad, M. I. Sayyed, K. Al-Rashdi, and P. P. Pawar, Heavy metal ions removal from waste water by the natural zeolites. *Mater. Today Proc.* 5(9), 17930-17934, 2018. <https://doi:10.1016/j.matpr.2018.06.122>.
- [26] R. Gayathri, K. P. Gopinath, P. S. Kumar, and S. Suganya, Adsorption capability of surface modified jujube seeds for Cd(II), Cu(II) and Ni(II) ions removal: mechanism, equilibrium, kinetic and thermodynamic analysis. *Desalination Water Treat.*, 140, 268-282, 2019. <https://doi:10.5004/dwt.2019.23405>.
- [27] G. Z. Kyzas, G. Bomis, R. L. Kosheleva, E. K. Efthimiadou, E. P. Favvas, M. Kostoglou, and A. C. Mitropoulos, Nanobubbles effect on heavy metal ions adsorption by activated carbon. *Chem. Eng. J.*, 356, 91-97, 2019. <https://doi:10.1016/j.cej.2018.09.019>.
- [28] S. D. Gisi, G. Lofrano, M. Grassi, and M. Notarnicola, Characteristics and adsorption capacities of low-cost sorbents for wastewater treatment: A review. *Sustainable Materials and Technologies.* 9, 10-40, 2016. <https://doi:10.1016/j.susmat.2016.06.002>
- [29] M. Sharma, J. Singh, S. Hazra, and S. Basu, Adsorption of heavy metal ions by mesoporous ZnO and TiO₂/ZnO monoliths: Adsorption and kinetic studies. *Microchem. J.* 145, 105-112, 2019. <https://doi:10.1016/j.microc.2018.10.026>.
- [30] S. Sun, J. Zhu, Z. Zheng, J. Li, and M. Gan, Biosynthesis of β -cyclodextrin modified Schwertmannite and the application in heavy metals adsorption. *Powder Technol.*, 342, 181-192, 2019. <https://doi:10.1016/j.powtec.2018.09.072>.
- [31] P. R. Yaashikaa, P. S. Kumar, V. P. M. Babu, R. K. Durga, V. Manivasagan, K. Saranya, and A. Saravanan, Modelling on the removal of Cr(VI) ions from aquatic system using mixed biosorbent. *J. Mol. Liq.*, 276, 362-370, 2019. <https://doi:10.1016/j.molliq.2018.12.004>.
- [32] L. H. Velazquez-Jimenez, A. Pavlick, J. R. Rangel-Mendez, Chemical characterization of raw and treated agave bagasse and its potential as adsorbent of metal cations from water. *Ind. Crop. Prod.* 43, 200-206, 2013. <https://doi:10.1016/j.indcrop.2012.06.049>
- [33] W. Zou, I. Zhao, and I. Zhu, Efficient uranium (VI) biosorption on grapefruit peel: Kinetic study and thermodynamic parameters. *J. Radioanal. Nuci. Chem.*, 292, 1303-1315, 2012. <https://doi:10.1007/s10967-011-1602-0>.
- [34] T. Aman, A. A. Kazi, M. U. Sabri, and Q. Bano, Potato peels as solid waste for the removal of heavy metal Co(II) from waste water/industrial effluent. *Colloids Surf. B: Biointerfaces*, 63, 116-121, 2008. <https://doi:10.1016/j.colsurfb.2007.11.013>.
- [35] E. Malkoc and Y. Nuhoglu, Investigations of Nickel(II) removal from aqueous solutions using tea factory waste. *Journal of Hazardous Material*, 127(1), 120-128, 2005. <https://doi:10.1016/j.jhazmat.2005.06.030>.
- [36] K. Kadirvelu, K. Thamaraiselvi and C. Namasivayam, Adsorption of Nickel(II) from aqueous solution onto activated carbon prepared from coirpith. *Separation and Purification Technology*, 24(3), 497-505, 2001. [https://doi:10.1016/S1383-5866\(01\)00149-6](https://doi:10.1016/S1383-5866(01)00149-6).
- [37] H. N. Köysüren, and Ş. Dursun, The removal of heavy metal ions from the aquatic environment by modified apricot kernel shell. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 28(2), 427-435, 2013.
- [38] O. Gök, and Ö. Çimen Mesutoğlu, Olive pomace as a low-cost adsorbent for the removal heavy metals. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32(2), 507-516, 2017.
- [39] A. Bhatnagar, and M. Sillanpaa, Utilization of agro-industrial and municipal waste materials as potential adsorbents for water treatment: A review. *Chem. Eng. J.*, 157(2-3), 277-296, 2010. <https://doi:10.1016/j.cej.2010.01.007>.
- [40] A. Bhatnagar, M. Sillanpaa, and A. Witek-Krowiak, Agricultural waste peels as versatile biomass for water purification: A review. *Chem. Eng. J.*, 270, 244-271, 2015. <https://doi:10.1016/j.cej.2015.01.135>.
- [41] J. J. Liu, X. C. Wang, and B. Fan, Characteristics of PAHs adsorption on inorganic particles and activated sludge in domestic wastewater treatment. *Bioresource Technol.*, 102(9), 5305-5311, 2011. <https://doi:10.1016/j.biortech.2010.12.063>.
- [42] A. Gupta, and A. Garg, Utilisation of sewage sludge derived adsorbents for removal of recalcitrant compounds from wastewater: mechanistic aspects, isotherms, kinetics and thermodynamics. *Bioresource Technol.*, 194, 214-224, 2015. <https://doi:10.1016/j.biortech.2015.07.005>.
- [43] R. Malik, D. S. Ramteke, and S. R. Wate, Adsorption of malachite green on groundnut shell waste based powdered activated carbon, *Waste Management*, 27, 1129-1138, 2007. <https://doi:10.1016/j.wasman.2006.06.009>.

- [44] E. Pehlivan, T. Altun, and S. Parlayıcı, Modified barley straw as a potential biosorbent for removal of coer ions from aqueous solution. *Food Chem.*, 135, 2229-2234, 2012. <https://doi:10.1016/j.foodchem.2012.07.017>.
- [45] P. Tasaso, Adsorption of coer using pomelo peel and depectinated pomelo peel, *Journal of Clean Energy Technology*, 2(2), 154-157, 2014. <https://doi:10.7763/jocet.2014.v2.112>.
- [46] W. P. Putra, A. Kamari, S. N. M. Yusoff, C. F. Ishak, A. Mohammed, N. Hashim, and I. Md. Isa, Biosorption of Cu(II), Pb(II) and Zn(II) Ions from aqueous solutions using selected waste materials: Adsorption and characterisation studies. *Journal of Encapsulation and Adsorption Sciences*, 4, .25-35, 2014. <https://doi:10.4236/jeas.2014.41004>.
- [47] H. Arslanoglu, H. S. Altundogan, and F. Tumen, Heavy metals binding properties of esterified lemon. *Journal of Hazardous Materials*, 164, 1406–1413, 2009. <https://doi:10.1016/j.jhazmat.2008.09.054>.
- [48] Q. Qian, K. Mochidzuki, T. Fujii, and A. Sakoda, Removal of coer from aqueous solution using ironcontaining adsorbents derived from methane fermentation sludge. *Journal of Hazardous Materials*, 172, 1137–1144, 2009. <https://doi:10.1016/j.jhazmat.2009.07.107>.
- [49] M. Topal, E. I. Arslan Topal ve S. Aslan, Limon kabuğu kullanarak sulu çözeltilerden Cu(II) giderimi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 27(3), 265-270, 2011.7
- [50] M. H. Morcali, B. Zeytuncu, and O. Yucel, Platinum uptake from chloride solutions using biosorbents, *Materials Research*, 16(2), 528-538, 2013, <https://doi:10.1590/S1516-14392013005000006>.
- [51] S. Boumchita, Y. Benjelloun, and S. Lairini, Alication of peanut shell as a low-cost adsorbent for the removal of anionic dye from aqueous solutions. *Journal of Materials and Environmental Science*, 8(7), 2353-2364, 2017.
- [52] B. Zhou, Z. Wang, D. Shen, F. Shen, C. Wu and R. Xiao, Low cost earthworm manure-derived carbon material for the adsorption of Cu²⁺ from aqueous solution: Impact of pyrolysis temperature. *Ecol. Eng.*, 98, 189-195, 2017. <https://doi:10.1016/j.ecoleng.2016.10.061>.
- [53] C. Yu, M. Wang, X. Dong, Z. Shi, X. Zhang and Q. Lin, Removal of Cu (II) from aqueous solution using Fe₃O₄-alginate modified biochar microspheres. *RSC Adv.*, 7, 53135–53144, 2017. <https://doi:10.1039/c7ra10185f>.
- [54] M. Okur ve D. D. Eslek Koyuncu, Atık yumurta kabuklarından sentezlenen hidroksiapatitin Remazol N.Blue RGB boyarmaddesinin adsorpsiyonunda değerlendirilmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35(1), 419-430, 2020. <https://doi:10.17341/gazimmfd.474350>.





Kavun çekirdeği pirolizine ait kinetik parametrelerin ve termodinamik özelliklerin belirlenmesi

Determination of kinetic parameters and thermodynamic properties of melon seed pyrolysis

Korkut Açıkalın^{1,*} , Gözde Gözke² 

¹ Yalova Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 77200, Yalova Türkiye

² Yalova Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, 77200, Yalova, Türkiye

Özet

Bu çalışmanın amacı, kavun çekirdeği pirolizinin davranışını incelemek ve kinetik parametreleri ile termodinamik özelliklerini hesaplamaktır. Termogravimetrik analiz deneyleri azot atmosferinde çevre sıcaklığından 800°C'ye 5, 10, 20 ve 40°C/dk ısıtma hızlarında çalışılmıştır. Piroliz prosesinin, ikinci ve üçüncü basamakları aktif piroliz basamağı olan dört basamakta gerçekleştiği tespit edilmiştir. Kinetik hesaplamalar model içermeyen Flynn-Wall-Ozawa, Kissinger-Akahira-Sunose, Starink ve model bazlı Coats-Redfern yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. İkinci ve üçüncü basamaklara ait görünen aktivasyon enerjisi değerlerinin sırasıyla, 123.9–215.5 ve 141.9–234.2 kJ/mol aralıklarında olduğu hesaplanmıştır. Coats-Redfern yöntemi, ikinci ve üçüncü basamakların sırasıyla F1.65 ve D5 reaksiyon mekanizmalarına uyduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, 10°C/dk ısıtma hızında gerçekleştirilen piroliz prosesinin aktif piroliz basamakları için, model içermeyen kinetik yöntemlerden hesaplanan sonuçlar kullanılarak entalpi, entropi ve Gibbs enerjisi değişimleri hesaplanmıştır. Mevcut çalışmada elde edilen sonuçlar, kavun çekirdeği piroliz proseslerinin tasarlanmasında gerekli olan bilgileri sağlamada faydalı olacaktır.

Anahtar kelimeler: Kavun çekirdeği, Piroliz davranışı, Piroliz kinetiği, Termodinamik özellikler

1 Giriş

Nüfus artışına bağlı olarak artan enerji tüketimi göz önüne alındığında, küresel enerji ihtiyacının 2040 senesine kadar %25'ten fazla artması beklenmektedir [1]. Fosil yakıtlar hala en sık kullanılan enerji kaynağı olmakla birlikte hızla tükenmektedirler. Bununla birlikte, petrol bazlı yakıtlar yüksek miktarda karbondioksit ile SO_x ve NO_x gibi diğer kirleticilerin salınımına da yol açarak iklim değişikliğine ve çevresel bozulmaya neden olmaktadır [2, 3].

Biyokütle doğada bol miktarda bulunan, temiz ve yenilenebilir bir enerji kaynağıdır ve biyokütle enerjisinin geliştirilmesi ve kullanımı dünya çapında giderek artan bir şekilde önem kazanmaktadır [4]. Biyokütle, yakıt ve kimyasalların sağlanmasında fosil yakıt kaynaklarıyla benzerliği nedeniyle umut verici olmasının yanı sıra düşük

Abstract

The aim of this study is to examine the behaviour of melon seed pyrolysis and to calculate its kinetic parameters along with thermodynamic properties. The thermogravimetric analysis experiments were conducted from ambient temperature to 800°C under nitrogen atmosphere at the heating rates of 5, 10, 20 and 40°C/min. It was determined that the pyrolysis process underwent through four stages where the second and third stages were the active pyrolysis stages. Kinetic calculations were carried out using model-free Flynn-Wall-Ozawa, Kissinger-Akahira-Sunose, Starink and model-based Coats-Redfern methods. The apparent activation energy values of the second and third stages were calculated to be in the ranges of 123.9–215.5 and 141.9–234.2 kJ/mol, respectively. The Coats-Redfern method demonstrated that the second and third stages fit the reaction mechanisms of F1.65 and D5, respectively. Moreover, the enthalpy, entropy and Gibbs energy changes of the active pyrolysis stages performed at 10°C/min heating rate were determined using the results calculated from the model-free kinetic methods. The results obtained in the present study will be useful to provide necessary information needed for the design of melon seed pyrolysis processes.

Keywords: Melon seed, Pyrolysis behaviour, Pyrolysis kinetics, Thermodynamic properties

kükürt içeriğine sahip olması ve çevreyle dost olan karbonca nötr bir malzeme olması nedeniyle de önemli bir alternatiftir [5]. Bu nedenle, biyokütle kaynaklı enerji, yakın gelecekte sürdürülebilir kalkınma sağlama potansiyeline sahip en gelecek vadeden yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olarak kabul edilmektedir [6]. Biyokütle kaynakları arasında odun ve odun atıkları, tarımsal ürünler ve bunların atık yan ürünleri, belediye katı atıkları, hayvansal atıklar, gıda işlemeden kaynaklanan atıklar ve su bitkileri ile algler bulunmaktadır [7]. Bunlar arasında gıda atıkları önemli bir yer tutmaktadır [8].

Türkiye, birçok tarım ürününün yetişmesi için uygun bir iklime ve toprak yapısına sahiptir. Bu tarım ürünlerinden biri olan kavun (*Cucumis melo* L.), yüksek ekonomik öneme sahiptir. 2019 yılı verilerine göre kavun Türkiye'de 1777059

ton üretilmiştir ve Türkiye, Çin'den sonra gelen en büyük üretici konumundadır [9]. Üretimin %41 oranla büyük bölümü İç Anadolu Bölgesi'ne yoğunlaşmıştır [10]. Kavun üretiminin miktarıyla orantılı olarak kavun çekirdeği biyokütle atık madde olarak ortaya çıkmaktadır. Kavun çekirdeği (*Citrullus colocynthis* L.) *cucurbitaceae* familyasından *Citrullus* cinsine aittir ve %53 oranında yağ, %28 oranında protein içermektedir [11]. Kavun çekirdeğinden elde edilen yağ, başta evsel tüketim olmak üzere, tıbbi amaçlarla ve biyodizel, sabun, deterjan, margarin üretimi gibi endüstriyel uygulamalarda da kullanılmaktadır [12]. Türkiye'de ise kavun çekirdeği, daha çok atırtırmalık ve sübye olarak tüketilmesinin dışında büyük oranda bitkisel atık olarak kalmaktadır [13, 14]. Bunların yanı sıra, gıda ürünlerinin besin değerini arttırmak ve glutensiz beslenme sağlamak amacıyla, öğütülmüş kavun çekirdeklerinin kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur [8, 15, 16].

Piroliz, bitkisel atıkların biyoyağ, yanıcı gaz ürün ve karbonca zengin biyokömür gibi malzemelere dönüştürülmesi için uygun ısıl bir prosestir [17]. Biyokütlenin ısıl ayrışma kinetiği, biyokütlenin enerjiye ve ürünlere dönüştürülmesine yönelik termokimyasal işlemlerin tasarımında anahtar bir bileşendir [18]. Termogravimetrik analiz (TGA), biyokütle pirolizi için ısıl dönüşüm davranışı ve kinetik modellemeyi belirlemede kullanılan önemli bir tekniktir. Biyokütlenin ısıl dönüşüm sistemlerinin tasarlanması için termogravimetrik analizden elde edilen verilerin kullanılarak kinetiğinin incelenmesi gereklidir. İzotermal olmayan, bir başka deyişle sıcaklığın belirlenen sürelerde artırıldığı koşullarda, termogravimetrik analizden elde edilen veriler, kinetik model bazlı ve model içermeyen yöntemler kullanılarak incelenebilir. Katı hal ısıl bozunma verilerinin analiz edilerek kinetik parametrelerin hesaplanabilmesi için çok sayıda kinetik yöntem geliştirilmiştir [19, 20].

Kavun çekirdeğinin biyoyakıt potansiyeli daha önceki bir çalışmada açıklanmıştır [21]. Yapılan literatür araştırması mevcut çalışmaların kavun çekirdeği kabuğu ile ilgili olduğunu [11, 12, 22]; kavun çekirdeğinin piroliz kinetiği ile ilgili bir çalışmanın ise bulunmadığını ortaya koymuştur. Bu çalışmada, kavun çekirdeklerinin piroliz koşullarında elde edilen termogravimetrik analiz verileri üzerinden kinetik parametrelerinin ve termodinamik özelliklerinin hesaplanması amaçlanmıştır. Bu bağlamda, aktivasyon enerjisi, gerek eş dönüşümlü model içermeyen yöntemler olan Flynn-Wall-Ozawa (FWO), Kissinger-Akahira-Sunose (KAS), Starink yöntemleri, gerekse model içeren yöntem olan Coats-Redfern yöntemi ile hesaplanmış; reaksiyon mekanizması ve pre-eksponansiyel faktör ise Coats-Redfern yöntemi üzerinden belirlenmiştir. İlgili termodinamik eşitlikler kullanılarak termodinamik özellikler de hesaplanmış ve böylece kavun çekirdeğinin piroliz, süreçlerinin tasarlanabilmesi, geliştirilebilmesi ve optimize edilebilmesi için gerekli olan bir aşama tamamlanmıştır.

2 Materyal ve metot

2.1 Materyal

Kavunlar, Yalova'daki yerel bir pazardan temin edilmiştir. Kavun kesildikten sonra çıkarılan çekirdekler

hava ortamında ve güneş altında 2 hafta boyunca ön kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Ön kurutma işlemi takiben öğütülen kavun çekirdekleri eleklerden geçirilerek, 150-250 µm fraksiyon aralığı deneylerde kullanılmak üzere ayrılmıştır. Öğütülen ve istenilen parçacık boyutunda fraksiyona ayrılan çekirdekler daha sonra etüvde 105°C'de 24 saat boyunca son kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Etüvden çıkarılan numuneler desikatörde soğutulduktan sonra cam amber numune şişelerinde saklanmıştır. Elementel ve ısıl değer analizleri, sırasıyla LECO CHNS-932 (ABD) ve IKA C5000 (Almanya) cihazları ile gerçekleştirilmiştir. Kavun çekirdeklerinin elementel analiz, ısıl değer, ASTM E1131-20 ve ASTM D1102-84-2013'e uygun gerçekleştirilen kısa analiz sonuçları Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Kavun çekirdeği ve bazı diğer biyokütle maddelerin kısa, elementel ve ısıl değer analiz sonuçları

	Kavun çek.	Ceviz kabuğu	Antep f. kabuğu	Vişne sapı	Vişne posası	Elma posası	Hurma çek.**
<i>Kısa analiz (% ağı.)</i>							
Nem	6.57	2.57	3.71	10	12.20	8.87	5.45
Uçucu madde	75.44	78.04	77.45	67.12	67.60	81.32	78.59
Kül	1.78	0.64	0.41	2.10	2.80	3.40	2.15
Sabit karbon	16.21*	18.75	18.43	20.78	17.40	6.41	13.81
<i>Elementel analiz (% ağı.)</i>							
C	54.06	48.34	44.62	43.18	41.21	47.98	45.76
H	8.60	6.16	5.81	6.32	6.41	6.65	9.59
O	31.20*	44.78	49.25	49.59	50.71	37.44	44.59
N	5.82	0.69	0.32	0.91	1.67	0.78	0.02
S	0.32	0.03	-	-	-	-	0.04
Üst ısıl değer (MJ/kg)	23.56	17.86	17.40	16.43	15.92	22.42	18.00
Kaynak	Bu çalışma	[23]	[24]	[25]	[25]	[26]	[27]

* Farktan hesaplanmıştır; ** Hint hurması çekirdeği

2.2 Termogravimetrik analiz (TGA)

Kavun çekirdeklerinin izotermal olmayan termogravimetrik analizleri, Yalova Üniversitesi Merkez Laboratuvarı bünyesindeki EXSTAR SII TG/DTA 6300 (Seiko Instruments, Japonya) termogravimetrik analiz cihazında, porselen kroze kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her analiz için 4 mg ± 0.01 mg numune, ortam sıcaklığından 800°C sıcaklığa kadar, 200 mL/dk debideki azot atmosferi altında, dört farklı ısıtma hızında (5, 10, 20 ve 40°C/dk) ısıtılmıştır.

2.3 Kinetik hesaplamalar

Piroliz işlemi sırasında biyoküteller, çar, uçucu madde ve gazlara dönüşürler [28]:

$$\text{Biyokütle} \rightarrow \text{çar} + (\text{uçucu maddeler} + \text{gazlar}) \quad (1)$$

İzotermal olmayan koşullar altında heterojen katı hal kinetik reaksiyonu aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [29]:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T)f(\alpha) \quad (2)$$

Burada, $d\alpha/dt$ piroliz reaksiyonu hızı, $f(\alpha)$ reaksiyon modeli (mekanizması) ve $k(T)$ ise sıcaklığa bağlı reaksiyon hız sabitidir. Arrhenius eşitliği, reaksiyon hız sabitinin sıcaklığa bağlılığını açıklamaktadır:

$$k(T) = Ae^{(-\frac{E_a}{RT})} \quad (3)$$

Burada, A , E_a , R ve T sırasıyla pre-eksponansiyel faktör, görünen aktivasyon enerjisi, gaz sabiti ve mutlak sıcaklıktır. **Denklem (3)**, **Denklem (2)**'de yerine koyulursa, **Denklem (4)** elde edilir:

$$\frac{d\alpha}{dt} = Ae^{(-\frac{E_a}{RT})} f(\alpha) \quad (4)$$

Isıtma hızı, $\beta = dT/dt$, izotermal olmayan koşullar için, **Denklem (4)**'te yerine koyulursa diferansiyel yöntemler için kullanılan genel eşitlik elde edilir.

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{\beta} e^{(-\frac{E_a}{RT})} f(\alpha) \quad (5)$$

Dönüşüm oranı, α , ısı olarak bozulan biyokütle oranını temsil eder ve başlangıç kütlesi (m_i), t zamanındaki kütlesi (m_t) ve son kütle (m_f) değeri cinsinden ifade edilir:

$$\alpha = \frac{m_i - m_t}{m_i - m_f} \quad (6)$$

İntegral yöntemler için kullanılan genel denklem, **Denklem (5)**'in integralinin alınmasıyla elde edilir [30].

$$\begin{aligned} g(\alpha) &= \int_0^\alpha \frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \frac{A}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) dT \\ &= \frac{A}{\beta} \int_0^T \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) dT \\ &= \frac{AE}{\beta R} p(x) \end{aligned} \quad (7)$$

Denklem (7)'nin çözümü için, farklı yaklaşımlar ve basitleştirmeler uygulanmıştır. Bu yaklaşım ve basitleştirmelerin uygulanmasıyla elde edilen ve mevcut çalışmada kullanılan model içermeyen ve model bazlı integral kinetik yöntemler aşağıda verilmektedir.

2.3.1 Model içermeyen kinetik yöntemler

Flynn-Wall-Ozawa (FWO) yöntemi

Denklem (7)'nin geliştirilmesiyle elde edilen FWO yönteminin denklemi aşağıda verilmiştir [31].

$$\ln \beta = \ln \frac{AE_a}{Rg(\alpha)} - 5,331 - 1,052 \frac{E_a}{RT} \quad (8)$$

FWO yönteminde, $1/T$ 'ye karşılık $\ln \beta$ grafiği çizildiğinde, eğimden E_a değeri hesaplanabilir.

Kissinger-Akahira-Sunose (KAS) yöntemi

Model içermeyen diğer bir kinetik yöntem KAS yöntemidir ve denklemi aşağıdaki şekilde tanımlanır [32]:

$$\ln \frac{\beta}{T^2} = \ln \left(\frac{AR}{E_a g(\alpha)} \right) - \frac{E_a}{RT} \quad (9)$$

KAS yöntemi, $1/T$ 'ye karşılık $\ln \beta/T^2$ grafiğindeki doğrusal çizginin eğiminden E_a değerinin hesaplanmasını mümkün kılar.

Starink yöntemi

Starink yönteminin doğrusal denklemi aşağıda verilmiştir [33].

$$\ln \frac{\beta}{T^{1,92}} = -1,0008 \frac{E_a}{RT} + \text{sabit} \quad (10)$$

Starink yönteminde E_a değeri, $1/T$ 'ye karşı $\ln \beta/T^{1,92}$ grafiği çizilerek elde edilen doğrusal çizginin eğiminden hesaplanabilir.

2.3.2 Model bazlı kinetik yöntem

Coats-Redfern yöntemi

Coats-Redfern yöntemi model bazlı bir integral kinetik yöntemidir ve yöntemde kullanılan doğrusal denklem aşağıda verilmiştir [34].

$$\ln \left(\frac{g(\alpha)}{T^2} \right) = \ln \left(\frac{AR}{\beta E_a} \right) - \frac{E_a}{RT} \quad (11)$$

Bu yöntemde, $1/T$ 'ye karşılık çizilen $\ln \left(\frac{g(\alpha)}{T^2} \right)$ grafiklerinde elde edilen doğrunun eğiminden ve kaymindan sırasıyla, E_a ve A değerleri hesaplanabilir. Ancak, **Denklem (11)**'den görüldüğü üzere hesaplanacak değerler $g(\alpha)$ 'ya, dolayısıyla, reaksiyon mekanizmasının seçimine bağlıdır. Katı hal ısıl bozunmasını temsilde kullanılabilen birçok reaksiyon mekanizması ve bu mekanizmaların $g(\alpha)$ ifadeleri **Tablo 2**'de verilmiştir.

2.4 Termodinamik özelliklerin hesaplanması

Entalpi değişimi (ΔH), Entropi değişimi (ΔS) ve Gibbs enerji değişimi (ΔG) değerlerinin hesaplanması amacıyla aşağıdaki denklemler kullanılmıştır [41].

$$A = \beta E_a \exp\left(\frac{E_a}{RT_m}\right) / (RT_m^2) \quad (12)$$

$$\Delta H = E_a - RT \quad (13)$$

$$\Delta G = E_a + RT_m \ln\left(\frac{K_B T_m}{hA}\right) \quad (14)$$

$$\Delta S = \frac{\Delta H - \Delta G}{T_m} \quad (15)$$

Burada:

K_B (Boltzmann sabiti) = 1.381×10^{-23} J/K,

h (Plank sabiti) = 6.626×10^{-34} J.s

T_m : DTG pik sıcaklığıdır.

Tablo 2. Katı hal ısı bozunması reaksiyon mekanizmaları

No	Reaksiyon mekanizması	$g(\alpha)$	Kaynak
<i>n. dereceden kimyasal reaksiyon modelleri</i>			
1	$n=0$ (F0)	α	[35]
2	$n=0.5$ (F0.5)	$2[1 - (1 - \alpha)^{1/2}]$	[36]
3	$n=1$ (F1)	$-\ln(1 - \alpha)$	[35]
4	$n=1.5$ (F1.5)	$2[(1 - \alpha)^{-1/2} - 1]$	[37]
5	$n=2$ (F2)	$(1 - \alpha)^{-1} - 1$	[38]
6	$n=2.5$ (F2.5)	$2/3[(1 - \alpha)^{-3/2} - 1]$	[36]
7	$n=3$ (F3)	$[(1 - \alpha)^{-2} - 1]/2$	[37]
8	$n=3.5$ (F3.5)	$2/5[(1 - \alpha)^{-5/2} - 1]$	[36]
9	$n=4$ (F4)	$[(1 - \alpha)^{-3} - 1]/3$	[36]
<i>Dif. (difüzyon) modelleri</i>			
10	1-B dif. (D1)	α^2	[35]
11	2-B dif. (D2)	$((1 - \alpha) \ln(1 - \alpha)) + \alpha$	[35]
12	3-B dif. (Jander - D3)	$(1 - (1 - \alpha)^{1/3})^2$	[35]
13	3-B dif. (Ginstling-Brounshtein - D4)	$1 - \frac{2}{3}\alpha - (1 - \alpha)^{2/3}$	[38]
14	3-B dif. (Zhuravlev-Lesokhin-Tempelman - D5)	$[(1 - \alpha)^{-1/3} - 1]^2$	[38]
<i>Çekirdeklenme modelleri</i>			
15	Avrami-Erofeev (A1,5)	$[-\ln(1 - \alpha)]^{2/3}$	[39]
16	Avrami-Erofeev (A2)	$[-\ln(1 - \alpha)]^{1/2}$	[37]
17	Avrami-Erofeev (A3)	$[-\ln(1 - \alpha)]^{1/3}$	[37]
18	Avrami-Erofeev (A4)	$[-\ln(1 - \alpha)]^{1/4}$	[37]
19	Prout-Tompkins (B1)	$\ln[\alpha/(1 - \alpha)]$	[39]
20	Üs kanunu (P2/3)	$\alpha^{3/2}$	[37]
21	Üs kanunu (P2)	$\alpha^{1/2}$	[37]
22	Üs kanunu (P3)	$\alpha^{1/3}$	[37]
23	Üs kanunu (P4)	$\alpha^{1/4}$	[40]
24	Eksponent üssü - 1. dereceden (E1)	$\ln \alpha$	[39]
25	Eksponent üssü - 2. dereceden (E2)	$\ln(\alpha^2)$	[39]
<i>Etkileşim geometrisi modelleri</i>			
26	Silindirik sistemde (R2)	$1 - (1 - \alpha)^{1/2}$	[37]
27	Küresel sistemde (R3)	$1 - (1 - \alpha)^{1/3}$	[37]

3 Bulgular ve tartışma

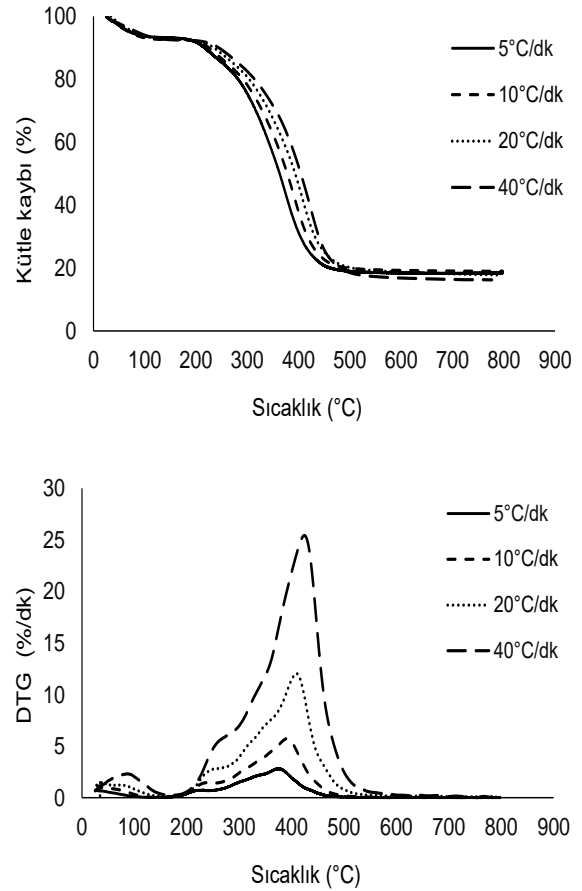
3.1 Kısa, elementel ve ısı değer analizlerinin değerlendirilmesi

Tablo 1’de verilen analiz sonuçları incelendiğinde kavun çekirdeğinin kısa analiz sonuçlarının tablodaki diğer biyokütle maddelerin yaklaşık olarak ortalama değerlerinde olduğu görülebilir. Ancak, diğer taraftan, elementel analiz sonuçları karşılaştırıldığında kavun çekirdeğinin belirgin bir biçimde, en yüksek C, N ve S yüzdelere, hurma çekirdeğinden sonra en yüksek ikinci H yüzdesine ve en düşük oksijen yüzdesine sahip olduğu görülebilir. C, H içeriğinin yüksek O içeriğinin ise düşük olması, gerek kavun çekirdeğinin kendisinin, gerekse kendinden piroliz ile üretilen potansiyel sıvı yakıtların ısı değerinin yüksek olmasına olanak tanıdığından avantaj olarak değerlendirilebilir. Üst ısı değerinin diğer biyokütlelere kıyasla belirgin bir biçimde yüksek olması bu açıklamanın ilk kısmını doğrular niteliktedir. N ve S içeriğinin yüksek olması ise, gerek kavun çekirdeğinin, gerekse ondan elde edilecek yakıtların yakılmasıyla salınacak NO_x ve SO_x

miktarını arttıracığından bir dezavantaj olarak göze çarpmaktadır.

3.2 Termogravimetrik eğrilerin incelenmesi

Termogravimetrik analiz, kullanılan biyokütle numunesinin ısı bozunma özelliklerini ortaya çıkaran termogravimetri (TG) ve türevsel termogravimetri (DTG) eğrilerinden oluşur. TG eğrileri, sıcaklığa bağlı olarak bir numunenin kütle kaybını gösterirken, DTG eğrileri kütle kaybı hızını gösterir. Şekil 1’de 150-250 µm parçacık boyutlarındaki kavun çekirdeğinin 200 mL/dk debide akan azot gazı atmosferinde çevre sıcaklığından 800°C’ye dört farklı ısıtma hızında (5, 10, 20 ve 40°C/dk) elde edilen TG ve DTG eğrileri verilmiştir.



Şekil 1. Kavun çekirdeğinin TG ve DTG eğrileri

Şekil 1, 150-250 µm parçacık büyüklüğündeki kavun çekirdeği numunelerinin farklı ısıtma hızlarındaki ısı bozunma eğrilerinin, ikisi aktif olmak üzere dört farklı piroliz basamağından oluştuğunu göstermektedir. Aktif piroliz basamakları, DTG eğrilerinde görülen piklerle temsil edilen en yüksek kütle kaybı hızlarının gözlemlendiği basamaklardır. Bu basamakların ısı bozunma davranışlarının (karakteristiklerinin) belirlenmesi, bu basamaklara ait kinetik hesaplamaların yapılabilmesine olanak sağlamaktadır.

Şekil 1’de verilen eğrilerden 10°C/dk ısıtma hızı için elde edilen eğriler incelendiğinde, kavun çekirdeği piroliz prosesi ilk basamağının 25-196°C sıcaklık aralığında %7.9 kütle

kayıyla gerçekleştiği tespit edilmiştir. TG eğrisinde ilk basamakta gerçekleşen bu kütle kaybı, nemin ve ayrıca bazı düşük molekül ağırlığına sahip uçucuların uzaklaştırıldığı göstermektedir. Kavun çekirdeği piroliz prosesi ikinci basamağı, 196-258°C sıcaklık aralığında %6.7 kütle kaybıyla gerçekleşmiştir. DTG eğrisinde ikinci basamağa ait pik 232°C sıcaklıkta maksimum gösteren omuz tipi piktir. Bu sıcaklıkta gerçekleşen maksimum kütle kaybı hızı ise 1.4 %/dk olarak ölçülmüştür. Üçüncü basamak, 279-460°C sıcaklık aralığında, %60.6 kütle kaybı oranıyla gerçekleşmiştir. DTG eğrisinde bu basamağa denk gelen pikin maksimum noktası 390°C sıcaklıkta gözlenmiş olup bu sıcaklıkta gerçekleşen maksimum kütle kaybı hızı ise 5.7 %/dk olarak ölçülmüştür. İkinci ve üçüncü basamaklar, gözlenen yüksek kütle kaybı hızları nedeniyle aktif piroliz basamaklarıdır. Biyokütlenin üç temel organik bileşeni olan hemiselüloz, selüloz ve ligninin, sırasıyla 210–325, 310–400 ve 160–900°C sıcaklık aralıklarında ısıl olarak bozdukları bilinmektedir [24]. Bu durumda, ikinci basamakta meydana gelen kütle kaybı esasen hemiselülozun ısıl bozunmasına bağlanabilir. Bu basamak selülozun bilinen ısıl bozunma sıcaklık aralığını kapsamadığından, selülozun bu basamaktaki kütle kaybına belirgin bir katkı sağlamadığı söylenebilir. Selülozun ve hemiselülozun bilinen ısıl bozunma sıcaklık aralıkları (sırasıyla, 310-400°C ve 210-325°C) ile üçüncü basamağın gerçekleştiği sıcaklık aralığı (279-460°C) karşılaştırıldığında, üçüncü basamakta temel olarak selülozun, kısmen de hemiselülozun ısıl bozunmasının gerçekleştiği; ikinci ve üçüncü basamaklardaki kütle kayıpları da göz önüne alındığında kavun çekirdeğinin çoğunluğu selüloz olmak üzere önemli oranda holoselüloz (hemiselüloz + selüloz) içerdiği sonucuna varılabilir. Kavun çekirdeğinin son (dördüncü) piroliz basamağı 460-800 °C sıcaklık aralığında %2.7 kütle kaybıyla gerçekleşmiştir. DTG eğrisine bakıldığında bu basamakta gerçekleşen kütle kaybı hızlarının oldukça düşük olduğu görülebilmektedir. Bu nedenle dördüncü basamak, aktif değil pasif piroliz basamağıdır. Biyokütle maddelerin diğer temel bileşeni olan ligninin ısıl bozunması 160-900 °C sıcaklık aralığında gerçekleştiğinden ve bu basamak sadece ligninin ısıl bozunma sıcaklık aralığı ile örtüştüğünden, dördüncü basamakta karşılaşılan kütle kaybının ligninin ısıl bozunmasından kaynaklandığı söylenebilir. Ayrıca, ligninin TG ve DTG eğrilerinde uzun bir kuyruk şeklinde bozunma karakteristiği sergilemesi de bu basamağın ligninin ısıl bozunmasına dair olduğunu onaylar niteliktedir. Ancak, ligninin ısıl bozunmasının sadece dördüncü basamakta gerçekleşmediğini, aslında ikinci ve üçüncü basamaklarda da bir miktar ligninin diğer temel bileşenler ile eşzamanlı olarak bozduğunu, dolayısıyla, bu bölüm kapsamında piroliz prosesi basamaklarındaki kütle kayıplarının nedenlerine dair yapılan atamaların temel atamalar olduğunu gözden kaçırmamak gerekir. Dördüncü basamak sonunda, bir başka deyişle tüm piroliz prosesi sonunda, kalan kütle miktarı %18.9 olarak belirlenmiştir.

Kinetik parametreleri hesaplayabilmek için gerekli olan aktif piroliz basamaklarına ait karakteristik özellikler çalışılan tüm ısıtma hızlarında (5, 10, 20, ve 40°C/dk) belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar **Tablo 3**'te verilmiştir.

Tablo 3. Kavun çekirdeği aktif piroliz basamaklarının farklı ısıtma hızları için karakteristik özellikleri

Isıtma hızı	5°C/dk		10°C/dk		20°C/dk		40°C/dk	
	II.	III.	II.	III.	II.	III.	II.	III.
T_i^a [°C]	182	261	196	279	203	288	211	300
T_f^b [°C]	240	449	258	460	265	469	272	480
T_{max}^c [°C]	225	375	232	390	240	408	249	423
W_{max}^d [%/dk]	0.7	2.8	1.4	5.7	2.5	12.0	4.6	25.4

^a Başlangıç sıcaklığı; ^b Bitiş sıcaklığı, ^c Maks. kütle kaybı hızının gerçekleştiği sıcaklık; ^d Maks. kütle kaybı hızı

Tablo 3 incelendiğinde, ısıtma hızının ısıl bozunma karakteristik özellikleri üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir. Isıtma hızı arttıkça aktif piroliz basamaklarının T_i , T_f ve T_{max} değerlerinin de artarak daha yüksek sıcaklıklara kaydığı görülmüştür. Bu durum antep fıstığı kabuğu [24], ceviz kabuğu [23], vişne sapı, vişne posası [25], buğday samanı, fındık kabuğu, talaş tozu, kimyasal işlem görmüş talaş tozu [42], kavak [43], mısır sapı, beyaz huş ağacı kıymıkları [44], Hint hurması çekirdeği, Japon sedir ağacı, jüt çubuğu [27] ve elma posası [26] gibi çok çeşitli biyokütle maddelerle yapılan çalışmalarda da gözlenmiş, bilinen bir durumdur. Biyokütle maddeler ısı iletiminde zayıf olduklarından, düşük ısıtma hızları, parçacık iç bölgesindeki ve yüzeyindeki sıcaklıkların yakın değerlerde olması nedeniyle, termokimyasal reaksiyonların tamamlanması için yeterli süre sağlamıştır. Böylece, biyokütle parçacığın iç bölgesi ve yüzeyi neredeyse eş zamanlı olarak ısıl bozunmaya uğramıştır. Ancak, yüksek ısıtma hızlarında bu durumun tam aksine, parçacığın iç bölgesindeki sıcaklıklar bozunma sıcaklıklarına erişememiş ve piroliz reaksiyonlarının gecikmesine neden olarak TG/DTG eğrilerinin daha yüksek sıcaklıklara kaymasına neden olmuştur [45]. **Tablo 3**, ısıtma hızının artmasıyla aktif piroliz basamakları için W_{max} değerlerinin de arttığını göstermektedir. Isıtma hızının artmasıyla piroliz sistemine birim zamanda giren enerji miktarı arttığı için maksimum kütle kaybı hızları artış göstermiştir. 5, 10, 20 ve 40°C/dk ısıtma hızlarında tüm piroliz prosesi sonunda kalan kütle miktarları sırasıyla, %18.4, %18.9, %17.8 ve %16.3 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, çalışılan en yüksek ısıtma hızında dahi, piroliz prosesinin tamamlanması için yeterli sürenin sağlanabildiğini göstermektedir. Ayrıca, 20°C/dk ve üzerindeki ısıtma hızlarında proses sonunda kalan kütle miktarlarında gözlenen hafif düşüş, ısıtma hızının artmasıyla birlikte piroliz prosesinin kısılması sonucu çar oluşumunu arttıran katran parçalanması ve repolimerizasyon gibi ikincil reaksiyonların hafif bir ölçüde engellenmiş olmasına bağlanabilir [46].

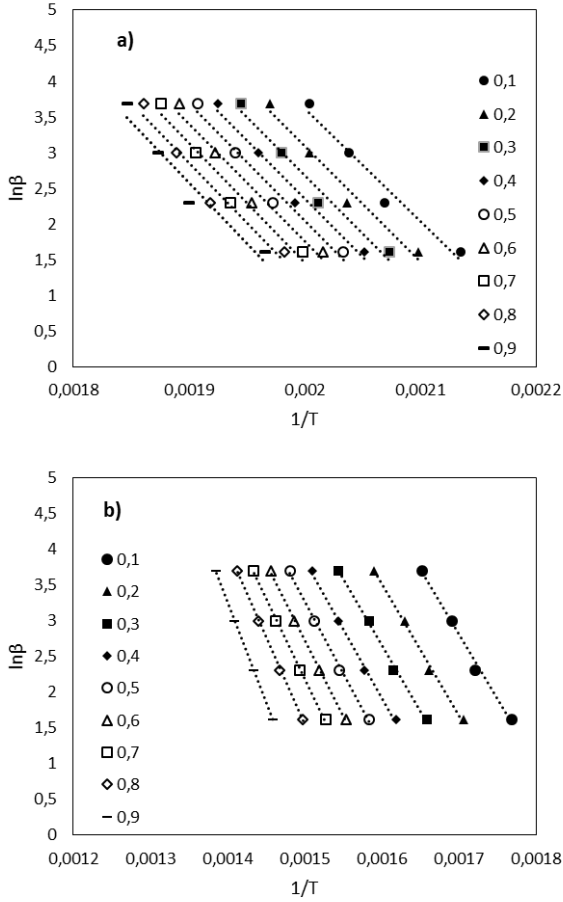
3.3 Kinetik hesaplamalar

Kavun çekirdeğinin izotermal olmayan koşullarda gerçekleştirilen termogravimetrik analizlerinde elde edilen veriler üzerinden yapılan kinetik hesaplamalarda, model içermeyen eş dönüşümlü FWO, KAS, Starink ve model bazlı Coats-Redfern yöntemleri kullanılmıştır.

3.3.1 Model içermeyen kinetik yöntemler

FWO yöntemi

E_a değeri, Denklem (8) kullanılarak, bir reaksiyon modeline gerek duymadan $1/T - \ln \beta$ grafiğinin eğiminden $(-1.052E_a/R)$ hesaplanabilir. Her iki aktif piroliz basamağı için sabit dönüşüm değerlerinde $1/T - \ln \beta$ grafikleri Tablo 3'teki değerlerden faydalanarak çizilmiş (Şekil 2), çizilen grafiklere doğrusal regresyon eşitliği oturtulmuş ve bu regresyon eşitliklerinin eğimlerinden E_a değerleri hesaplanmıştır. Şekil 2'de verilen $1/T - \ln \beta$ grafiklerindeki her bir dönüşüm değeri için elde edilen doğrusal regresyon eşitlikleri, bu eşitliklerin korelasyon katsayıları (R^2) ve eğimlerden hesaplanan E_a değerleri Tablo 4'te verilmiştir.



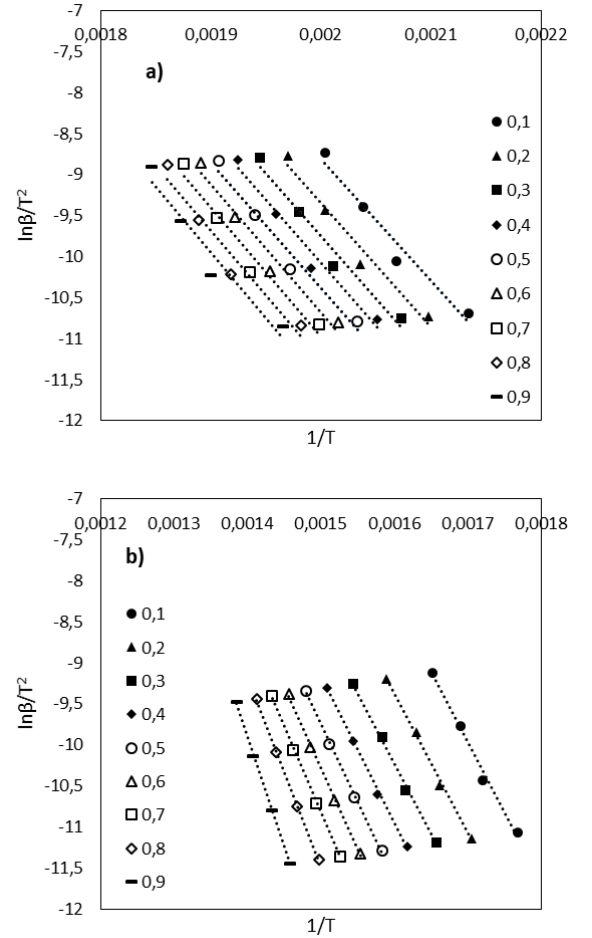
Şekil 2. FWO yöntemi için çizilen $1/T - \ln \beta$ grafikleri
a) ikinci basamak (b) üçüncü basamak

KAS yöntemi

Bu yöntemde E_a değeri, Denklem (9) baz alınarak bir reaksiyon modelinin bilinmesine gerek duyulmadan $1/T - \ln(\beta/T^2)$ grafiğinin eğiminden $(-E_a/R)$ bulunabilir. Şekil 3, aktif piroliz basamakları için sabit dönüşüm değerlerinde çizilen $1/T - \ln(\beta/T^2)$ grafiklerini göstermektedir. Bu grafiklerdeki her bir dönüşüm değeri için elde edilen doğrusal regresyon eşitlikleri, bu eşitliklerin R^2 değerleri ve eğimlerden hesaplanan E_a değerleri Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 4. FWO yöntemi için elde edilen doğrusal regresyon eşitlikleri, bu eşitliklerin R^2 değerleri ve hesaplanan E_a değerleri

	α	R^2	Regresyon eşitliği	E_a (kJ/mol)
İkinci basamak	0.1	0.9655	$y = -15871x + 35.366$	125.4
	0.2	0.9725	$y = -16192x + 35.472$	128.0
	0.3	0.9741	$y = -16279x + 35.248$	128.7
	0.4	0.9754	$y = -16412x + 35.176$	129.7
	0.5	0.9721	$y = -16435x + 34.917$	129.9
	0.6	0.9677	$y = -16552x + 34.860$	130.8
	0.7	0.9614	$y = -16734x + 34.929$	132.2
	0.8	0.9542	$y = -16812x + 34.801$	132.9
	0.9	0.9417	$y = -17029x + 34.943$	134.6
Üçüncü basamak	0.1	0.9929	$y = -18237x + 33.803$	144.1
	0.2	0.9960	$y = -18217x + 32.648$	144.0
	0.3	0.9970	$y = -18460x + 32.187$	145.9
	0.4	0.9974	$y = -19220x + 32.672$	151.9
	0.5	0.9979	$y = -20246x + 33.633$	160.0
	0.6	0.9978	$y = -21303x + 34.679$	168.4
	0.7	0.9990	$y = -22327x + 35.677$	176.5
	0.8	0.9994	$y = -24495x + 38.274$	193.6
	0.9	0.9993	$y = -28315x + 42.898$	223.8



Şekil 3. KAS yöntemi için çizilen $1/T - \ln(\beta/T^2)$ grafikleri
a) ikinci basamak (b) üçüncü basamak

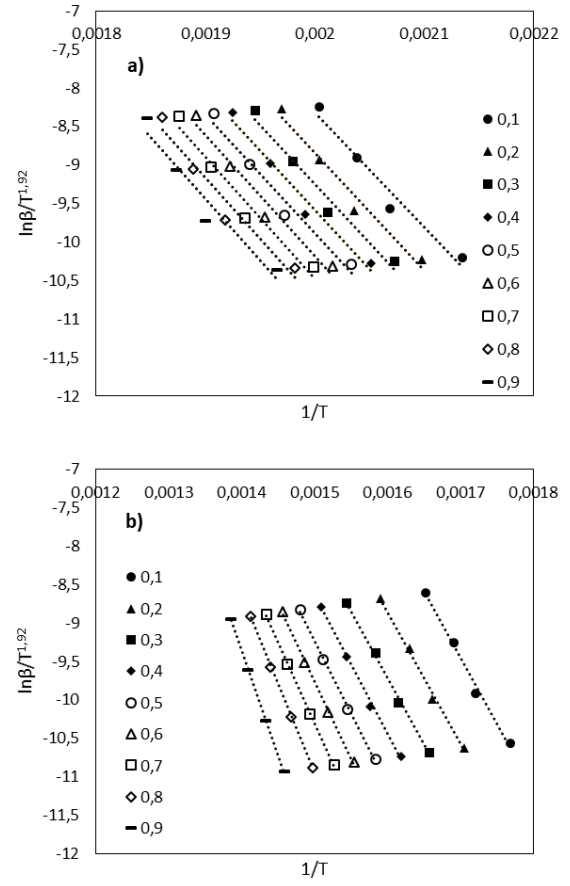
Tablo 5. KAS yöntemi için elde edilen doğrusal regresyon eşitlikleri, bu eşitliklerin R^2 değerleri ve hesaplanan E_a değerleri

	α	R^2	Regresyon eşitliği	E_a (kJ/mol)
İkinci basamak	0.1	0.9613	$y = -14905x + 21.006$	123.9
	0.2	0.9691	$y = -15209x + 21.077$	126.4
	0.3	0.9710	$y = -15284x + 20.828$	127.1
	0.4	0.9723	$y = -15407x + 20.736$	128.1
	0.5	0.9687	$y = -15421x + 20.458$	128.2
	0.6	0.9637	$y = -15529x + 20.384$	129.1
	0.7	0.9566	$y = -15702x + 20.437$	130.5
	0.8	0.9486	$y = -15772x + 20.293$	131.1
	0.9	0.9345	$y = -15981x + 20.420$	132.9
Üçüncü basamak	0.1	0.9920	$y = -17068x + 19.060$	141.9
	0.2	0.9955	$y = -17003x + 17.830$	141.4
	0.3	0.9966	$y = -17211x + 17.312$	143.1
	0.4	0.9971	$y = -17941x + 17.750$	149.2
	0.5	0.9977	$y = -18940x + 18.670$	157.5
	0.6	0.9976	$y = -19974x + 19.681$	166.1
	0.7	0.9989	$y = -20975x + 20.645$	174.4
	0.8	0.9993	$y = -23120x + 23.208$	192.2
	0.9	0.9992	$y = -26909x + 27.786$	223.7

Starink yöntemi

Starink yönteminde E_a değerini hesaplamak için [Denklem \(9\)](#) göz önüne alındığında bir reaksiyon modelinin bilinmesine gerek duyulmadan $1/T - \ln(\beta/T^{1.92})$ grafiğinin eğiminin $(-1,0008E_a/R)$ bulunması yeterlidir. Aktif piroliz basamakları için sabit dönüşüm değerlerinde çizilen $1/T - \ln(\beta/T^{1.92})$ grafikleri [Şekil 4](#)'te verilmiştir. Bu grafiklerdeki her bir dönüşüm değeri için elde edilen doğrusal regresyon eşitlikleri, bu eşitliklerin R^2 değerleri ve eğimlerden hesaplanan E_a değerleri [Tablo 6](#)'da listelenmiştir.

İkinci basamak için FWO, KAS ve Starink yöntemleriyle hesaplanmış ortalama E_a değerleri sırasıyla, 130.2, 128.6 ve 128.8 kJ/mol'dür. Üçüncü basamak için aynı yöntemlerden elde edilen ortalama E_a değerleri ise sırasıyla, 167.6, 165.5 ve 165.8 kJ/mol'dür. Bu sonuçlar göz önüne alındığında, gerek ikinci gerekse üçüncü basamaklar için hesaplanan ortalama E_a değerlerinin oldukça yakın değerler olması nedeniyle, model içermeyen yöntemlerin birbirleriyle uyumlu sonuçlar verdiği söylenebilir. Ayrıca, dikkat edilirse her üç yöntemde de, üçüncü basamak için hesaplanan ortalama E_a değerleri, ikinci basamak için hesaplanan ortalama E_a değerlerinden yüksektir. Bu durum, ikinci basamağın temel olarak hemiselülozun, üçüncü basamağın ise temel olarak selülozun ısıl bozunmasını içermesinden ve selülozun ısıl kararlılığının hemiselülozo göre daha yüksek olduğunun bilinmesinden dolayı, selülozun ısıl bozunma reaksiyonları için daha yüksek enerji gereksinimi olacağı mantığıyla olağan karşılanmıştır.



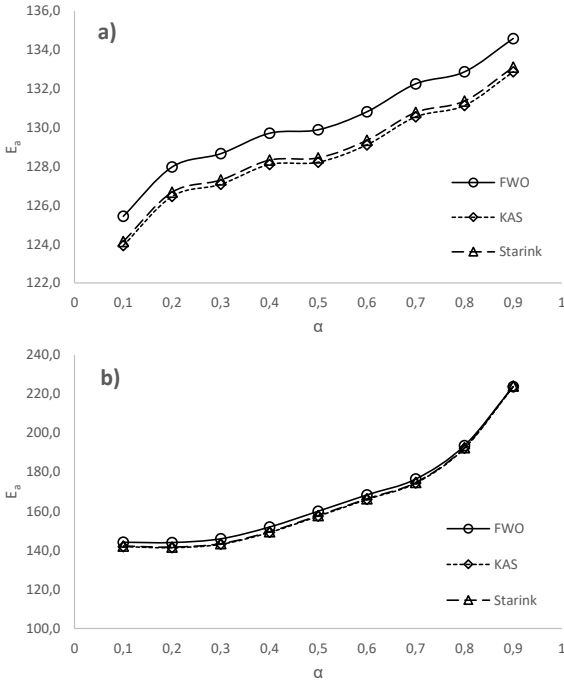
Şekil 4. Starink yöntemi için çizilen $1/T - \ln(\beta/T^{1.92})$ grafikleri a) ikinci basamak (b) üçüncü basamak

Tablo 6. Starink yöntemi için elde edilen doğrusal regresyon eşitlikleri, bu eşitliklerin R^2 değerleri ve hesaplanan E_a değerleri

	α	R^2	Regresyon eşitliği	E_a (kJ/mol)
İkinci basamak	0.1	0.9615	$y = -14943x + 21.580$	124.1
	0.2	0.9693	$y = -15248x + 21.653$	126.7
	0.3	0.9711	$y = -15324x + 21.405$	127.3
	0.4	0.9725	$y = -15447x + 21.313$	128.3
	0.5	0.9688	$y = -15461x + 21.037$	128.4
	0.6	0.9639	$y = -15570x + 20.963$	129.3
	0.7	0.9568	$y = -15743x + 21.016$	130.8
	0.8	0.9488	$y = -15813x + 20.873$	131.4
	0.9	0.9349	$y = -16023x + 21.001$	133.1
Üçüncü basamak	0.1	0.9920	$y = -17115x + 19.650$	142.2
	0.2	0.9955	$y = -17051x + 18.423$	141.6
	0.3	0.9966	$y = -17260x + 17.907$	143.4
	0.4	0.9971	$y = -17992x + 18.347$	149.5
	0.5	0.9977	$y = -18993x + 19.269$	157.8
	0.6	0.9976	$y = -20027x + 20.280$	166.4
	0.7	0.9989	$y = -21029x + 21.246$	174.7
	0.8	0.9993	$y = -23175x + 23.811$	192.5
	0.9	0.9992	$y = -26965x + 28.391$	224.0

Bu çalışmanın sonuçları, E_a değerinin α değerine bağlı olarak değiştiğini göstermiştir (Şekil 5). Örneğin, ikinci basamak için $E_a - \alpha$ ilişkisi incelendiğinde (Şekil 5a), FWO, KAS ve Starink yöntemlerinin tümünde, α değerinin artmasıyla E_a değerinin de hafif artışlar göstererek yaklaşık olarak 124-134 kJ/mol gibi nispeten dar bir aralıkta değiştiği görülebilir. Üçüncü basamakta da, tüm model içermeyen kinetik yöntemlerde, E_a değeri α değerine bağlı olarak değişmiştir (Şekil 5b). Ancak, bu kez değişim ikinci basamağın aksine çok daha geniş bir aralıkta (140-225 kJ/mol değerleri arasında) ve değişken eğimlere sahip üç farklı bölgede olacak şekilde gerçekleşmiştir. Üçüncü basamakta, $0,1 \leq \alpha < 0,3$ için E_a değeri hemen hemen 140-145 kJ/mol değer aralığında neredeyse sabit seyretmiştir. $0,3 \leq \alpha < 0,7$ aralığında, α 'nın artmasıyla E_a değeri de artarak 145-175 kJ/mol aralığında değerler almıştır. $0,7 < \alpha < 0,9$ aralığında ise, E_a değeri α değerinin artmasıyla çok daha keskin artışlar göstermiş ve 175-225 kJ/mol arasında değişmiştir. Üçüncü basamakta tüm model içermeyen yöntemlerde $\alpha = 0,9$ değerinde gözlenen yüksek E_a değerleri, çar ara ürünlerinin stabilize edilmesi için yüksek enerji ihtiyacının varlığını işaret etmektedir [47].

Şekil 5'te dikkat çeken bir diğer durum, ikinci basamaktaki FWO sonuçları hariç, tüm yöntemlerle elde edilen $E_a - \alpha$ ilişkisi grafiklerinin üst üste çakışmasıdır. Bu durum, model içermeyen yöntemlerde edilen sonuçların birbirleriyle son derece uyumlu olduğunu göstermektedir. FWO, KAS ve Starink yöntemleri aynı genel forma sahip yöntemlerdir. Bu genel form, $\ln(\beta/T^b) = \text{Sabit} - C(E/(RT))$ eşitliği şeklindedir ve belirtilen üç yöntem için B ve C katsayıları değişmektedir [48]. Bu nedenle, bu yöntemlerden benzer sonuçların elde edilmesi beklenen bir sonuçtur.

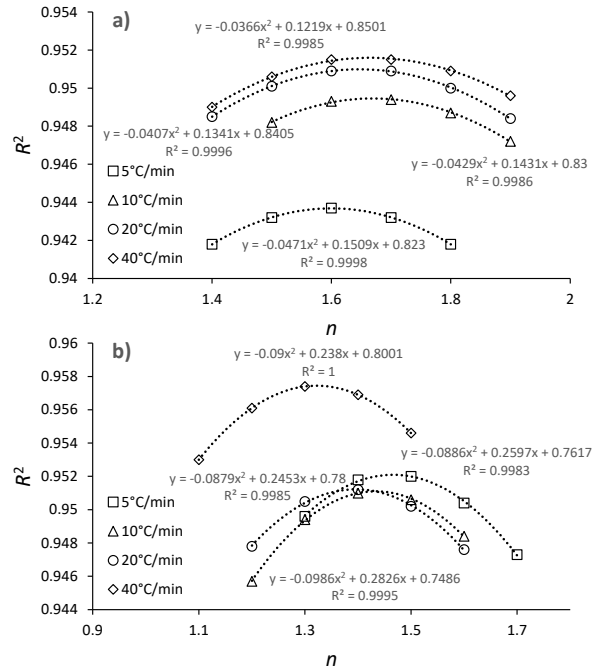


Şekil 5. FWO, KAS ve Starink yöntemleri için $E_a - \alpha$ ilişkisi a) ikinci basamak b) üçüncü basamak

3.3.2 Model bazlı kinetik yöntem

Coats-Redfern yöntemi

Denklem (11)'e göre E_a ve A değerleri $1/T$ 'ye karşılık çizilen $\ln\left(\frac{g(\alpha)}{T^2}\right)$ grafiklerinde elde edilen doğrunun sırasıyla, eğiminden ve kayımından hesaplanabilir. Hesaplanacak değerler $g(\alpha)$ 'ya, yani, reaksiyon mekanizmasının seçimine bağlıdır. Bu nedenle, Tablo 2'deki 27 farklı reaksiyon mekanizmasına ait $g(\alpha)$ değerleri kullanılarak aktif piroliz basamakları için, çalışılan ısıtma hızlarında $1/T - \ln\left(\frac{g(\alpha)}{T^2}\right)$ grafikleri çizilmiştir. Bu grafiklere doğrusal regresyon eşitlikleri oturtulmuş ve bu eşitliklerin R^2 değerleri hesaplanmıştır. $1/T - \ln\left(\frac{g(\alpha)}{T^2}\right)$ grafiklerinin doğru çıkması gerektiğinden denenen reaksiyon mekanizmalarından en yüksek R^2 değerini sağlayanın belirlenmesi yöntemi izlenmiştir. Farklı reaksiyon mekanizmaları ile elde edilen $1/T - \ln\left(\frac{g(\alpha)}{T^2}\right)$ grafiklerine oturtulan doğrusal regresyon eşitliklerinin R^2 değerleri ve bu eşitliklerin eğimlerinden hesaplanan E_a değerleri sırasıyla Tablo 7 ve 8'de verilmiştir. Tablo 2'de verilen reaksiyon mekanizmalarına ek olarak, en yüksek R^2 değerine sahip reaksiyon derecesi (n) değerinin, bir başka deyişle, kimyasal reaksiyon modelleri arasında en yüksek R^2 değerini veren n değerinin tam olarak bulunması amacıyla, Tablo 2'de verilen kimyasal reaksiyon modelleri arasında en yüksek R^2 değerine sahip n değerine yakın çeşitli n değerleri seçilerek $R^2 - n$ grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 6). Bu grafiklere Şekil 6'daki yüksek R^2 değerlerinden de görüldüğü gibi güvenilir olarak ikinci dereceden polinom eşitlikleri oturtulmuştur. En yüksek R^2 değerine sahip n değeri ikinci dereceden polinomun tepe noktası olduğundan, polinom eşitliğinin diferansiyeli alınıp sıfıra eşitlenerek bu değer bulunmuş ve Tablo 2'de verilen reaksiyon mekanizmalarına ek olarak Tablo 7 ve 8'e eklenmiştir.



Şekil 6. Coats-Redfern yöntemi için oluşturulan $R^2 - n$ grafikleri a) ikinci basamak b) üçüncü basamak

Tablo 7. Coats-Redfern yöntemi ile kavun çekirdeği aktif piroliz basamakları için çalışılan ısıtma hızlarında ve denenen reaksiyon mekanizmalarında oturtulan regresyon eşitliklerinin R^2 değerleri

No	Reaksiyon Mekanizması	R^2							
		5°C/dk		10°C/dk		20°C/dk		40°C/dk	
		II. ^a	III. ^b	II.	III.	II.	III.	II.	III.
1	F0	0.8483	0.7918	0.8464	0.7948	0.8581	0.8149	0.8651	0.8402
2	F0.5	0.8910	0.8671	0.8909	0.8701	0.8992	0.8834	0.9035	0.9024
3	F1.0	0.9264	0.9304	0.9282	0.9318	0.9332	0.9365	0.9348	0.9472
4	F1.322	-	-	-	-	-	-	-	0.9574
5	F1.395	-	-	-	-	-	0.9512	-	-
6	F1.433	-	-	-	0.9510	-	-	-	-
7	F1.466	-	0.9521	-	-	-	-	-	-
8	F1.5	0.9432	0.9520	0.9482	0.9506	0.9501	0.9502	0.9506	0.9546
9	F1.602	0.9437	-	-	-	-	-	-	-
10	F1.647	-	-	-	-	0.9510	-	-	-
11	F1.665	-	-	-	-	-	-	0.9516	-
12	F1.668	-	-	0.9495	-	-	-	-	-
13	F2	0.9369	0.9316	0.9450	0.9274	0.9462	0.9258	0.9477	0.9258
14	F2.5	0.9156	0.8970	0.9263	0.8912	0.9278	0.8890	0.9311	0.8864
15	F3	0.8889	0.8641	0.9017	0.8578	0.9036	0.8546	0.9084	0.8504
16	F3.5	0.8626	0.8372	0.8770	0.8308	0.8790	0.8263	0.8847	0.8212
17	F4	0.8389	0.8159	0.8545	0.8097	0.8564	0.8041	0.8625	0.7982
18	D1	0.8559	0.8201	0.8543	0.8215	0.8655	0.8391	0.8719	0.8609
19	D2	0.8810	0.8586	0.8802	0.8603	0.8898	0.8748	0.8948	0.8935
20	D3	0.9087	0.9045	0.9094	0.9062	0.9166	0.9155	0.9203	0.9300
21	D4	0.8909	0.8751	0.8907	0.8769	0.8992	0.8896	0.9035	0.9070
22	D5	0.9427	0.9554	0.9466	0.9548	0.9491	0.9555	0.9496	0.9612
23	A1.5	0.9230	0.9209	0.9248	0.9231	0.9300	0.9284	0.9317	0.9407
24	A2	0.9194	0.9096	0.9211	0.9128	0.9265	0.9189	0.9284	0.9331
25	A3	0.9114	0.8792	0.9130	0.8857	0.9188	0.8936	0.9212	0.9131
26	A4	0.9021	0.8329	0.9036	0.8453	0.9099	0.8561	0.9128	0.8835
27	B1 ^c	0.6383	0.6765	0.6522	0.6750	0.6399	0.6675	0.6269	0.6642
28	P2/3	0.8534	0.8113	0.8517	0.8132	0.8631	0.8316	0.8697	0.8544
29	P2	0.8315	0.7157	0.8287	0.7237	0.8416	0.7503	0.8498	0.7849
30	P3	0.8119	0.6025	0.8082	0.6193	0.8223	0.6542	0.8320	0.7020
31	P4	0.7892	0.4382	0.7842	0.4687	0.7997	0.5122	0.8113	0.5767
32	E1 ^d	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
33	E2 ^d	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
34	R2	0.8910	0.8671	0.8909	0.8701	0.8992	0.8834	0.9035	0.9024
35	R3	0.9043	0.8910	0.9048	0.8936	0.9124	0.9041	0.9164	0.9208

^a İkinci basamak; ^b Üçüncü basamak; ^c B1 sonuçları $\alpha < 0.5$ için "tanımsız" olan $\ln(g(\alpha)/T^2)$ değerlerinden etkilenmiştir;

^d E1, E2 yöntemleri $0.1 \leq \alpha \leq 0.9$ için $\ln(g(\alpha)/T^2)$ değerleri "tanımsız" olduğundan uygulanamamıştır.

Tablo 7'den görülebileceği üzere aktif piroliz basamaklarında genel olarak en yüksek R^2 değerleri belirgin bir biçimde F1.5 civarında ve D5 mekanizmalarında elde edilmiştir. İkinci basamak için en yüksek R^2 değeri, çalışılan tüm ısıtma hızlarında ~F1.5 civarında elde edilmiştir. R^2-n grafiklerinden (Şekil 6a), ikinci basamak için en yüksek R^2 değerlerinin gözlemlendiği tam reaksiyon dereceleri 5, 10, 20 ve 40°C/dk ısıtma hızlarında sırasıyla, 1.602, 1.668, 1.647 ve 1.665 olarak bulunmuştur. Bu değerlerin ortalaması alınarak, ikinci bölgedeki reaksiyon derecesinin ortalama olarak 1.65 ve reaksiyon mekanizmasının F1.65 olduğu tespit edilmiştir. Üçüncü basamak için yine R^2-n grafiklerinden (Şekil 6b) en yüksek R^2 değerlerinin gözlemlendiği tam reaksiyon dereceleri hesaplanmış (5, 10, 20 ve 40°C/dk ısıtma hızlarında sırasıyla 1.466, 1.433, 1.395 ve 1.322) ancak, D5 reaksiyon mekanizması için hesaplanan R^2 değerlerinin çalışılan tüm ısıtma hızlarında bu değerlerden de yüksek olduğu

belirlenmiştir. Bu nedenle, üçüncü basamağın reaksiyon mekanizması çalışılan tüm ısıtma hızlarında denenen reaksiyon mekanizmaları arasında en yüksek R^2 değerine sahip olan D5 difüzyon modelidir. Dikkat edilirse, gerek ikinci gerekse üçüncü basamakta reaksiyon mekanizması çalışılan tüm ısıtma hızlarında aynıdır. Bundan dolayı, reaksiyon mekanizmasının çalışılan ısıtma hızından bağımsız olduğu sonucuna ulaşılabilir.

E_a değerlerinin tüm çalışılan ısıtma hızlarında reaksiyon mekanizmasına bağlı değişimi, yani, E_a 'nın seçilen reaksiyon mekanizmasının kuvvetli bir fonksiyonu olduğu açıkça görülmektedir (Tablo 8). İkinci basamakta 5, 10, 20 ve 40°C/dk'daki F1.602, F1.668, F1.647 ve F1.665 reaksiyon mekanizmaları için E_a değerleri sırasıyla, 201.8, 208.0, 207.0 ve 215.5 kJ/mol (Tablo 8) olarak hesaplanmıştır.

Tablo 8. Coats-Redfern yöntemi ile kavun çekirdeği aktif piroliz basamakları için çalışılan ısıtma hızlarında ve denenen reaksiyon mekanizmalarında oturtulan regresyon eşitliklerinin eğimlerinden hesaplanan E_a değerleri

No	Reaksiyon Mekanizması	E_a (kJ/mol)							
		5°C/dk		10°C/dk		20°C/dk		40°C/dk	
		II. ^a	III. ^b	II.	III.	II.	III.	II.	III.
1	F0	135.6	58.2	136.1	62.4	138.1	64.8	145.4	69.0
2	F0.5	151.5	68.8	152.3	74.0	154.4	76.3	162.2	81.0
3	F1.0	171.5	83.7	173.3	90.4	174.4	92.2	182.2	97.8
4	F1.322	-	-	-	-	-	-	-	111.1
5	F1.395	-	-	-	-	-	108.4	-	-
6	F1.433	-	-	-	109.2	-	-	-	-
7	F1.466	-	102.3	-	-	-	-	-	-
8	F1.5	196.2	103.8	198.4	112.5	198.9	113.2	206.6	119.6
9	F1.602	201.8	-	-	-	-	-	-	-
10	F1.647	-	-	-	-	207.0	-	-	-
11	F1.665	-	-	-	-	-	-	215.5	-
12	F1.668	-	-	208.0	-	-	-	-	-
13	F2	225.1	128.2	228.2	139.4	227.5	138.7	234.7	146.1
14	F2.5	257.3	155.5	261.3	169.5	259.3	167.2	266.0	175.8
15	F3	291.7	184.5	296.8	201.5	293.4	197.6	299.6	207.6
16	F3.5	327.9	214.8	334.2	234.9	329.2	229.4	334.9	240.6
17	F4	365.3	246.0	372.8	269.3	366.3	262.0	371.5	274.7
18	D1	279.3	126.8	280.4	135.4	284.6	140.4	299.3	148.9
19	D2	298.4	139.0	300.0	148.7	304.5	153.6	320.2	162.8
20	D3	323.3	156.8	325.7	168.3	329.5	172.7	345.5	182.8
21	D4	306.5	144.7	308.3	155.0	312.7	159.7	328.5	169.2
22	D5	383.0	203.5	387.1	219.6	389.0	222.0	404.5	234.2
23	A1.5	111.7	52.4	112.8	56.8	113.5	57.9	118.7	61.6
24	A2	81.7	36.7	82.5	39.9	83.0	40.8	86.9	43.5
25	A3	51.8	21.0	52.2	23.1	52.5	23.6	55.1	25.3
26	A4	36.9	13.2	37.1	14.7	37.3	15.0	39.2	16.3
27	B1 ^c	-565.3	-313.3	-580.0	-341.7	-587.0	-350.4	-604.0	-364.2
28	P2/3	207.4	92.5	208.2	98.9	211.3	102.6	222.4	109.0
29	P2	63.8	24.0	63.9	25.9	64.8	27.0	68.4	29.0
30	P3	39.9	12.5	39.8	13.8	40.4	14.5	42.7	15.7
31	P4	27.9	6.8	27.8	7.7	28.1	8.2	29.9	9.1
32	E1 ^d	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
33	E2 ^d	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
34	R2	151.5	68.8	152.3	74.0	154.4	76.3	162.2	81.0
35	R3	157.6	73.3	158.7	78.8	160.6	81.0	168.5	85.9

^a İkinci basamak; ^b Üçüncü basamak; ^c B1 sonuçları $\alpha < 0.5$ için "tanımsız" olan $\ln(g(\alpha)/T^2)$ değerlerinden etkilenmiştir;

^d E1, E2 yöntemleri $0.1 \leq \alpha < 0.9$ için $\ln(g(\alpha)/T^2)$ değerleri "tanımsız" olduğundan uygulanamamıştır.

Bu değerlerin ortalaması olarak F1.65 reaksiyon mekanizması için ortalama E_a değeri 208.1 kJ/mol olarak belirlenmiştir. Bu basamaktaki F1.602, F1.668, F1.647 ve F1.665 reaksiyon mekanizmaları için hesaplanan A değerleri ise sırasıyla, $1.3408E+21$, $2.5029E+21$, $1.7895E+21$ ve $1.1802E+22$ dk^{-1} 'dir. Bu değerlerin ortalaması olarak F1.65 reaksiyon mekanizması için ortalama A değeri $5.9133E+21$ dk^{-1} 'dir. Üçüncü basamakta 5, 10, 20 ve 40°C/dk ısıtma hızlarındaki D5 reaksiyon mekanizmaları için hesaplanan E_a değerleri sırasıyla, 203.5, 219.6, 222.0 ve 234.2 kJ/mol (Tablo 8) olup, bu değerlerin ortalaması 219.8 kJ/mol'dür. Yine üçüncü basamakta, yukarıda belirtilen ısıtma hızlarında hesaplanan A değerleri sırasıyla $1.5559E+15$, $2.7095E+16$, $3.8102E+16$ ve $3.1045E+17$ dk^{-1} olup, D5 reaksiyon mekanizması için hesaplanan ortalama A değeri $9.4301E+16$ dk^{-1} olmuştur.

Coats-Redfern yöntemiyle elde edilen ortalama E_a değerleri, model içermeyen yöntemlerden elde edilen ortalama E_a değerleri ile kıyaslandığında, Coats-Redfern sonuçlarının ikinci ve üçüncü basamaklar için sırasıyla ortalama ~%61 ve ~%32 daha yüksek olduğu görülmektedir. Kinetik yöntemlerde kullanılan denklemlerin türetilmesi esnasında farklı yaklaşım ve sadeleştirmeler uygulandığından sonuçların farklılık göstermesi beklenmektedir, ancak yine de, özellikle ikinci basamak için hesaplanan farkın oldukça yüksek olması dikkat çekmektedir. Coats-Redfern yöntemiyle elde edilen üçüncü basamak ortalama E_a değeri, model içermeyen yöntemlerde olduğu gibi, ikinci basamak ortalama E_a değerinden büyüktür ve Bölüm 3.3.1'de yapılan açıklama burada da geçerlidir.

Tablo 9. 10°C/dk ısıtma hızında FWO, KAS ve Starink yöntemlerinden elde edilen E_a değerleri kullanılarak hesaplanan termodinamik özellikler

α	FWO				KAS				Starink				
	A (1/dk)	ΔH (kJ/mol)	ΔG (kJ/mol)	ΔS J/(mol,K)	A (1/dk)	ΔH (kJ/mol)	ΔG (kJ/mol)	ΔS J/(mol,K)	A (1/dk)	ΔH (kJ/mol)	ΔG (kJ/mol)	ΔS J/(mol,K)	
İkinci basamak	0.1	5.5E+12	121.4	128.1	-13.3	3.8E+12	119.9	128.2	-16.4	4.0E+12	120.1	128.2	-16.0
	0.2	1.0E+13	123.9	128.1	-8.3	7.1E+12	122.4	128.1	-11.4	7.5E+12	122.6	128.1	-10.9
	0.3	1.2E+13	124.5	128.0	-7.0	8.3E+12	122.9	128.1	-10.2	8.8E+12	123.2	128.1	-9.7
	0.4	1.6E+13	125.5	128.0	-4.9	1.1E+13	123.9	128.1	-8.2	1.1E+13	124.1	128.0	-7.7
	0.5	1.7E+13	125.7	128.0	-4.6	1.1E+13	124.0	128.0	-8.0	1.2E+13	124.2	128.0	-7.6
	0.6	2.1E+13	126.6	128.0	-2.8	1.4E+13	124.9	128.0	-6.3	1.4E+13	125.1	128.0	-5.8
	0.7	3.0E+13	128.0	127.9	0.1	1.9E+13	126.3	128.0	-3.4	2.1E+13	126.5	128.0	-2.9
	0.8	3.4E+13	128.5	127.9	1.3	2.2E+13	126.8	128.0	-2.3	2.4E+13	127.0	127.9	-1.8
	0.9	5.2E+13	130.2	127.8	4.7	3.4E+13	128.5	127.9	1.2	3.6E+13	128.7	127.9	1.7
Üçüncü basamak	0.1	8.9E+10	139.3	172.0	-49.2	5.8E+10	137.1	172.0	-52.7	6.2E+10	137.3	172.0	-52.3
	0.2	8.6E+10	139.0	172.0	-49.8	5.3E+10	136.4	172.1	-53.8	5.6E+10	136.6	172.0	-53.4
	0.3	1.2E+11	140.7	171.9	-47.0	7.3E+10	137.9	172.0	-51.3	7.7E+10	138.2	172.0	-50.9
	0.4	3.8E+11	146.6	171.7	-37.8	2.3E+11	143.9	171.8	-42.0	2.4E+11	144.2	171.8	-41.6
	0.5	1.8E+12	154.6	171.4	-25.3	1.1E+12	152.1	171.5	-29.2	1.2E+12	152.4	171.5	-28.7
	0.6	8.4E+12	162.9	171.1	-12.4	5.5E+12	160.6	171.2	-16.0	5.8E+12	160.9	171.2	-15.5
	0.7	3.8E+13	170.9	170.8	0.1	2.6E+13	168.8	170.9	-3.1	2.8E+13	169.1	170.9	-2.7
	0.8	9.4E+14	187.9	170.3	26.5	7.3E+14	186.6	170.4	24.4	7.7E+14	186.9	170.4	24.9
	0.9	2.6E+17	218.0	169.5	73.1	2.6E+17	217.9	169.5	73.0	2.7E+17	218.2	169.5	73.4

Bu çalışmada, FWO, KAS, Starink ve Coats-Redfern yöntemleriyle kavun çekirdeklerinin ikinci ve üçüncü aktif piroliz basamakları için hesaplanan E_a değerleri sırasıyla, 123.9 – 215.5 ve 141.9 – 234.2 kJ/mol aralıklarındadır. Aktif piroliz basamaklarında temel olarak ısıl bozunmaya uğrayan bileşenler hemiselüloz ve selülozdur. Bu bileşenler için önceki çalışmalarda hesaplanmış E_a değerleri ise sırasıyla, 34 – 179 ve 114 – 288 kJ/mol aralığındadır. Ayrıca, benzer şekilde lignin için hesaplanan E_a değerlerinin 7-226 kJ/mol değerleri arasında olduğu bilinmektedir [49]. Bu nedenle, mevcut çalışmada hesaplanan E_a değerlerinin, biyokütleli oluşturan temel bileşenlerin E_a değerleriyle uyumlu değerlerde olduğu belirlenmiştir.

3.4 Termodinamik özelliklerin hesaplanması

Kavun çekirdeğinin 10°C/dk ısıtma hızındaki termogravimetrik piroliz prosesi için termodinamik özellikler (ΔH , ΔG ve ΔS) FWO, KAS ve Starink yöntemleriyle her iki aktif piroliz basamağı için de 0.1-0.9 aralığındaki dönüşüm değerlerinde belirlenen E_a değerleri üzerinden Denklem (12-15) kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 9’da verilmiştir. Aktif piroliz basamakları için üç yöntemle hesaplanan termodinamik özellik değerlerinin birbiriyle uyumlu olduğu bu tablodan görülebilmektedir.

Entalpi, bir sistemin toplam ısı içeriğini gösteren termodinamik özelliktir. Aktif piroliz basamakları için hesaplanan tüm ΔH değerleri pozitifdir ve bu durum piroliz reaksiyonlarının ısı alarak gerçekleştiğini yani endotermik olduğunu belirtmektedir. Her iki basamakta da dönüşüm arttıkça ΔH değerlerinin artış göstermesi, piroliz prosesi ilerledikçe ısı girdisinin, yani endotermikliğin arttığını belirtmektedir. Ayrıca, literatürde [50] dönüşüm değerlerindeki E_a ve ΔH farklarının düşük olmasının

aktifleşmiş kompleks oluşumunu desteklediği raporlanmıştır. Bu çalışmada, tüm model içermeyen yöntemlere dayalı yapılan hesaplamalarda ikinci ve üçüncü basamaklar için bu fark, 4.0 – 4.4 ve 4.8 – 5.8 kJ/mol değerleri arasındadır. Farkın düşük olması, reaktanların ürüne daha kolay dönüştürüleceğini ifade etmektedir [51].

Gibbs (serbest) enerjisi, dengeyi ya da bir reaksiyonun belirli bir yönde ilerleme eğilimini tanımlamaya yarayan termodinamik özelliktir. İkinci ve üçüncü basamaklar için hesaplanan tüm ΔG değerleri, sıfırdan oldukça büyük pozitif değerlerdir. Bu durumda, her iki basamaktaki piroliz reaksiyonlarının spontane bir biçimde gerçekleşmeyeceğini, reaksiyonların gerçekleşmesi için enerji girdisine ihtiyaç olduğunu işaret etmektedir. Yüksek ΔG değeri, reaksiyona daha düşük elverişliliği ve prosesi sürdürmek için daha fazla enerji gerektiği anlamına gelir [52]. Aktif piroliz basamakları için tüm yöntemlerle hesaplanan ΔG değerlerinin dönüşüm arttıkça çok az düşüşler göstermişse de, hemen hemen sabit kaldığı söylenebilir. Bu da, dönüşüm arttıkça reaksiyonların gerçekleşmesi için gerekli enerji girdisinde belirgin bir değişim olmadığına işaret etmektedir.

Entropi, bir sistemde düzensizliğin ölçüsünü, moleküler düzeyde olası farklı parçacık ve enerji konumlandırma düzenlemelerinin çeşitliliğini ifade eden termodinamik özelliktir. Aktif piroliz basamakları için tüm yöntemlerle hesaplanan ΔS değerleri yaklaşık olarak $\alpha \leq 0.7-0.9$ değerleri için negatif, daha yüksek dönüşüm değerlerinde ise pozitif değerler almıştır. ΔS 'in negatif değerleri piroliz esnasında bağların kopmasıyla oluşan ürünlerdeki düzensizliğin başlangıçtaki reaktanların düzensizliğine göre daha düşük olduğunu göstermektedir [50]. Negatif ΔS değerlerinin, ısıl dengenin sağlandığını ve ısıl olarak kararlı bir ürünün üretildiğini gösterdiği [53]; yüksek ΔS değerlerinin ise, termodinamik dengeden uzakta olduğunu ve reaktifliğin

yüksek olduğunu gösterdiği belirtilmektedir [41]. Bu bağlamda, özellikle üçüncü bölgenin $\alpha = 0.8 - 0.9$ değerlerinde entropi değişiminin büyük değerlere sahip olması henüz termodinamik dengenin sağlanmadığını işaret etmektedir. Bu durum, Bölüm 3.3.1'de, üçüncü basamakta tüm model içermeyen yöntemlerde $\alpha = 0.9$ değerinde gözlenen yüksek E_a değerlerinin, çar ara ürünlerinin stabilize edilmesi için yüksek enerji ihtiyacının varlığını işaret ettiği şeklinde yapılan yorumla paralel niteliktedir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, kavun çekirdeklerinin pirolizi izotermal olmayan termogravimetrik analiz yöntemiyle çalışılmıştır. Çalışmalar, piroliz prosesinin nem ve düşük molekül ağırlıklı moleküllerin uzaklaştırıldığı birinci basamak; sırasıyla, temel olarak hemiselüloz, hemiselüloz + selüloz ve ligninin ısıl bozunmaya uğradığı ikinci, üçüncü ve dördüncü basamaklar olmak üzere dört basamaktan oluştuğunu göstermiştir. Aktif piroliz basamakları en yüksek kütle kaybı hızlarının gözlemlendiği ikinci ve üçüncü basamaklardır. Aktif piroliz basamakları $\sim 460^\circ\text{C}$ 'de sonlanmaktadır ve bu sıcaklıkta uçucu madde olarak, birinci basamak hariç, ~ 67.3 kütle kaybı gerçekleşmiştir.

Kavun çekirdeklerinin çoğu biyokütle maddeye kıyasla, daha yüksek C ve H içeriğine ve belirgin bir biçimde düşük O içeriğine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durum, özellikle sıvı yakıt üretimini hedefleyen piroliz prosesleri açısından önemli bir avantaj olarak yorumlanabilir. Ancak, diğer taraftan özellikle N içeriğinin birçok biyokütle maddeye göre belirgin bir biçimde yüksek olması çevresel açıdan dezavantaj oluşturma potansiyeline sahiptir.

Aktif piroliz basamaklarının kinetik parametreleri model içermeyen FWO, KAS, Starink ve model bazlı Coats-Redfern kinetik yöntemleriyle hesaplanmıştır. Bulunan aktivasyon enerjisi değerleri kavun çekirdeklerinin temel organik bileşenleri olan hemiselüloz, selüloz ve ligninin literatürde rapor edilmiş olan değer aralıklarına denk düşmektedir. Coats-Redfern yöntemi kapsamında yapılan hesaplamalar, ikinci ve üçüncü basamaklardaki reaksiyon mekanizmalarının sırasıyla, F1.65 ve D5 olduğunu göstermiştir. Ayrıca, model içermeyen kinetik yöntemlerde elde edilen sonuçlar kullanılarak entalpi, entropi ve Gibbs enerji değişimleri de hesaplanmıştır. Kavun çekirdekleri piroliz prosesi ile değerli ve sürdürülebilir enerji kaynağı olarak değerlendirilme potansiyeline sahiptir ve bu çalışmanın sonuçları, kavun çekirdeği piroliz proseslerinin tasarlanmasına katkı sağlayarak faydalı olacaktır.

Teşekkür

Yazarlar, kavun çekirdeklerinin öğütülmesi ve fraksiyonlanmasındaki yardımları için Prof. Dr. Aysel Kantürk Figen ve Doç. Dr. Eren Figen'e teşekkürlerini sunar.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

[1] C. A. Bermúdez, J. Porteiro, L. G. Varela, S. Chapela and D. Patiño, Three-dimensional CFD simulation of a

- large-scale grate-fired biomass furnace. Fuel Processing Technology, 198, 106219, 1-15, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106219>
- [2] S. Y. Kan, B. Chen, X. F. Wu, Z. M. Chen and G. Q. Chen, Natural gas overview for world economy: From primary supply to final demand via global supply chains. Energy Policy, 124, 215-225, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.10.002>
- [3] J. Hu, B. Jiang, J. Wang, Y. Qiao, T. Zuo, Y. Sun and X. Jiang, Physicochemical characteristics and pyrolysis performance of corn stalk torrefied in aqueous ammonia by microwave heating. Bioresource Technology, 274, 83-88, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.11.076>
- [4] Q. Zhang, Q. Li, L. Zhang, Z. Yu, X. Jing, Z. Wang, Y. Fang and W. Huang, Experimental study on co-pyrolysis and gasification of biomass with deoiled asphalt. Energy, 134, 301-310, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.157>
- [5] K. Li, L. Zhang, L. Zhu and X. Zhu, Comparative study on pyrolysis of lignocellulosic and algal biomass using pyrolysis-gas chromatography/mass spectrometry. Bioresource Technology, 234, 48-52, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.014>
- [6] S. Sobek and S. Werl., Kinetic modelling of waste wood devolatilization during pyrolysis based on thermogravimetric data and solar pyrolysis reactor performance. Fuel, 261, 116459, 1-15, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116459>
- [7] G. Mishra, J. Kumar and T. Bhaskar. Kinetic studies on the pyrolysis of pinewood. Bioresource Technology, 182, 282-288, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.087>
- [8] N. Ertaş and M. Aslan, A study on the potential of using melon wastes in biscuit production. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Tarım ve Doğa Dergisi, 23 (5), 1216-1224, 2020. <https://doi.org/10.18016/ksutarimdog.vi.681812>
- [9] FAO, Food and Agriculture Organization of United Nations, FAOSTAT, Crops, Cherries. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Accessed: 21 January 2021.
- [10] M. Ünlü, R. Kurum ve A. Ünlü, Örtüaltı kavun (*Cucumis melo* ssp. *melo*) yetiştiriciliği için geliştirilen hibritlerin verim ve meyve bakımından değerlendirilmesi. Akademik Ziraat Dergisi, 6, 121-126, 2017. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/azd/issue/32275/363353>
- [11] A. Ahmed, E. A. Afolabi, M. U. Garba, U. Musa, M. Alhassan and K. Ishaq, Effect of particle size on thermal decomposition and devolatilization kinetics of melon seed shell. Chemical Engineering Communications, 206(9), 1228-1240, 2019. <https://doi.org/10.1080/00986445.2018.1555530>
- [12] B. B. Nyakuma, F. Roozbahani, O. Oladokun, Y. A. Dodo, A. S. Elnafaty and T. John-Paul Ivase, Kinetic analysis of melon seed husk using non-isothermal thermogravimetric analysis. Materials Today:

- Proceedings, 5, 11(2), 23249-23257, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.11.057>
- [13] Ş. Bayram and E. Güneş, Nutrients and cucurbita eaten from the seed. International Journal of Environmental Pollution and Environmental Modelling, 3 (1), 27-33, 2020. <https://dergipark.org.tr/pub/ijepem/issue/54371/789209>
- [14] S. Sabancı, C. Celebi and F. Icier, Rheological properties of sübye. traditional beverage. Akademik Gıda, 12 (1), 11-15, 2014. <https://dergipark.org.tr/download/article-file/1186530>
- [15] İ. Çelik ve Y. Kuzumoğlu, Farklı tane unları ve çekirdek tozları kullanılarak glutensiz lokma tatlısı üretimi ve kalite özellikleri. Akademik Gıda, 18 (2), 156-163, 2020. <https://dergipark.org.tr/pub/akademik-gida/issue/55310/758828>
- [16] İ. Çelik ve K. Pozan, Kavun çekirdeği tozunun eriştinin bazı özelliklerine etkisi. Gıda, 45 (5), 907-916, 2020. <https://dergipark.org.tr/pub/gida/issue/56397/700627>
- [17] T. Xu, F. Xu, Z. Hu, Z. Chen and B. Xiao, Non-isothermal kinetics of biomass-pyrolysis-derived-tar (BPDT) thermal decomposition via thermogravimetric analysis. Energy Conversion and Management, 138, 452-460, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.013>
- [18] Th. Damartzis, D. Vamvuka, S. Sfakiotakis and A. Zabaniotou, Thermal degradation studies and kinetic modeling of cardoon (*Cynara cardunculus*) pyrolysis using thermogravimetric analysis (TGA). Bioresource Technology, 102, 6230-6238, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.02.060>
- [19] A. A. Jain, A. Mehra and V. V. Ranade, Processing of TGA data: Analysis of isoconversional and model fitting methods. Fuel, 165, 490-498, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.10.042>
- [20] G. Chen, S. He, Z. Cheng, Y. Guan, B. Yan, W. Ma and D. Y. C. Leung, Comparison of kinetic analysis methods in thermal decomposition of cattle manure by thermogravimetric analysis. Bioresource Technology, 243, 69-77, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.007>
- [21] S. O. Giwa and T. O. Akanbi, A review on food uses and the prospect of egusi melon for biodiesel production. Bioenergy Research, 13, 1031-1045, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10145-4>
- [22] B. B. Nyakuma, Thermogravimetric and kinetic analysis of melon (*Citrullus colocynthis* L.) seed husk using the distributed activation energy model. Environmental and Climate Technologies, 15 (1), 77-89, 2015. <https://doi.org/10.1515/rtuect-2015-0007>
- [23] K. Açıklın, Thermogravimetric analysis of walnut shell as pyrolysis feedstock. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 105, 145-150, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10973-010-1267-x>
- [24] K. Açıklın, Pyrolytic characteristics and kinetics of pistachio shell by thermogravimetric analysis. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 109, 227-235, 2012. <https://doi.org/10.1007/s10973-011-1714-3>
- [25] G. Gözke and K. Açıklın, Pyrolysis characteristics and kinetics of sour cherry stalk and flesh via thermogravimetric analysis using isoconversional methods. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-10055-9>
- [26] M. R. B. Guerrero, M. M. d.S. Paula, M. M. Zaragoza, J. S. Gutiérrez, V. G. Velderrain, A. L. Ortiz and V. Collins-Martínez, Thermogravimetric study on the pyrolysis kinetics of apple pomace as waste biomass. International Journal of Hydrogen Energy, 39, 16619-16627, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.06.012>
- [27] S. S. Tuly, M. Parveen, M. R. Islam, M. S. Rahman and H. Haniu, Pyrolysis kinetics study of three biomass solid wastes for thermochemical conversion into liquid fuels. AIP Conference Proceedings, 1851, 020083, 2017. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4984712>
- [28] C. Gai, Y. Dong and T. Zhang, The kinetic analysis of the pyrolysis of agricultural residue under non-isothermal conditions. Bioresource Technology, 127, 298-305, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.089>
- [29] W. Gao, K. Chen, J. Zeng, J. Xu and B. Wang, Thermal pyrolysis characteristics of macroalgae *Cladophora glomerata*. Bioresource Technology, 243, 212-217, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.041>
- [30] M. J. B. Fong, A. C. M. Loy, B. L. F. Chin, M. K. Lam, S. Yusup and Z. A. Jawad, Catalytic pyrolysis of *Chlorella vulgaris*: Kinetic and Thermodynamic analysis. Bioresource Technology, 289, 121689, 1-10, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121689>
- [31] L. Luo, X. Guo, Z. Zhang, M. Chai, M. Rahman, X. Zhang and J. Cai, Insight into pyrolysis kinetics of lignocellulosic biomass: isoconversional kinetic analysis by the modified friedman method. Energy Fuels, 34 (4), 4874-4881, 2020. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c00275>
- [32] Q. V. Bach and W. H. Chen, Pyrolysis characteristics and kinetics of microalgae via thermogravimetric analysis (TGA): A state-of-the-art review. Bioresource Technology, 246, 88-100, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.087>
- [33] H. Huang, J. Liu, H. Liu, F. Evrendilek and M. Buyukada, Pyrolysis of water hyacinth biomass parts: Bioenergy. gas emissions. and by-products using TG-FTIR and Py-GS/MS analyses. Energy Conversion and Management, 207, 112552, 1-14, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112552>
- [34] M. A. Mehmood, M. S. Ahmad, Q. Liu, C. G. Liu, M. H. Tahir, A. A. Aloqbi, N. I. Tarbiah, H. M. Alsufiani and M. Gull, *Helianthus tuberosus* as a promising feedstock for bioenergy and chemicals appraised through pyrolysis. kinetics. and TG-FTIR-MS based study. Energy Conversion and Management, 194, 37-45, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.04.076>
- [35] G. Ye, H. Luo, Z. Ren, M. S. Ahmad, C. G. Liu, A. Tawab, A. B. Al-Ghafari, U. Omar, M. Gull and M. A. Mehmood, Evaluating the bioenergy potential of

- Chinese liquor-industry waste through pyrolysis. thermogravimetric. kinetics and evolved gas analyses. *Energy Conversion and Management*, 163, 13-21, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.049>
- [36] Y. He, C. Chang, P. Li, X. Han, H. Li, S. Fang, J. Chen and X. Ma, Thermal decomposition and kinetics of coal and fermented cornstalk using thermogravimetric analysis. *Bioresource Technology*, 259, 294-303, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.03.043>
- [37] Y. Qiao, B. Wang, P. Zong, Y. Tian, F. Xu, D. Li, F. Li and Y. Tian, Thermal behavior, kinetics and fast pyrolysis characteristics of palm oil: Analytical TG-FTIR and Py-GC/MS study. *Energy Conversion and Management*, 199, 111964, 1-10, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111964>
- [38] M. Jeguirim, J. Bikai, Y. Elmay, L. Limousy and E. Njeugna, Thermal characterization and pyrolysis kinetics of tropical biomass feedstocks for energy recovery. *Energy for Sustainable Development*, 23, 188-193, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2014.09.009>
- [39] D. Trache, A. Abdelaziz and B. Siouani, A simple and linear isoconversional method to determine the pre-exponential factors and the mathematical reaction mechanism functions. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 128, 335-348, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10973-016-5962-0>
- [40] S. Vyazovkin, *Isoconversional Kinetics of Thermally Stimulated Processes*. Springer International Publishing, Switzerland, 2015.
- [41] A. A. D. Maia and L. C. De Moraes, Kinetic parameters of red pepper waste as biomass to solid biofuel. *Bioresource Technology*, 204, 157-163, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.12.055>
- [42] M. Radojević, B. Janković, V. Jovanović, D. Stojiljković and N. Manić. Comparative pyrolysis kinetics of various biomasses based on model-free and DAEM approaches improved with numerical optimization procedure. *PLoS ONE*, 13(10), e0206657, 1-25, 2018. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206657>
- [43] F. Rego, A. P. S. Dias, M. Casquilho, F. C. Rosa and A. Rodrigues. Pyrolysis kinetics of short rotation coppice poplar biomass. *Energy*, 207, 118191, 1-9, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118191>
- [44] M. Zhai, L. Guo, Y. Zhang, P. Dong, G. Qi and Y. Huang, Kinetic parameters of biomass pyrolysis by TGA. *BioResources*, 11(4), 8548-8557, 2016. <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/kinetic-parameters-of-biomass-pyrolysis-by-tga/>
- [45] J. Zhang, J. Liu, F. Evrendilek, X. Zhang and M. Buyukada, TG-FTIR and Py-GC/MS analyses of pyrolysis behaviors and products of cattle manure in CO₂ and N₂ atmospheres: Kinetic. thermodynamic. and machine-learning models. *Energy Conversion and Management*, 195, 346-359, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.019>
- [46] Y. Qiao, B. Wang, Y. Ji, F. Xu, P. Zong, J. Zhang and Y. Tian, Thermal decomposition of castor oil. corn starch. soy protein. lignin. xylan. and cellulose during fast pyrolysis. *Bioresource Technology*, 278, 287-295, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.102>
- [47] Y. M. Kim, J. Jae, H. W. Lee, T. U. Han, H. Lee, S. H. Park, S. Kim, C. Watanabe and Y. -K. Park, Ex-situ catalytic pyrolysis of citrus fruit peels over mesoporous MFI and Al-MCM-41. *Energy Conversion and Management*, 125, 277-289, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.065>
- [48] S. Vyazovkin, A. K. Burnham, J. M. Criado, L. A. Pérez-Naqueda, C. Popescu and N. Sbirrazzuoli, ICTAC Kinetics Committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data. *Thermochimica Acta*, 520, 1-19, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2011.03.034>
- [49] A. Anca-Couce, C. Tsekos, S. Retschitzegger, F. Zimbardi, A. Funke, S. Banks, T. Kraia, P. Marques, R. Scharler, W. de Jong and N. Kienzl, Biomass pyrolysis TGA assessment with an international round robin. *Fuel*, 276, 118002, 1-16, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118002>
- [50] R. Kaur, P. Gera, M. K. Jha and T. Bhaskar, Pyrolysis kinetics and thermodynamic parameters of castor (*Ricinus communis*) residue using thermogravimetric analysis. *Bioresource Technology*, 250, 422-428, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.11.077>
- [51] X. Xu, R. Pan, P. Li and R. Chen, Kinetics. thermodynamics and volatile products of Camphorwood pyrolysis in inert atmosphere. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 191, 1605-1623, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12010-020-03300-2>
- [52] J. Huang, J. Liu, J. Chen, W. Xie, J. Kuo, X. Lu, K. Chang, S. Wen, G. Sun, H. Cai, M. Buyukada and F. Evrendilek, Combustion behaviors of spent mushroom substrate using TG-MS and TG-FTIR: Thermal conversion. kinetic. thermodynamic and emission analyses. *Bioresource Technology*, 266, 389-397, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.06.106>
- [53] A. Shahid, M. Ishfaq, M. S. Ahmad, S. Malik, M. Farooq, Z. Hui, A. H. Batawi, M. E. Shafi, A. A. Aloqbi, M. Gull and M. A. Mehmood, Bioenergy potential of the residual microalgal biomass produced in city wastewater assessed through pyrolysis, kinetics and thermodynamics study to design algal biorefinery. *Bioresource Technology*, 289, 121701, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121701>





Garp linyitleri işletmesi (GLİ) Tunçbilek göletlerinde bulunan tesis artıklarının karakterizasyonu

Characterization of the waste materials in the ponds of western lignite company (WLC) at Tunçbilek

Nezahat Ediz^{1,*}, Sevgi Karaca², Oktay Şahbaz³, İ. Göktay Ediz⁴, Ali Uçar⁵

^{1,2,3,4,5} Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 43000, Kütahya, Türkiye

Özet

Bu çalışmada, Garp Linyitleri İşletmesi (GLİ)'ne ait şlam göletlerinde bulunan malzemelerin değerlendirilebilirliğinin belirlenmesi ve çevresel sorunlarının önlenmesi için karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. Yapılan deneyler ile 4 No'lu, Beke-Yörgüç ve 6/C şlam göletlerindeki malzemelerin tane boyut dağılımları, fiziksel, kimyasal (elementel, nem, kül, kükürt, ısı değeri), mineralojik ve termal özellikleri belirlenmiştir. Bu testler hem göletlerdeki malzemelerin orijinal boyutlarında hem de 0.038 mm altındaki boyutlarda yapılmıştır. Elementel analizlerde hem orijinal hem de 0.038 mm altındaki gölet malzemelerindeki majör oksitlerin SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, K₂O ve SO₃ olduğu belirlenmiştir. 4 No'lu, Beke-Yörgüç ve 6/C göletlerinin kül içerikleri sırasıyla %68.01, %62.73 ve %59.71 olarak belirlenmiştir. Orijinal ve 0.038 mm altı malzemelerin mineralojik analizleri sonucunda tüm numunelerin kuvars, muskovit/illit, montmorillonit, kristobalit, jips, kaolinit minerallerinden oluştuğu tespit edilmiştir. DTA-TG analizlerine göre ise tüm malzemelerde, 200-400°C arasında organik maddelerin yanma reaksiyonlarının meydana geldiği, 690-750°C arasında ise kömürdeki kükürdün uzaklaştığı belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Karakterizasyon, Kömür, Şlam göleti

1 Giriş

Organik tortul kayaç olan kömür, çoğunlukla minerallerden oluşan inorganik maddeleri ve maseral yapıdaki yanıcı organik maddeleri içerir. Kömür belirli düzeylerde heterojendir. En basit düzeyde, organik ve inorganik fazların bir karışımıdır, ancak kömürün mineral maddesi, oluştuğu bitkinin inorganik bileşenlerinden, diğer organik maddelerden ve kömür yatağına taşınan farklı yapı ve serbestleşme karakteri olan inorganik bileşenlerden meydana gelmiştir [1].

Kömür hazırlama, ham kömürden safsızlıkların (inorganik madde) içeriğini azaltarak değerini yükseltir. Kömür hazırlama işlemleri sırasında kül yapıcı maddeler kömürden tamamen uzaklaştırılmaz, ancak daha düşük inorganik madde içeriğine sahip olan kısım, daha yüksek inorganik madde içeriğine sahip olan kısımdan ayrılır [1].

Abstract

In this research, some characterization studies were carried on the samples taken from the waste ponds of Western Lignite Company (WLC) in order to define utilization possibilities and prevent environmental problems of these materials. During the investigation, particle size distribution, physical and chemical properties (elemental analysis, humidity and sulphur content and calorific value) as well as mineralogical and thermal properties of the materials from the waste ponds called Number-4, Beke Yörgüç and 6/C were determined. From the elemental analysis of waste materials made both on the original samples and on the materials below 0.038 mm, it was understood that major oxides were comprised of SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, K₂O and SO₃. The ash content of the waste materials was found to be 68.01%, 62.73% and 59.71% for the waste ponds of Number-4, Beke Yörgüç and 6/C, respectively. Mineralogical analysis made showed that both the original samples and the materials below 0.038 mm were comprised of minerals such as quartz, muscovite/illite, montmorillonite, kristobalite, gypsum, kaolinite. DTA-TG analysis also proved that combustion reactions of the organic matters were occurred at 200-400°C while sulphur within the coal was removed at the temperatures of 690-750°C.

Keywords: Characterization, Coal, Slime pond

Kömür yıkama yöntemleri iri ve ince boyutlu kömürler için farklıdır. İri ve orta boyutlar için gravite yöntemleri, ince boyutlar için ise genelde flotasyon yöntemi uygulanır [2, 3]. Kömür hazırlamada ince kömür deyiimi 0.5 mm'nin altındaki boyutlar için kullanılırken, (-6+0.5) (-10+0.5) ya da (-18+0.5) mm orta boy ve 6, 10 veya 18 mm'nin üstü ise iri kömür olarak adlandırılır. Kömür yıkama işlemleri tane boyutu yanında kül, kükürt ve nem içeriği gibi etmenlere göre de değişir [4].

Maden ve kömürlerden gang minerallerinin uzaklaştırılması için kurulan cevher hazırlama ve kömür yıkama tesislerinden çıkan atıklar, depolama ve yer sorunu ortaya çıkarmakta ve zamanla çevreye zarar vermektedirler [5]. Kömür endüstrisinin çevreye etkileri madenlerden kömür çıkarma, kömür hazırlama işlemleri, kömür nakliyatı, kömür yakma, atık depolama ve atık bertarafı gibi çeşitli

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: nezahat.ediz@dpu.edu.tr (N. Ediz)

Geliş / Received: 19.11.2020 Kabul / Accepted: 04.03.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.826789

aşamalarda görülsede, bu etkileri başlıca iki ana grupta incelemek mümkündür.

1. Kömür madenciliği sırasında oluşan çevresel etkiler: Kömür madenciliği; toprak örtüsünün bozulmasına, yüzey ve yeraltı suları ile içme suyu kaynaklarının kirlenmesine, su ve toprak habitatlarının bozulmasına ve hava kalitesinin olumsuz etkilenmesine neden olan bir faaliyettir.
2. Kömür yıkama (lavvar) ve hazırlama sırasında oluşan çevresel etkiler: Kömür yıkama faaliyetleri sonucu ortaya çıkan artıklardır. Bu artıklardan iri taneli olanlar (coarse tailings) genellikle açıkta yığınlar halinde depolanırken, daha sulu ve ince taneli olanlar atık barajlarına sevk edilmekte veya filtrelenmektedir. Bu artıklar doğal olarak radyoaktif maddeler de içerirler. Ayrıca pirit içermeleri halinde asidik su oluşumuna yol açabilirler. Ayrıca kömür hazırlamada flotasyon ve flokülasyon aşamalarında çeşitli kimyasallar kullanıldığı takdirde, bu atıklarda çevre için sakıncalı olabilecek kirleticiler de bulunabilmektedir.

Sulu ve ince taneli artıklar kimyasal ve zararlı metal içermeleri, ince taneli olmaları, asit maden drenajına neden olmaları, büyük miktarlarda olmaları nedeniyle çok fazla yer işgal etmeleri ve görsel kirlilik yaratmaları nedenleri ile çevre bilincinin her geçen gün arttığı dünyada ve ülkemizde bu atıkların bertaraf edilmesi önemli bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır.

1993 yılında devreye alınan ve GLİ tarafından işletilen Ömerler ile ülkemizin en eski lavvarlarından biri olan ve özel sektör tarafından işletilen Tunçbilek Lavvarları'nda da uygulanan gravite prosesleri sırasında bu artıklar oluşmaktadır. Ayrıca tesislerin civarlarında daha önceki yıllarda bu artıkların depolandığı iki adet havuz ve iki adet de (4 No'lu ve Beke-Yörgüç Şlam göletleri) açık ocak deposu bulunmaktadır. Tesislerden halen başka bir açık ocak imalat sahasına (6/C) artık şarjı devam etmektedir. GLİ'ye ait göletlerde şimdiye kadar 20 milyon ton şlam birikmiştir ve bu iki lavvardan halen yılda 2.5 milyon m³ şlam birikmeye devam etmektedir [6].

Kömür yıkama tesisi atıkları ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, çalışmaların genellikle sulu atıklardan kömürün kazanılmasına ve bu atıkların susuzlandırılmasına yönelik olduğu dikkat çekmektedir [7-14].

Kömür yıkama atıklarının değerlendirilmesi ile ilgili yapılmış sınırlı kalmıştır. Sabah [15] Tunçbilek kömür hazırlama tesisi atığının tuğla bünyelerde kullanılabilirliğini araştırdığı çalışmada, referans tuğla kiline farklı oranlarda kömür atığı karıştırmış ve farklı sıcaklıklarda sinterleyerek elde ettiği tuğla bünyelere çeşitli performans testleri uygulamıştır. Deneyler sonucunda 950°C'de sinterlenen, %2.5 kömür atığı katkılı tuğlaların basınç dayanımlarının gözenekliliğinin yüksek olduğu, dolayısıyla hafif yapı elemanı olarak kullanılabilirliğini tespit etmiştir.

İnce [16] GLİ Tunçbilek üretim sahasında 4 No'lu ocak imalat boşluğunda bulunan lavvar atığını (-0.038 µm) tuğla kiline katkı maddesi olarak kullanmıştır. Tuğla kiline farklı oranlarda ilave edilen atık malzeme ile elde edilen bünyeler, farklı sıcaklıklarda sinterlenmiş ve çeşitli testlere tabi

tutulmuştur. Deneyler sonucunda 1050°C sıcaklıkta sinterlenmiş ve %50 kömür atığı katkılı olan tuğla bünye ile optimum değerler elde edilmiştir.

Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu tarafından desteklenen ve proje yürütücülüğü TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü tarafından gerçekleştirilen çalışmada, kömür yıkama faaliyetleri sonucu oluşan şlam atıklarının alternatif bir hammadde olarak tuğla ve çimento sektöründe değerlendirilebileceği belirtilmiştir [17].

Bu çalışmada, GLİ bünyesinde faaliyet gösteren Lavvar tesislerinin kurulumundan günümüze kadar ortaya çıkan ve değerlendirilebilecek durumda olan tesis artıklarının karakterizasyonu yapılmıştır. Böylece, çevre sorunlarına neden olan bu malzemelerin değerlendirilebilirliğine ışık tutulacaktır.

2 Materyal ve metot

Deneylerde kullanılan malzemeler GLİ İşletmesi'ne ait 4 No'lu, Beke-Yörgüç ve 6/C olarak adlandırılan artık göletlerinden alınmıştır (Şekil 1). Artık sahalarından işletme tarafından alınan bu malzemeler DPÜ Maden Mühendisliği Bölüm Laboratuvarına getirilmiş ve ayrı ayrı karıştırılarak homojenize edilmiştir. Yaklaşık olarak 400 kg (4 No'lu), 150 kg (Beke-Yörgüç) ve 150 kg (6/C) olan malzemeler, numune bölme işlemleri ile bölünerek deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere depolanmıştır.



Şekil 1. 4 Nolu, Beke-Yörgüç ve 6/C şlam göletleri ve Tunçbilek Lavvarı konumları

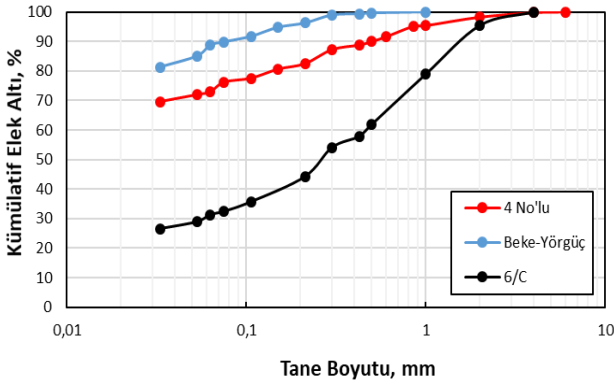
Karakterizasyon çalışmalarında, hem orijinal hem de organik maddelerin daha az bulunduğu 0.038 mm altındaki boyutlarda olan malzeme kullanılmıştır. Bu malzemelerin tane boyut, kimyasal (elementel, nem, kül, kükürt, ısı değer), mineralojik ve termal analizleri yapılmıştır. Göletlerden alınan numunelerin tane boyut analizleri Retsch marka eleklerle, elek dizisi olarak Tyler serisi ve işletmede kullanılan elek açıklıkları baz alınarak yapılmıştır. -0.038 mm numunelerin tane boyut analizleri ise Malvern marka Mastersizer 3000 cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Malzemelerin elementel analizleri PANalytical marka Axios max model XRF cihazı ile yapılmıştır. Nem değerleri Moisture Analyzer AND ML-50 cihazında ölçülmüştür. Kül analizleri Nüve marka kül fırınında, kükürt analizi Leco SC 144 DR cihazında ve kalori ölçümleri IKA WERKE cihazında gerçekleştirilmiştir. Numunelerin mineralojik

analizleri PANalytical marka ve Empyrean model XRD cihazı ile Cu K α ($\lambda=1.54\text{\AA}$) ışınması kullanılarak $2\theta=5-70^\circ$ aralığında $2^\circ/\text{dk}$ çekim hızında yapılmıştır. Numunelerin ısı davranışlarının belirlenmesinde ise SETERAM marka, labsys model TG-DTA cihazı kullanılmıştır. Ölçümler argon gazı ortamında kuru havada $35-1000^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığında $10^\circ\text{C}/\text{dk}$ ısıtma hızında yapılmıştır.

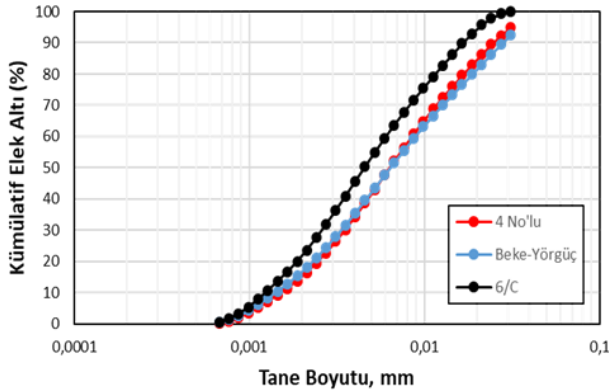
3 Bulgular ve tartışma

3.1 Tane boyut analizi

Göletlerden alınan orijinal boyutlardaki numunelerin boyut fraksiyonlarına göre madde miktarı dağılımını belirlemek amacıyla elek analizi çalışmaları yapılmış ve sonuçlar Şekil 2’de verilmiştir. 0.038 mm ’den ince numunelerin tane boyut analiz sonuçları ise Şekil 3’de verilmiştir. Ayrıca 0.038 mm altı numunelerin d_{10} , d_{50} ve d_{90} değerleri Tablo 1’de özetlenmiştir.



Şekil 2. Orijinal boyutlu malzemelerin tane boyut dağılımları



Şekil 3. 0.038 mm altı malzemelerin tane boyut dağılımları

Şekil 2 incelendiğinde gölet numunelerinin oldukça farklı tane boyut dağılımına sahip olduğu görülmektedir. Örneğin 4 No’lu gölet için en büyük tane boyutu 4 mm , Beke-Yörgüç göleti için 0.5 mm ve 6/C göleti için 2 mm olarak belirlenmiştir. Şekil 3 incelendiğinde ise -0.038 mm malzeme oranının da her gölet için az da olsa farklılık gösterdiği görülmektedir.

Tablo 1. 0.038 mm altı malzemelerin d_{10} , d_{50} ve d_{90} tane boyut (mm) değerleri

Gölet	d_{10}	d_{50}	d_{90}
4 No’lu	0.00152	0.00634	0.0247
Beke-Yörgüç	0.00141	0.00639	0.0280
6/C	0.00125	0.00455	0.0166

Tablo 1’deki verilerden de, 6/C gölet numunesinin 0.038 mm altındaki kısmının daha ince ve daha dar tane boyut dağılımına sahip olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu verilerden elde edilen sonuçlar şöyle özetlenebilir:

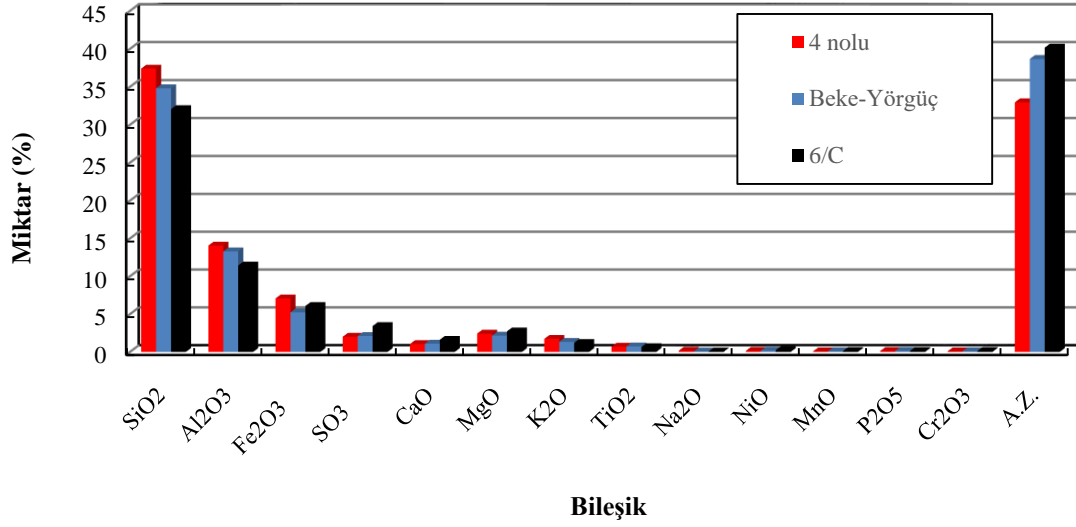
- 4 No’lu gölet numunesinin üst tane boyutu en büyüktür (4 mm). Aynı zamanda ince tane oranı (-0.038 mm) da oldukça yüksektir (%69.55).
- 6/C gölet numunesinin üst tane boyutu daha küçüktür (2 mm). Aynı zamanda ince tane oranı da en düşüktür (%26.52).
- Beke-Yörgüç gölet numunesinin ise hem üst tane boyutu en küçüktür (0.5 mm), hem de ince tane oranı en yüksektir (%81.30). Yani daha dar tane boyut aralığına sahiptir.

3.2 Kimyasal analizler

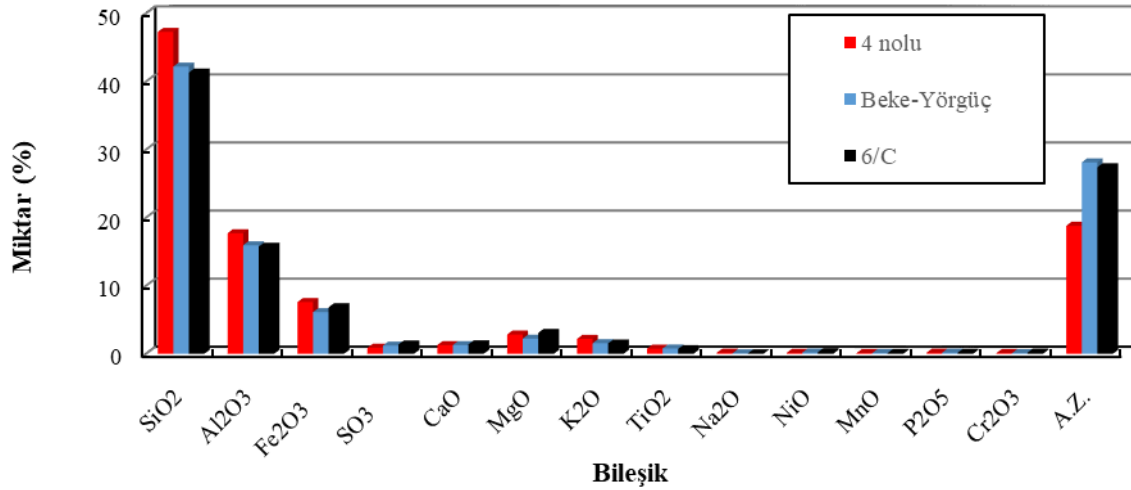
3.2.1 Elementel analiz

4 No’lu, Beke-Yörgüç ve 6/C artık göletlerinden alınan orijinal ve 0.038 mm altı numunelerin analiz sonuçları sırasıyla Şekil 4 ve 5’de verilmiştir. Şekil 4 ve 5 incelendiğinde her iki grup malzeme için de majör oksitlerin SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O ve SO_3 olduğu görülmektedir. Bunların dışındaki TiO_2 , Na_2O , NiO , MnO , P_2O_5 ve Cr_2O_3 oksitlerinin değerleri ise %1’in altındadır. SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 ’ün yüksek konsantrasyonlarda izlenmesinin nedeninin; silis ve kil minerallerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. En yüksek miktarlarda olan majör oksitlerden SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 göz önüne alındığında (her iki grup malzeme için de) 4 No’lu gölet numunesinde bu oksitlerin en fazla miktarda olduğu görülmektedir. SO_3 değerleri dikkate alındığında ise en yüksek değere 6/C gölet numunesi sahiptir. Bu sonuç bu numunenin en yüksek kükürt oranına sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Orijinal numunelerin ateş zayıtı değerleri incelendiğinde ise yine en yüksek değere 6/C gölet numunesinin sahip olduğu görülmektedir (Şekil 4). Bunun nedeni de bu gölet numunesinin kül oranının düşük olmasıdır.

Ayrıca kil minerallerinin ana bileşenlerini oluşturan SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 gibi oksitlerin oranının 0.038 mm altındaki malzemelerde arttığı dikkat çekmektedir. Bu sonuç da beklendiği gibi, kil minerallerinin 0.038 mm altında yoğunlaştığını ve en çok da 4 No’lu gölet numunesinde bulunduğunu göstermektedir. Bu malzemedeki kül oranının en yüksek olması da bu sonucu doğrulamaktadır (Tablo 2).



Şekil 4. Orijinal boyutlu malzemelerin elementel analizi



Şekil 5. 0.038 mm altı malzemelerin elementel analizi

Tablo 2. 4 No'lu gölet numunesinin nem, kül, kükürt ve ısı değerleri

Tane Boyutu (mm)	Ağırlık (%)	Kül (%)	ÜİD (Kcal/kg)	AİD (Kcal/kg)	Kükürt (%)	Nem (%)
+4	0.24	27.25	5191	4763	1.07	3.80
-4+2	1.50	24.83	5441	4944	1.16	4.70
-2+1	2.87	20.41	5731	5233	1.19	4.30
-1+0.85	0.24	25.45	5170	4710	1.23	4.30
-0.85+0.6	3.55	22.31	5468	4980	1.24	4.40
-0.6+0.5	1.61	26.00	5260	4803	1.28	4.20
-0.5+0.425	1.23	26.66	5031	4564	1.26	4.60
-0.425+0.3	1.52	33.64	4859	4451	1.20	4.00
-0.3+0.212	4.78	40.04	4519	4133	1.33	4.20
-0.212+0.150	1.86	37.78	4670	4251	1.33	4.60
-0.150+0.106	3.06	47.10	3933	3680	1.43	2.20
-0.106+0.075	1.35	48.03	3358	3086	1.39	3.10
-0.075+0.063	3.33	40.07	3598	3263	1.31	3.90
-0.063+0.053	0.93	50.69	3127	2870	1.12	3.10
-0.053+0.038	2.37	58.81	2531	2333	1.11	2.50
-0.038	69.55	81.91	653	601	0.34	1.70
Toplam	100.00	68.01	1817.66	1665.04	0.62	2.35

Tablo 3. Beke-Yörgüç gölet numunesinin nem, kül, kükürt ve ısı değerleri

Tane Boyutu (mm)	Ağırlık (%)	Kül (%)	ÜİD (Kcal/kg)	AİD (Kcal/kg)	Kükürt (%)	Nem (%)
+0.5	0.32	9.95	6773	6349	1.11	2.20
-0.5+0.425	0.31	11.18	6563	6136	1.11	3.20
-0.425+0.3	0.39	10.43	6622	6056	1.18	3.50
-0.3+0.212	2.74	10.70	6586	6113	1.06	3.00
-0.212+0.150	1.46	14.09	6492	6052	1.00	2.70
-0.150+0.106	3.07	17.20	5888	5511	0.95	2.10
-0.106+0.075	1.86	23.30	5321	4974	0.92	2.10
-0.075+0.063	1.10	22.10	5304	4936	0.94	2.40
-0.063+0.053	3.70	27.03	5164	4798	0.95	2.70
-0.053+0.038	3.74	37.74	4285	4006	0.87	2.00
-0.038	81.30	71.96	1257	1151	0.39	1.30
Toplam	100.00	62.73	2054.98	1898.44	0.50	1.51

Tablo 4. 6/C gölet numunesinin nem, kül, kükürt ve ısı değerleri

Tane Boyutu (mm)	Ağırlık (%)	Kül (%)	ÜİD (Kcal/kg)	AİD (Kcal/kg)	Kükürt (%)	Nem (%)
+2	4.54	61.29	2347	2201	6.33	1.1
-2+1	16.50	62.13	2176	2021	3.27	1.6
-1+0.5	17.04	49.45	2533	2332	4.32	1.7
-0.5+0.425	4.12	48.61	2769	2568	5.98	1.5
-0.425+0.3	3.73	43.48	2643	2420	3.88	1.8
-0.3+0.212	9.87	54.35	2805	2614	3.28	1.7
-0.212+0.106	8.56	52.18	3058	2839	2.19	2.2
-0.106+0.075	3.24	57.33	3018	2814	2.46	2.2
-0.075+0.063	1.14	56.32	2934	2740	2.4	1.9
-0.063+0.053	2.38	51.30	3195	2970	2.12	2.2
-0.053+0.038	2.35	58.77	2547	2370	2.17	1.8
-0.038	26.52	74.25	1041	939	0.69	1.6
Toplam	100.00	59.71	2191.94	2025.88	2.86	1.70

Tablo 5. Orijinal ve +0.038 mm boyutlu malzemelerin nem, kül, kükürt ve kalori değerleri

Tane Boyutu (mm)	Nem (%)		Kül (%)		Kükürt (%)		ÜİD (Kcal/kg)		AİD (Kcal/kg)	
	Orijinal	+0.038 mm	Orijinal	+0.038 mm	Orijinal	+0.038 mm	Orijinal	+0.038 mm	Orijinal	+0.038 mm
4 No'lu	2.35	3.84	68.01	36.27	0.62	1.27	1818	4478	1165	4095
Beke-Yörgüç	1.51	2.44	62.73	22.59	0.50	0.96	2055	5525	1898	5148
6/C	1.70	1.74	59.71	54.47	2.86	3.64	2192	2607	2026	2418

Tablo 5'den orijinal malzemelerin kül değerleri karşılaştırıldığında en yüksek kül değerine 4 No'lu göletin sahip olduğu görülmektedir. 0.038 mm üstü malzemelerin kül değerleri incelendiğinde ise, en yüksek kül değerine 6/C göletin sahip olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak bu malzemede 0.038 mm altına geçen kısmın (killi kısmın) azlığı gösterilebilir (Şekil 2). Yani kilin büyük bir bölümü 0.038 mm üzerinde kalmış, bu da kül miktarını artırmıştır. 4 No'lu gölet malzemesinde kül değeri en yüksek olmasına rağmen 0.038 mm elekten elendikten sonra kilin büyük bir bölümü elek altına geçmiş ve bu da kül miktarını düşürmüştür. Beke-Yörgüç göletinde ise bu durum daha belirgin olarak görülmektedir. Yani -0.038 mm malzeme oranı yaklaşık %80'dir (Şekil 2) ve bu da +0.038 mm malzemesindeki kül değerinin %22.59'a kadar düşmesine neden olmuştur. Aynı zamanda toplam kül değerlerinin, elementel analizlerden elde edilen kızdırma kaybı değerleri ile de örtüştüğü görülmektedir (Şekil 4 ve 5).

Tablo 5'den orijinal boyutlu malzemelerin ısı değerleri karşılaştırıldığında, en yüksek ısı değere 6/C göletin sahip olduğu görülmektedir. +0.038 mm malzemelerin ısı değerlerine bakıldığında ise 4 No'lu göletin ısı değeri en

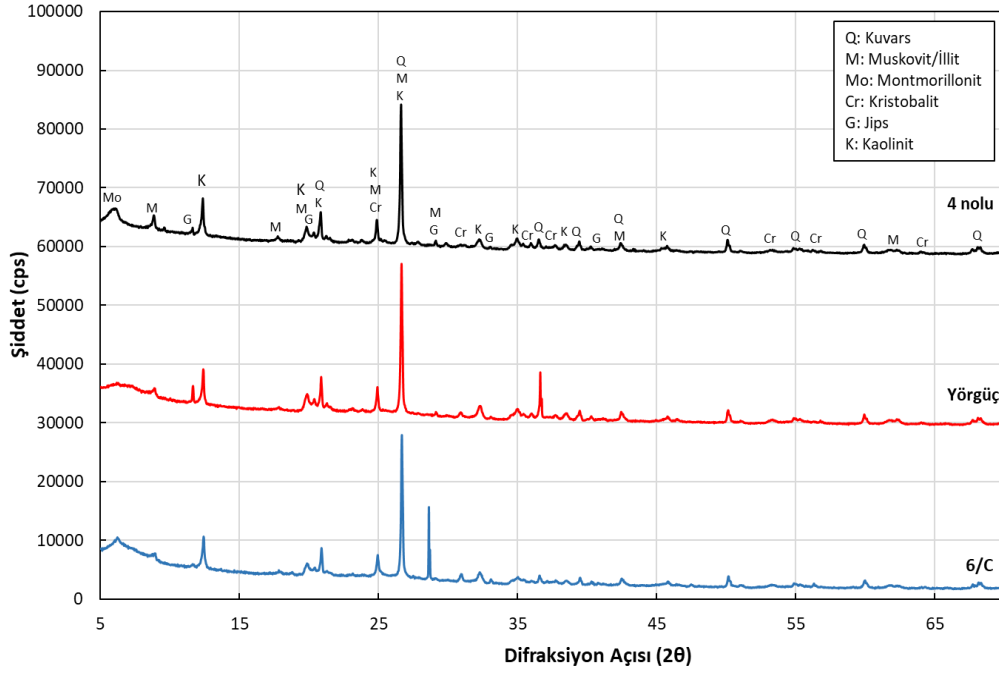
düşük olmasına rağmen kül oranındaki azalışa bağlı olarak ısı değerinin önemli oranda arttığı dikkat çekmektedir. En düşük kül oranına sahip olan Beke-Yörgüç göletinin +0.038 mm boyutlu kısmı ise en yüksek ısı değerlere sahip olmuştur.

Yine Tablo 5'den en yüksek toplam kükürt değerinin 6/C göleti numunelerinden (orijinal ve +0.038 mm) elde edildiği dikkat çekmektedir. Aynı zamanda bu sonuçların, elementel analizden elde edilen kükürt değerleri ile de uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 4 ve 5).

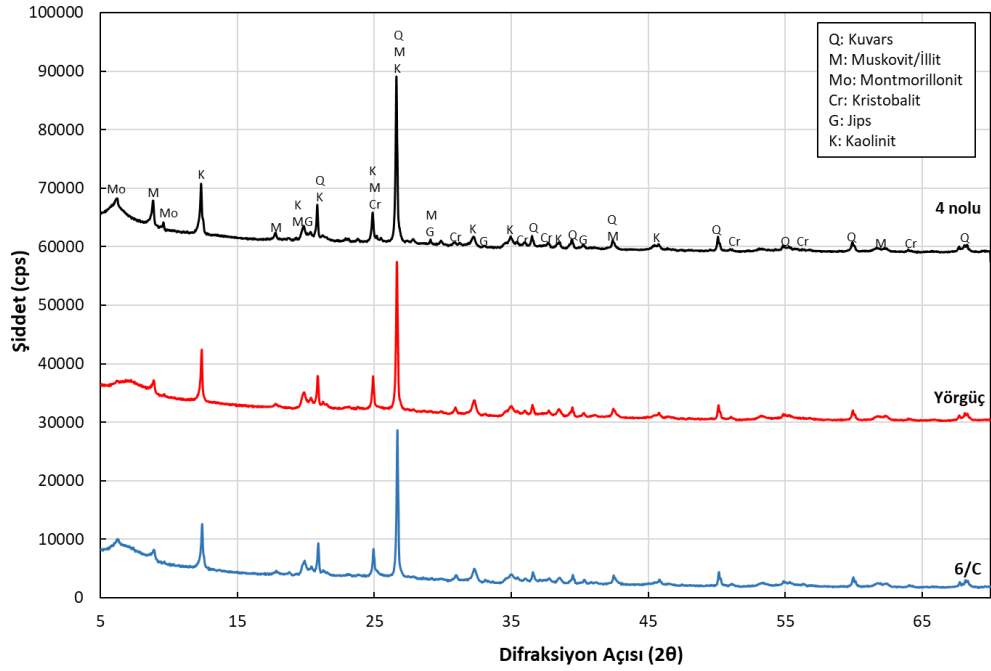
3.2.2 Mineralojik analiz

Göletlerden alınan numunelerin mineralojik bileşimlerinin belirlenmesi amacıyla XRD analizleri yapılmıştır. Orijinal malzemelerinin ve -0.038 mm boyutlu malzemelerin XRD paternleri sırasıyla Şekil 6 ve 7'de verilmiştir.

Şekil 6 ve 7 incelendiğinde hem orijinal hem de 0.038 mm altı malzemelerde tanımlanan başlıca minerallerin kuvars, muskovit/illit, montmorillonit, kristobalit, kaolinit ve jips olduğu görülmektedir.



Şekil 6. Orijinal boyutlu malzemelerin XRD paternleri



Şekil 7. 0.038 mm altı malzemelerin XRD paternleri

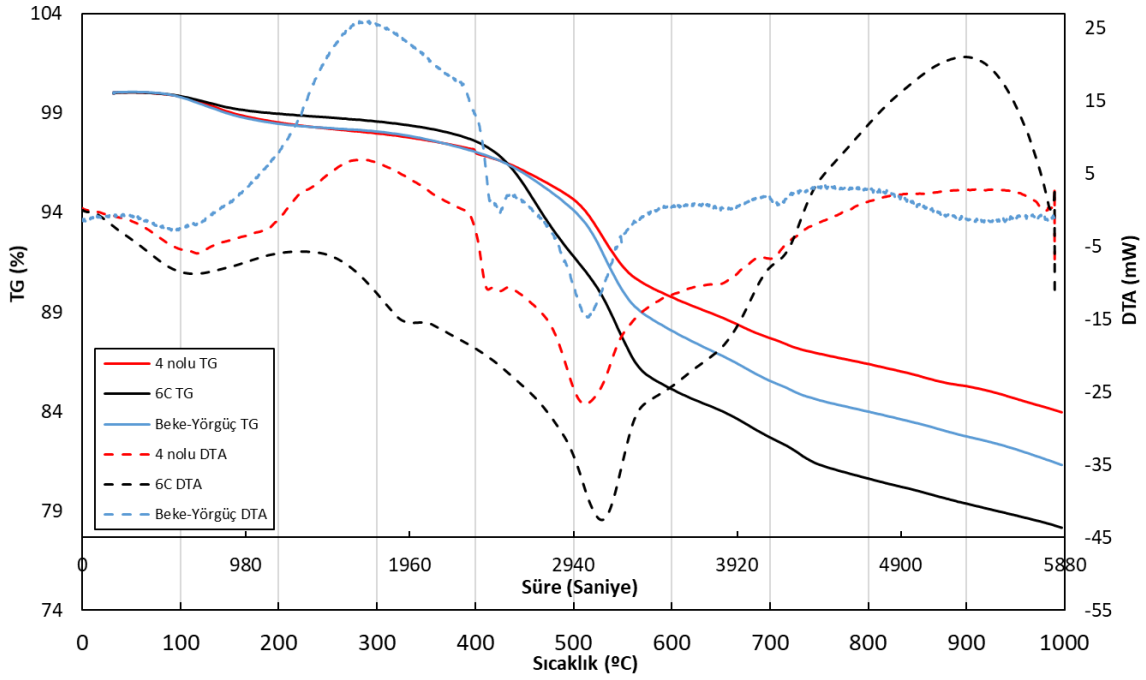
3.2.3 Termal analiz

Gölet numunelerinin TG-DTA analiz sonuçları Şekil 8 ve 9'da verilmiştir.

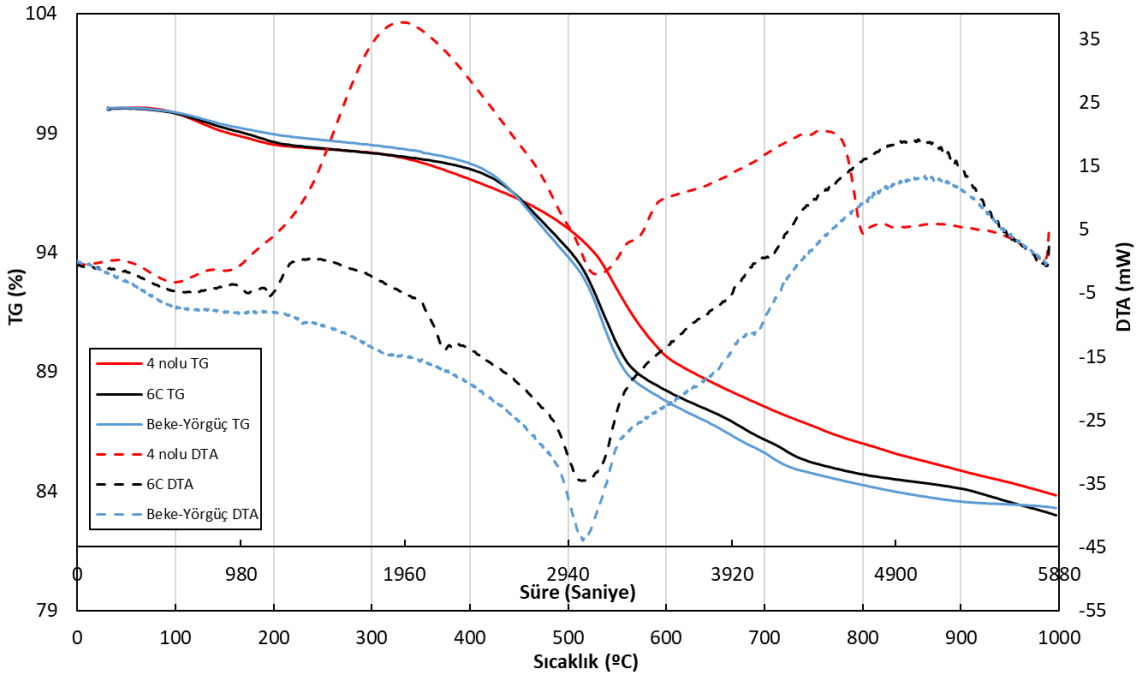
Şekil 8 ve 9'dan TG eğrileri incelendiğinde tüm gölet malzemelerinde 200 °C'ye kadar yaklaşık %1-1.7 arasındaki oranlarda bir ağırlık kaybının olduğu görülmektedir. Bu kayıplar artıklardaki ortam neminin uzaklaşmasından kaynaklanmaktadır. 300-600 °C arasında yaklaşık %7-10 oranlarında büyük ağırlık kayıpları izlenmektedir. Bu da

artıklardaki organiklerin ve killerde bulunan kristal suların uzaklaşmasından kaynaklanmaktadır. 600 °C'den sonra hala ağırlık kayıplarının devam ettiği fakat daha az olduğu görülmektedir. Bu da bu sıcaklıktan sonra organik madde uzaklaşmasının devam ettiğini göstermektedir.

DTA eğrileri incelendiğinde ise 200-400 °C arasında tüm numunelerde ekzotermik pikler olduğu görülmektedir. Bu durum organik maddelerin yanma reaksiyonlarından kaynaklanmaktadır.



Şekil 8. Orijinal boyutlu malzemelerin TG-DTA analiz sonuçları



Şekil 9. 0.038 mm altı malzemelerin TG-DTA analiz sonuçları

500-550 °C'ler arasında ise endotermik pikler oluşmaktadır. Bu durum da kil minerallerinin kristal sularının uzaklaşmasının bir sonucudur. 690-750 °C'ler arasında küçük endotermik pikler görülmektedir. Bunun da kömürdeki kükürdün uzaklaşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. 800-900 °C arasında ise büyük ve geniş ekzotermik pikler gözlenmektedir. Bu durum kil minerallerinin kristal yapılarındaki düzenlenme nedeniyle oluşmaktadır. Bu sıcaklıktan sonra kristalleşme

tamamlanmakta ve tekrar ısı olarak malzeme erime eğilimine girmektedir.

4 Sonuçlar ve öneriler

Bu çalışmada GLİ (Kütahya) bünyesinde faaliyet gösteren Tunçbilek ve Ömerler lavvar tesislerinden açığa çıkan ve imalatı yapılmış açık ocak çukurlarında depolanmış bulunan, 4 No'lu, Beke-Yörgüç ve 6/C olarak adlandırılan

şlam artıklarının karakterizasyonunun belirlenmesine çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Numunelerin elek analizi sonuçlarına göre; 4 No'lu göletin en büyük tane boyutu 4 mm, 6/C gölet numunesinin 2 mm ve Beke-Yörgüç gölet malzemesinin ise 0.5 mm olduğu saptanmıştır. 0.038 mm altı malzeme oranı 4 No'lu gölet şlamında %69.55, Beke-Yörgüç gölet şlamında %81.30 iken 6/C gölet şlamının %26.52 olduğu belirlenmiştir. 0.038 mm altı malzemenin boyut dağılımına göre ise 6/C gölet numunesinin daha ince tane boyut dağılımına sahip olduğu belirlenmiştir.
- Numunelerin elementel analizlerine göre majör oksitlerin SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, K₂O ve SO₃ olduğu belirlenmiştir.
- Numunelerin kül değerlerinin yüksek, kalori değerlerinin düşük olduğu tespit edilmiştir. 0.038 mm'den daha iri boyutlarda kükürt değerlerinin ise daha fazla olduğu belirlenmiştir.
- Orijinal numune ve 0.038 mm altı tüm numunelerin kuvars, muskovit/illit, montmorillonit, kristobalit, jips, kaolinit minerallerinden oluştuğu tespit edilmiştir.
- DTA-TG analiz sonuçlarına göre, tüm malzemelerde sıcaklığın artmasıyla uçucu maddeler ve kömür yanması başlamış ve bu durum 800 °C'ye kadar devam etmiştir. 690-750 °C arasında ise kömürdeki kükürdün uzaklaştığı belirlenmiştir.
- 0.038 mm'den daha iri boyutlu artık malzemelerde önemli oranda kömür bulunduğu ve bu kömürün kazanılarak ekonomik kayıpların önlenebileceği tespit edilmiştir.
- 0.038 mm'den daha ince boyutlu artık malzemelerin ise (özellikle 4 No'lu ve Beke-Yörgüç atıklarının daha fazla ince tane ve daha az kükürt içermeleri nedeniyle) tuğla-kiremit ve kaplama malzemesi üretiminde hammadde olarak kullanılabilirliği ortaya çıkmıştır. 6/C gölet malzemesinin yüksek oranda kükürt içermesi, gözenekli ve hafif yapı malzemesi üretiminde avantaj sağlayacaktır.
- Bu artık malzemelerin tuğla-kiremit, kaplama, terracotta ve çimento sektörlerinde kullanılmasıyla hem çevresel sorunlar büyük ölçüde önlenecek hem de bu malzemelere katma değer kazandırılacaktır.
- İleride yapılacak çalışmalarda, renk probleminin tolere edilebileceği seramik bünye üretiminde, 4 No'lu ve Beke-Yörgüç atıklarının kullanılabilirliği araştırılarak bu atıkların değerlendirilme alanı genişletilebilir.

Teşekkür

Bu çalışmada katkılarından dolayı Türkiye Kömür İşletmeleri Garp Linyitleri İşletmesi Müessese Müdürlüğü yetkililerine teşekkür ederiz.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %11

Kaynaklar

- [1] R. A. Meyers, J. S. Laskowski, and A. D. Walters, Coal Preparation. in: Encyclopedia of physical science and technology. R. A. Meyers (Eds.), Academic Press, pp. 277, California, 2001.
- [2] G. F. Meenan, Modern Coal Flotation Practices. In: Advances in Flotation Technology. Parekh and Miller (Eds.), SME, pp. 309-321, Denver, 1999.
- [3] A. Güney, G. Ateşok, G. Önal ve A. Altaş, Kömür Zenginleştirme Teknolojisindeki Yenilikler. in: III. Kömür Teknolojisi ve Kullanımı Semineri Kitabı. Önal ve Ateşok (Ed.), Yurt Madenciligi Geliştirme Vakfı Yayınları, sayfa 270-282, İstanbul, 1996.
- [4] B. J. Arnold, Rate and Residence Time Studies Applied to the Operation of Conventional Coal Froth Flotation Cells. In: Advances In Flotation Technology. Parekh and Miller (Eds.), SME, pp. 321-331, Denver, 1999.
- [5] İ. Kafadar, Açık işletmelerde toprak ve çevre tahribi ile arazinin yeniden düzenlenmesi. Türkiye 8. Kömür Kongresi, sayfa 552-560, Zonguldak, Türkiye, 22-23 Şubat 1992.
- [6] Garp Linyitleri İşletmesi Komisyonu, Şlam Değerlendirme Komisyon Raporu. Garp Linyitleri İşletmesi, Kütahya, Türkiye, Teknik Rapor, 15 Eylül 2017.
- [7] F. S. Karaoğuz, Kömür hazırlama tesis atıklarının değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2017.
- [8] H. Çiftçi ve S. Işık, İnce boyutlu lavvar tesisi atıklarının anyonik flokülantlar ile susuzlandırılmasında çeşitli parametrelerin etkisi. AKÜ FEMÜBİD, 16, 391-398, 2016. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/652464>
- [9] İ. Bentli, Kömür lavvar tesisi atıkların flokülasyonunda inorganik elektrolitlerin etkisi. Ekoloji, 19 (76), 71-77, 2010. <https://doi.org/10.5053/ekoloji.2010.768>
- [10] M. F. Eskibalci ve M. F. Özkan, Kömür hazırlama tesis artıklarının koagülasyon ile susuzlandırılmasında farklı koagülant tiplerinin etkisinin araştırılması. BAUN Fen Bil. Enst. Dergisi, 21(1), 43-52, 2019. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/657890>
- [11] M. Karaoğlu, TKİ Alpagut-Dodurga linyitleri işletmesi şlamlarından kömürün kazanılması. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 1999.
- [12] N. T. Sayın, Tesis atığından kömür kazanımının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2019.
- [13] Ö. Yaşar, T. Uslu and E. Şahinoğlu, Recovery of fine coals from tailings of Tunçbilek coal washery by oil agglomeration (Preliminary study). 15th International Mineral Processing Symposium, 985-992, İstanbul, Türkiye, 19-21 Ekim 2016.
- [14] S. Özgen, Z. Arsoy, B. Ersoy ve H. Çiftçi, Lavvar tesisi tikiner atığından kömürün geri kazanımı. DÜMF Mühendislik Dergisi, 10(2), 663-674, 2019. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/738438>

- [15] E. Sabah, Kil İçerikli Kömür Hazırlama Tesisi Atıklarından Temiz Kömür Üretimi ve Atık Kilin Tuğla Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması. TÜBİTAK, MAG-1041080, 2005.
- [16] A. S. İnce, Tuğla bünyesinde kömür artığı ve bor kullanımının araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2019.
- [17] TÜBİTAK MAM, Tunçbilek lavvarı şlam atıklarının tuğla ve çimento üretiminde hammadde olarak değerlendirilmesi. <https://me.mam.tubitak.gov.tr/tr/haber/tuncbilek-lavvari-slam-atiklarinin-tugla-ve-cimento-uretiminde-hammadde-olarak>, Erişim 01.02.2021





Alçıtaşı üretiminde delme – patlatma yöntemi yerine mekanik kazı yönteminin kullanılabilirliğinin araştırılması

Investigation of the usability of mechanical excavation method instead of the drilling-blasting method in the production of gypsum

Ramazan Çomaklı^{1,*} 

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

Özet

Dünyada ve ülkemizde açık işletme yöntemi kullanılarak üretilen endüstriyel hammaddelerin kazısının genellikle delme-patlatma yöntemi kullanılmaktadır. Patlatma etkisiyle tonlarca malzemenin aynı anda gevşetilir parçalandığı varsayıldığından delme- patlatma uygulamaları açık işletme yönteminde ekonomik olarak değerlendirilmektedir. Ancak özellikle düşük dayanımlı kayaların kazısında mekanik kazıcıların alternatif kazı yöntemi olarak değerlendirilmesi mümkün olabilir. Kazılacak formasyonun dayanımının düşük olması daha kolay kazılabilmesine ve kazı performansının artmasına olanak sağlamaktadır. Ayrıca mekanik kazı yöntemlerinde yükleme ve nakliye gibi kazı sonrası yapılan çalışmalar daha ekonomik olarak yapılabilmektedir.

Bu çalışmada Niğde ili Ulukışla ilçesinde bulunan ve ABS Alçı firmasına ait alçıtaşı ocağında, delme-patlatma yöntemi yerine mekanik kazı yönteminin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Delme-patlatma yönteminin maliyeti 5 farklı patlatma için hesaplanmış ve birim maliyet belirlenmiştir. Mekanik kazı yöntemi için de birim maliyet değerleri teorik olarak hesaplanmış ve bu iki yöntem maliyet bakımından kıyaslanmıştır.

Anahtar kelimeler: Alçıtaşı, Delme-patlatma, Mekanik kazı, Maliyet

1 Giriş

Delme - patlatma yöntemi, kazı ve üretim amaçlı olarak maden ve tünel projelerinde kullanılan yöntemlerden birisi olup özellikle agrega ve endüstriyel hammadde üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüz rekabet şartlarında firmalar için en önemli husus üretim maliyetlerini mümkün olduğu kadar en aza indirmektir. Delme ve patlatma yöntemi kullanılarak üretim yapılan işletmelerde genel olarak maliyeti oluşturan temel parametreler; delme, patlatma, kırma, eleme, yükleme ve nakliye işlemleridir. Köse ve diğ., [1] yaptıkları bir çalışmada agrega üretimi için maliyeti oluşturan temel parametrelerin etkilerini araştırmışlardır. İlgili çalışma sonucunda delme ve patlatma işlemlerinin toplam maliyet içerisindeki oranının yaklaşık %30 olduğu belirlenmiştir. Delme – patlatma maliyetlerinin

Abstract

Drilling-blasting method is generally used in the excavation of industrial raw materials produced by open-pit mining method. Since tons of materials are loosened and crushed at the same time by blasting effect, drilling-blasting applications are considered as more economic production in open-pit mines. However, in the excavation of low-strength rocks, the mechanical excavation is able to be used as an alternative production method. Decreasing in the strength of rock formation to be excavated not only allows for easier excavation but also increase excavation performance. In addition, many operations following rock excavation such as loading and transportation can be carried out more economically in the mechanical excavation method.

In this study, the usability of the mechanical excavation method instead of drilling-blasting method was investigated in the gypsum quarry of ABS firm in Ulukışla county of Niğde province. The cost of the drilling-blasting method was calculated for 5 different blasting operations, and the unit cost for each operation was determined. Unit cost values for the mechanical excavation method were also calculated theoretically. By taking into account for obtained results, these two excavation methods were compared in terms of their cost.

Keywords: Gypsum, Drilling-blasting, Mechanical excavation, Cost

toplam maliyete etkisinin anlaşılabilmesi ve bu etkilerin minimize edilebilmesi amacıyla da farklı araştırmacılar bu konuyu detaylı şekilde incelemiştir [2-5]. Delme-patlatma maliyetinin toplam maliyete oranı genel olarak kullanılan malzeme ve formasyon özelliklerine göre farklılık göstermekle birlikte, Bağdatlı [6] yaptığı çalışmada genel olarak bu oranın % 5 – 40 arasında değiştiğini belirtmiştir.

Delme ve patlatma işlemlerinin verimli yapılar yapılmama durumu hiç şüphe yok ki toplam maliyet içerisindeki oranının değişiklik göstermesine sebep olmaktadır. Şöyle ki; verimsiz yapılan bir patlatma işleminden sonra ikinci bir patlatmaya ihtiyaç duyulabilmekte veya verimsiz patlatma yüksek patar oranının oluşmasına sebep olabilmektedir. Bu durumda ortaya çıkan büyük blokların nakliyesi ve kırılması işlemleri

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: rcomakli@ohu.edu.tr (R. Çomaklı)
Geliş / Received:19.01.2021 Kabul / Accepted:26.03.2021 Yayımlanma / Published: 27.07.2021
doi: 10.28948/ngumuh.864550

de fazladan masraf oluşturacak ve toplam maliyet artacaktır [7]. Kahriman [8] yaptığı çalışmada uygun olmayan bir delme – patlatma işleminin toplam maliyet üzerinde oldukça etkili olduğunu belirtmiştir. Benzer şekilde Hoek ve Bray [9] tarafından yapılan çalışmada daha küçük parçalar elde etmek için delme – patlatma maliyetinin artmasıyla toplam maliyetin artacağı, buna karşın delme – patlatma maliyetinin düşürülmek istenilmesi durumunda ise daha büyük blokların elde edileceği ve bununla patarlama, nakliye ve kırma maliyetlerini artıracacağı için yine toplam maliyetin artacağı belirtilmiştir. Bundan dolayı delme ve patlatma işleminin ilgili formasyon özelliğine ve istenilen malzeme özelliklerine göre optimize edilmesi gereklidir.

Bir patlatma işleminin verimli olup olmadığı birçok farklı parametre ile ölçülebilmektedir [9]. Verimsiz şekilde yapılacak olan patlatma işlemi takip eden sonraki işlemlerin de aksamasına ve maliyetin artmasına sebep olmaktadır ve bu konuda yapılmış birçok araştırma literatürde mevcuttur [10-12, 4, 13]. Arpaz [14] ve Bilim vd. [15] yaptıkları çalışmalarda verimsiz bir patlatma işleminin zamanın verimli kullanımını, makine seçimini ve maliyeti büyük ölçüde etkilediğini belirtmişlerdir. Verimsiz bir patlatma özellikle yükleyici performansını da olumsuz etkileyecektir [16-18, 8]. Elde edilen tüm sonuçlara göre formasyon özelliklerine göre optimum delme – patlatma tasarımının yapılmasının toplam maliyet üzerinde ne kadar etkili olduğu anlaşılmaktadır. Ancak özellikle küçük işletmeler tarafından herhangi bir ön çalışma yapılarak üretim için en uygun delme ve patlatma yönteminin seçimine yönelik bir optimizasyon yapılmamakta ve bu durum da firmaların ekstra maliyetlerle karşılaşmalarına sebep olmaktadır.

Bununla birlikte delme ve patlatma yönteminin çeşitli dezavantajları da bulunmaktadır. Yöntemin en önemli dezavantajlarından birisi özellikle yerleşim yerlerine yakın yerlerde yürütülen madencilik ve tünel kazı projelerinde çevreye vereceği olumsuz etkilerdir. Bu olumsuz etkiler genel olarak taş savrulması, hava şoku, toz emisyonu ve yer sarsıntısı şeklinde olmaktadır [19]. Özellikle literatürde patlatma sonucunda oluşacak yer sarsıntısının (titreşim) azaltılması ve yerleşim yerlerine etkilerini azaltmak için yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır [20-23]. Tüm bu dezavantajlar göz önüne alındığında delme-patlatma yöntemine alternatif bir kazı yöntemi olarak mekanik kazıcıların varlığı değerlendirilebilmektedir.

Farklı araştırmacılar tarafından maden kazılarında, özellikle daha az sürede daha fazla üretime imkân tanınmasından dolayı, delme – patlatma yöntemi yerine mekanik kazıcıların kullanılabilirliği araştırılmıştır [24-26]. Günümüzde özellikle yeraltı üretim yöntemi uygulanan birçok işletmede mekanik kazıcılar kullanılmakla birlikte özellikle endüstriyel hammadde veya agrega üretimi yapılan açık ocaklarda mekanik kazıcılar çok fazla kullanılmamaktadır. Bunun en büyük sebebi mekanik kazı yöntemlerinin uygulanmasını kısıtlayan ve özellikle de yüksek dayanıma sahip kayaçların varlığı gibi formasyon özelliklerine bağlı olan sebeplerdir [27, 28].

Yüksek dayanımlı kayaçların kazısında mekanik kazı yöntemi delme-patlatma yöntemine kıyasla ekonomik olmamakla birlikte, düşük dayanımlı hammaddelerin

kazısında bu durumun farklı olacağı değerlendirilebilmektedir.

Yapılan bu çalışmada, Niğde bölgesinde üretimi yapılan düşük dayanımlı alçıtaşı kazısı için delme-patlatma yöntemi yerine mekanik kazı yönteminin kullanımının ekonomik olup olmadığı araştırılmıştır. Bu amaçla 5 farklı delme-patlatma uygulaması için birim maliyet belirlendikten sonra belirli özellikteki kollu galeri açma makinesi için teorik olarak birim maliyet hesaplanmıştır. Daha sonra her iki yöntem için elde edilen birim maliyetler karşılaştırılmıştır.

2 Materyal ve metod

2.1 Arazi çalışmaları ve delme-patlatma maliyet analizi

Bu çalışma kapsamında delme-patlatma yöntemi kullanılan bir açık işletmede üretimi yapılan düşük dayanımlı bir endüstriyel hammaddenin kazısında delme-patlatma yöntemi yerine mekanik kazı yönteminin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu kapsamda Niğde ili Ulukışla ilçesi sınırlarında bulunan ve ABS Alçı firmasına ait alçıtaşı ocağında çalışmalar yapılmıştır. İlgili işletme Ulukışla-Adana karayolu 9. km' sinde bulunmakta olup, işletme de 15 işçi çalışmaktadır (Şekil 1). İşletmede alçıtaşı üretimi/kazısı hâlihazırda delme ve patlatma yöntemi ile yapılmaktadır.

Delme-patlatma uygulamalarının maliyetlerinin belirlenmesi için işletmede yapılan 5 farklı patlatma işlemi için maliyet hesaplaması ayrı ayrı yapılmıştır. Maliyet hesaplamaları yapılırken delik delme ve patlatma işlemleri için yapılan çalışmalar detaylı olarak incelenmiş ve maliyetleri belirlenmiştir. Buna göre delme-patlatma maliyetleri genel olarak delik delmede harcanan yakıt, patlatmada kullanılan patlayıcı ve yardımcı malzeme maliyetleri ve patlatma sonunda hidrolik kırıcı çalışmasına bağlı olarak ortaya çıkan yakıt maliyetleri şeklinde belirlenmiş. Her bir uygulamada patlatma düzeni 89 mm çapında dikey delikler açılarak iki sıra şeklinde uygulanmış olup, patlatma da ANFO, dinamit ve milisaniye gecikmeli kapsüller kullanılmıştır. Tüm patlatmalara ait detaylı veriler Tablo 1' de verilmiştir.

Delme-patlatma işlemlerinde yapılan işlemler detaylı olarak kaydedildikten sonra tüm işlemler için detaylı maliyet analizi yapılmıştır. Maliyet analizi yapılırken toplam maliyet ve her bir patlatma sonunda elde edilen üretim miktarı oranlanarak, delme-patlatma yönteminde 1 m³ malzeme üretiminin birim maliyeti belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 2' de verilmiştir.

3 Laboratuvar çalışmaları ve teorik hesaplamalar

3.1.1 Fiziksel ve mekanik testler

Her bir delme-patlatma işlemi sonunda oluşan yığının en az 3 farklı bölgesinde blok numuneler alınmıştır. Blok numunelerden alınan karot numuneler üzerinde yapılan testler ile kayaçların fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. ISRM [29] standartlarına uygun olarak yapılan deneyler ile kayaçların tek eksenli basınç dayanımı, dolaylı çekme dayanımı, yoğunluk ve porozite değerleri belirlenmiştir

Tablo 1. 5 farklı delme-patlatma uygulamasına ait detaylar.

Patlatma No	Tarih	Delik Sayısı (adet)	Delik Boyu (m)	Sıklama Boyu (m)	Delikler A. Mesafe (m)	Patlayıcı Miktarı (kg)	Delik Delme Süresi (dk)
1	16.7.2019	29	13	2,5	3	1537,00	2030
2	19.7.2019	23	16	2,5	2,8	1541,00	2484
3	26.7.2019	28	13	2,5	2,8	1484,00	2184
4	05.8.2019	23	16	2,5	2,8	1530,19	2760
5	22.8.2019	23	16	2,5	3	1544,91	2760

Tablo 2. Delme-patlatma uygulamalarının maliyet dağılımı.

Patlatma No	Patlatma Maliyeti (TL)	Patarlama Maliyeti (TL)	Toplam maliyet (TL)	Toplam üretim (m ³)	Birim Maliyet (TL/m ³)
1	11496,18	580,0	12076,18	3958,5	3,05
2	10363,34	725,4	11088,74	3606,4	3,07
3	10788,12	1015,56	11803,68	3567,2	3,31
4	10196,36	725,40	10921,76	3606,4	3,03
5	10398,76	435,24	10834	3864,0	2,80



Şekil 1. ABS Alçı Ulukışla alçıtaşı işletme sahası.

Yapılan deneysel çalışmalarda her bir blok numunesinden en az 5 numune elde edilmiş ve her bir patlatma için en az 15 numune üzerinde testler yapılmış ve elde edilen değerlerin ortalaması alınarak nihai değerler elde edilmiştir. Yapılan deneyler sonunda elde edilen ortalama değerler Tablo 3' te verilmiştir.

Tablo 3. Laboratuvar deneyleri sonunda elde edilen ortalama değerler.

Patlatma No	Yoğunluk (gr/cm ³)	Porozite (%)	UCS (MPa)	BTS (MPa)
1	2,17	29,48	14,5	2,58
2	2,24	27,63	15,2	2,72
3	2,18	28,21	14,1	2,64
4	2,29	27,54	15,3	2,78
5	2,32	26,69	15,8	2,84

3.1.2 Teorik spesifik enerji değerinin hesaplanması

Mekanik kazı yöntemlerinin kullanıldığı kazı projelerinde maliyeti etkileyen en önemli parametrelerden birisi kazı esnasında harcanan enerjidir. Kazılacak formasyon özelliklerine uygun olarak makine tasarımı ve çalıştırılması aşamasında harcanacak enerji göz önünde bulundurulmakta ve planlamalar buna göre yapılmaktadır. Bu doğrultuda projelendirme aşamasında yaygın olarak kullanılan yaklaşım, birim hacim malzemenin kazılması için harcanan enerji olarak tanımlanan spesifik enerji değerinin formasyon özelliklerine bağlı olarak belirlenmesidir. Spesifik enerji değeri kaya kesme deneyleri yardımıyla belirlenmektedir. Ancak, gerek bu deney setlerinin ülkemizde ve dünyada çok sayıda olmamasından ve gerekse deney prosedürünün zor olmasından dolayı spesifik enerji değerinin dolaylı olarak tahmin edilebilmesi için araştırmacılar farklı eşitlikler önermişlerdir [30-32].

Çopur ve diğ., [30] yaptıkları çalışmada Türkiye' nin farklı bölgelerinden alınan cevherler üzerinde yardımcı kaya

kesme deneyleri yapmışlardır. Yapılan bu çalışma sonunda cevherlerin tek eksenli basınç (UCS) ve dolaylı çekme dayanımına (BTS) bağlı olarak optimum spesifik enerji değerinin tahmini için aşağıdaki eşitlikleri önermişlerdir;

$$Opt.SE = 0,192xUCS - 2,22 \quad (1)$$

$$Opt.SE = 1,676xBTS - 1,75 \quad (2)$$

$$Opt.SE = 0,027(UCSxBTS) + 0,675 \quad (3)$$

Benzer bir çalışma Balcı ve diğ., (2004) tarafından farklı kayaçlar kullanılarak yapılmıştır. Yapılan yardımsız kaya kesme deneyleri sonucunda, 5 mm kesme derinliğinde elde edilen spesifik enerji değeri ile kayaçların dayanım özellikleri arasında aşağıdaki eşitlikleri önermişlerdir;

$$SE = 0,37xUCS^{0,86} \quad (4)$$

$$SE = 3,36xBTS^{0,71} \quad (5)$$

$$SE = 1,16x(UCSxBTS)^{0,40} \quad (6)$$

Başka bir çalışmada Niğde ve Kayseri bölgesindeki farklı metalik cevherlerin kazısında kolları açma makinesinin kullanılabilirliği araştırılmıştır [26]. Bu çalışmada küçük boyutlu kazı deney seti kullanılarak yardımsız kaya kesme deneyleri yapılmış ve spesifik enerji değerleri belirlenmiştir. Belirlenen spesifik enerji değerleri ile cevherlerin kırılma güçleri arasındaki ilişkiler araştırılmış ve kırılma güçleri değerlerine bağlı olarak kolları açma makinesi spesifik enerji değerinin tahmini için aşağıdaki eşitlik geliştirilmiştir;

$$SE = 0,078(UCSxBTS/2) + 7,37 \quad (7)$$

Bu çalışmada ABS Alçı firmasına ait Ulukışla alçıtaşı ocağında mekanik kazı yönteminin uygulanması durumunda oluşacak birim maliyet tahmin edilmiştir. Bu kapsamda ilgili işletmede üretimi yapılan alçıtaşının dayanım özelliklerine bağlı olarak belirli özellikteki bir kolları açma makinesi için birim maliyet analizi yapılmıştır. Bu kapsamda da yukarıda verilen eşitlikler kullanılarak 5 farklı patlatmadan elde edilen alçıtaşı numunelerinin Tablo 3' te verilen tek eksenli basınç ve dolaylı çekme dayanımı değerlerine bağlı olarak kolları açma makinesinin harcayacağı spesifik enerji değerleri hesaplanmıştır (Tablo 4). Hesaplanan bu değerlere göre de bu işletmede alçıtaşı kazısı için kolları açma makinesi kullanılması durumunda oluşacak maliyet belirlenmiştir. Maliyet hesaplaması yapılırken 1kwh elektrik 0,54 TL olarak hesaplanmıştır. Yapılan tüm hesaplamalar sonucunda elde edilen maliyetler Tablo 5' te verilmiştir.

4 Bulgular ve tartışma

Alçıtaşı üretiminde klasik delme-patlatma uygulaması sırasında maliyeti oluşturan tüm işlemler detaylı olarak analiz edilmiş ve 5 farklı patlatma için metre küp başına birim maliyet hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerlere makine bakım maliyetleri gibi değişkenler ilave edilmemiştir. Yine bu yöntemde patlatma sonrası oluşan yığın kamyonlara

yüklenmesi sırasında ekskavatör çalışmasına bağlı olarak oluşacak maliyetler de maliyet hesaplamasına dâhil edilmemiştir.

Benzer şekilde mekanik kazı maliyetleri hesaplanırken de makine ve sistemin ilk yatırım ve bakım onarım maliyetleri hesaplamalara dâhil edilmemiştir. Farklı araştırmacılar tarafından önerilen 7 farklı modele göre teorik olarak kolları açma makinesi enerji tüketimi maliyetleri hesaplanmıştır.

Yapılan hesaplamalar sonunda 5 farklı delme-patlatma uygulaması için birim maliyet değerleri 4,79 - 5,89 TL aralığında olarak belirlenmiştir. Bu maliyetlerin delik sayısına, iklim şartlarına ve formasyon özelliklerine bağlı olarak değişim gösterdiği söylenebilir. Mekanik kazı yöntemi için yapılan hesaplamalar da ise belirli özellikte seçilen bir kolları açma makinesi için teorik hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplamalar yapılırken kazılma formasyonun tek eksenli basınç ve dolaylı çekme dayanımları ile yine bu değerlere bağlı olarak hesaplanan kırılma güçleri kullanılmıştır. Farklı modellere göre yapılan hesaplamalar sonucunda en düşük maliyet değerinin, Çopur ve diğ., [30] tarafından kayaçların tek eksenli basınç dayanımı değeri kullanılarak elde edilen model kullanılarak hesaplandığı görülmektedir. En yüksek maliyet değerlerinin ise kayaçların dolaylı çekme dayanımı değerlerine bağlı olarak Balcı ve diğ., [31] tarafından geliştirilen modelden elde edildiği görülmektedir. Ancak genel olarak bakıldığında alçıtaşı üretiminde mekanik kazı yönteminin uygulanması durumunda karşılaşılabilecek maliyetin, klasik delme patlatma maliyetinden düşük olacağı görülmektedir (Şekil 2). Şekil 2' de görüldüğü gibi klasik delme - patlatma uygulamasının 5 farklı patlatma için de farklı modellerden elde edilen teorik kazı maliyetlerinden fazla olduğu görülmektedir. Bu durumda birinci etken parametre kazılan alçıtaşı formasyonun düşük dayanımlı olmasıdır. Bununla beraber ilgili işletmede delme - patlatma uygulamasının optimize edilmesi ile de maliyetlerin düşürülebileceği söylenebilir. Ancak alçıtaşı gibi düşük dayanımlı endüstriyel hammaddelerinin kazısında kolları açma makinesi gibi mekanik kazıcıların kullanımının daha ciddi şekilde ele alınması mümkün olabilir. Nitekim bölgede alçıtaşı kazısı için farklı mekanik kazıcıları deneyen firmalar bulunmaktadır.

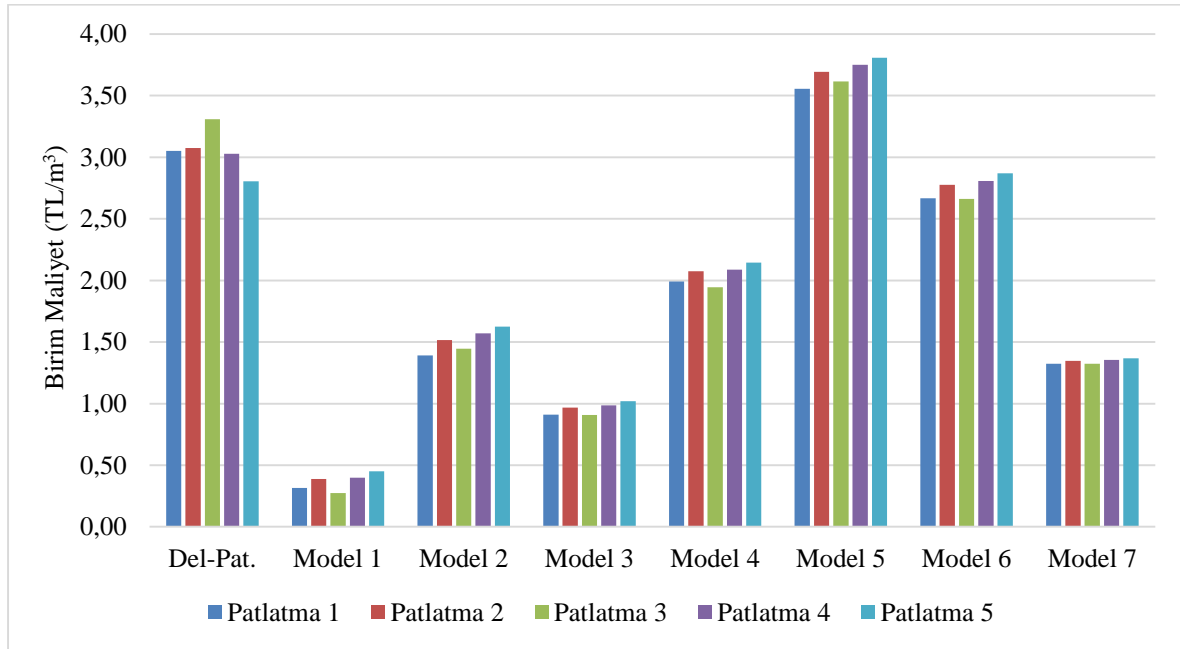
Bununla birlikte delme patlatma yöntemi yerine mekanik kazıcıların kullanılması aşamasında basamak yüksekliği ve genişliği gibi ocak içi tasarım parametrelerinin de değişeceği göz önünde bulundurulmalıdır. Mekanik kazıcıların kullanılacağı durumlarda basamak yüksekliğinin kazıcının kol yüksekliğine göre belirlenmesi ve basamak genişliğinin de kazıcının ve nakliye araçlarının kolay manevra yapabileceği şekilde tasarlanması gerekmektedir. Bu çalışmanın yapıldığı alçıtaşı ocağında üretim tek bir basamak olarak yüzeyden yapılmaktadır ve basamak yükseklikleri 12 m ve genişliği 25 m' dir. Bu kapsamda, bu işletmede mekanik kazıcı kullanılması durumunda basamak yüksekliğinin kazıcıya uygun şekilde tasarlanması yeterli olacaktır.

Tablo 4. Önceki modeller kullanılarak teorik olarak hesaplanan spesifik enerji değerleri (kwh/m³).

Patlatma No	Model/Eşitlik Numarası						
	1	2	3	4	5	6	7
1	0,58	2,57	1,69	3,69	6,59	4,94	2,45
2	0,72	2,81	1,79	3,84	6,84	5,14	2,50
3	0,51	2,67	1,68	3,60	6,69	4,93	2,45
4	0,74	2,91	1,82	3,86	6,94	5,20	2,51
5	0,83	3,01	1,89	3,97	7,05	5,31	2,53

Tablo 5. Belirlenen spesifik enerji değerlerine bağlı olarak hesaplanan birim maliyet değerleri (TL/m³).

Patlatma No	Model/Eşitlik Numarası						
	1	2	3	4	5	6	7
1	0,32	1,39	0,91	1,99	3,56	2,67	1,32
2	0,39	1,52	0,97	2,07	3,69	2,78	1,35
3	0,27	1,44	0,91	1,95	3,61	2,66	1,32
4	0,40	1,57	0,98	2,09	3,75	2,81	1,35
5	0,45	1,63	1,02	2,15	3,81	2,87	1,37



Şekil 2. Delme-patlatma uygulaması ile farklı teorik hesaplamalara göre mekanik kazı maliyetlerinin karşılaştırılması.

5 Sonuçlar

Bu çalışmada Niğde ili Ulukışla ilçesinde bulunan ve ABS Alçı firmasına ait alçıtaşı üretim sahasında klasik delme patlatma uygulaması yerine mekanik kazı yönteminin uygulanabilirliği birim maliyet bakımından incelenmiştir. Bu kapsamda 5 farklı patlatma için delme patlatma maliyeti detaylı olarak analiz edilmiş ve 1 m³ malzeme üretiminin maliyeti belirlenmiştir. Ayrıca farklı araştırmacılar tarafından önerilen modeller kullanılarak belirli özellikteki bir kollu galeri açma makinesi için 1 m³ malzemenin kazı maliyeti tahmin edilmiştir.

Daha sonra her iki yöntem için belirlenen maliyet değerleri karşılaştırılmış ve alçıtaşı üretiminde mekanik kazı yönteminin tercih edilmesi durumunda, üretimin daha düşük maliyetli olacağı belirlenmiştir. Ancak yapılan bu çalışma da mekanik kazı yöntemi için hesaplanan spesifik enerji ve

birim maliyet değerlerinin teorik olarak hesaplandığı unutulmamalıdır. Spesifik enerji değerleri hesaplanırken kullanılan önceki modeller farklı dayanım değerlerine sahip farklı türdeki kayalar için elde edilmiştir. Bu yüzden daha doğru bir karşılaştırma için alçıtaşı numuneleri üzerinde kaya kesme deneyleri yapılmalıdır. İleride alçıtaşı üzerinde yapılacak kaya kesme deneyleri ile birlikte kaya kütle özelliklerini de göz önünde bulundurarak ilgili alçıtaşı ocağı için daha kapsamlı bir çalışma yapılması planlanmaktadır. Yine de kayaların dayanım değerlerine göre geliştirilen bu modellerin kazı performansının tahmin edilmesinde yaklaşık sonuçlar vereceği düşünülmüştür. Ayrıca bu çalışma kapsamında incelenen ocakta üretimi yapılan alçıtaşının düşük dayanımlı olmasından dolayı da mekanik kazı maliyetinin delme – patlatma uygulaması maliyetine kıyasla daha düşük olacağı düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışmanın yapılmasında gerekli olan arazi verilerini sağlayan ABS Alçı firmasına ve Maden Mühendisi Funda Akça'ya teşekkür ederim.

Çıkar çatışması

Bu çalışmanın kapsamında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederim.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] H. Köse, F. Şimşir, T. Onargan ve E. Yalçın, Açık işletme tekniği. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir, 2009.
- [2] C. O Aksoy, ve E. Yalçın, Kırmataş üretim yöntemlerinin ekonomik analizleri. 3. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir, 14-15 Ekim 1999.
- [3] A. O. Yılmaz, R. Kaya, M. Şentürk, ve A. Tatarhan, 50/130/250/500 ton/saat kapasiteli kırma-eleme tesislerinin yatırım ve işletme maliyetlerinin belirlenmesi. 3. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, İstanbul, 2003.
- [4] A. Tosun, Muck pile fragmentation optimization at open pit bench blasting. PhD Thesis (in Turkish), Dokuz Eylül University, Institute of Science, İzmir, 2013.
- [5] A. Tosun ve G. Konak, Determination of specific charge minimizing total unit cost of open pit quarry blasting operations. Arabian Journal of Geosciences, 8, 6409 – 6423, 2015. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1657-7>.
- [6] S. Bağdatlı, Üsküdar - Ümraniye - Çekmeköy metro hattı libadiye istasyonu yaklaşım tüneli kazısında yapılan patlatmalı kazılardan kaynaklanan titreşimlerin ölçülmesi ve çevresel etkilerinin değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Okan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2013.
- [7] H. A. Bilgin ve A. G. Paşamehmetoğlu, Kayaların delinebilirlikleri ve patlatılabilirlikleri üzerine bir çalışma. 1. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu, 113-125, 1986.
- [8] A. Kahriman, Maden ve taşocaklarında kaya patlatma tekniği ve uygulamalar, Maden ve taşocaklarında kaya patlatma tekniği semineri. İstanbul, 2003.
- [9] E. Hoek, and J. Bray, Rock Slope Engineering, Institution of Mining and Metallurgy. 3rd Edition, London, 1981.
- [10] H. T. Özkahraman, H. A. Bilgin, Hâkim süreksizlik yönünün patlatmaya etkisi yerinde inceleme. 2. Delme ve Patlatma Sempozyumu, Ankara, 1996.
- [11] A. Mortazavi, P. D. Katsabanis, Modelling the effects of discontinuity orientation, continuity, and dip on the process of burden breakage in bench blasting. Fragblast, 4 (3), 175-197, 2000.
- [12] B. Aykan, The predictability of block size of blasted rock in calcite quarry using regression analysis and artificial neural networks method. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011.
- [13] N. Bilim, A. Çelik, and B. Kekeç, A study in cost analysis of aggregate production as depending on drilling and blasting design. Journal of African Earth Sciences, 134, 564 – 572, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.07.024>.
- [14] E. Arpaz, Türkiye'deki bazı açık işletmelerde patlatmadan kaynaklanan titreşimlerin izlenmesi ve değerlendirilmesi. Doktora Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2000.
- [15] N. Bilim, A. Çelik, and B. Kekeç, Determination of the effect of drilling-blasting operation on total cost in quarry. 8th Drilling-Blasting Symposium, 259–266, İstanbul, 2015.
- [16] M. McGill, and J. Freadrich, The effect of fragmentation on loader productivity, Proceedings of 5th State of the Art Seminar on Blasting Technology. Instrumentation and Explosives Application, 713-724, 1994.
- [17] P. R. Michaud, and J. Y. Blanchet, Establishing a quantitative relation between post blast fragmentation and mine productivity a case study. Proceedings of 5th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, 386-396, 1996.
- [18] S. P. Singh, and T. Yalçın, Effects of muck size distribution on scooping operations. Proceedings of 28th Annual Conference on Explosives and Blasting Techniques, 315-325, 2002.
- [19] E. Değerli, Açık Ocak İşletmeciliğinde Basamak Patlatması Tasarımı, Bilimsel rapor, 63, 2012.
- [20] G. R. Adhikari, A. I. Theresraj, S. Venkatesh, R. Balachander, R. N. Gupta, Ground vibration due to blasting in limestone quarries. Fragblast – International Journal of Blasting and Fragmentation, 8 (2), 85–94, 2004. <https://doi.org/10.1080/13855140412331336160>
- [21] A. Kahriman, Ü. Özer, M. Aksoy, A. Karadığın, and G. Tuncer, Environmental impacts of bench blasting at hisarcık boron open pit mine in Turkey. Environmental. Geology, 50, 1015-1023, 2006. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0274-5>.
- [22] Ü. Özer, A. Karadoğan, A. Kahriman, and M. Aksoy, Bench blasting design based on site-specific attenuation formula in a quarry. Arabian Journal of Geosciences Journal, 6, 99711-721, 2013. <https://doi.org/10.1007/s12517-011-0388-2>.
- [23] D. P. Blair, Blast vibration dependence on charge length, velocity of detonation and layered media. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 65, 29-39, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2013.11.007>.
- [24] H. Tuncdemir, Investigation into application of boom type machines for mineral excavations. PhD Thesis. Istanbul Technical University, İstanbul, 2002.
- [25] R. Çomaklı, Niğde ve Kayseri yöresindeki cevherlerin makine ile kazılabilirliklerinin belirlenmesi. Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Niğde, 2010.
- [26] R. Çomaklı, S. Kahraman, C. Balcı, D. Tumaç, Estimating specific energy from the brittleness indexes

- in cutting metallic ores. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 116, 8, 763-768, 2016.
- [27] J. Rostami, and L. Ozdemir, D. M. Neil, Performance prediction: a key issue in mechanical hard rock mining. *Min. Eng.* 1263–1267, 1994.
- [28] N. Bilgin, H. Çopur, and C. Balci, *Mechanical excavation in mining and civil industries*. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, 2014.
- [29] ISRM, In: Ulusay R, Hudson JA (eds) *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974–2006*. Ankara, Turkey, 2007.
- [30] H. Çopur, H. Tunçdemir, N. Bilgin, and T. Dinçer, Specific energy as a criterion for the use of rapid excavation systems in Turkish Mines. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy Section. A: Mining Technology*, 110. A149–157, 2001.
- [31] C. Balci, M. A. Demircin, H. Çopur, and H. Tunçdemir, Estimation of optimum specific energy based on rock properties for assessment of roadheader performance. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 11. 633–641, 2004.
- [32] R. Çomaklı, S. Kahraman, C. Balci, and D. Tumac, Estimating specific energy from the brittleness indexes in cutting metallic ores. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy* 116, 763–768, 2016. doi:10.17159/2411-9717/2016/v116n8a8.





PV-T Kollektör kaynaklı bir ısı pompası sisteminin enerji ve ekserji analizi

Energy and exergy analysis of a PV-T collector welded heat pump system

Mehmet Altınkaynak^{1,*}, Recep Demirekin², Ali Kemal Yakut³

^{1,3} Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 32200, Isparta, Turkey
² Süleyman Demirel Üniversitesi, Makine Eğitimi Bölümü, 32260, Isparta Türkiye

Özet

Günümüzde düşük enerji girdisi ile yüksek ısı performansını sağlandığı ısı pompası sistemlerinde, sistemin kurulacağı bölge, jeolojik yapı, coğrafi konum ve mevsimsel şartlar dikkate alındığında bu sayılan gerekçeleri karşılamak amacıyla toprak kaynaklı ısı pompası, hava kaynaklı ısı pompası ve su kaynaklı ısı pompası çeşitlerine talep gün geçtikçe artmaktadır. Bu çalışmada toprak kaynaklı ısı pompasına destek amaçlı 72 hücreli, tek kristal silisyum modül hücre paneline sahip 190W nominal güç üreten bir PV-T kollektör hesaplama için kullanılmıştır. PV-T destekli ısı pompası sistemindeki her bir eleman için enerji ve ekserji analizleri EES (Engineering Equation Solver) programı yardımıyla yapılmıştır. Kullanılan PV-T hibrit sistemde toplam elektriksel güç 1422 W, toplam alınan ısı güç te 4397 W'dır. PV-T kollektörün ısı verimi %49.7, elektrik verimi %15.2 olarak hesaplanmıştır. PV-T kaynaklı ısı pompası sistemine kollektörlerin verim katkısı %67,9 olarak görülmüştür. Işınım şiddeti arttıkça toplam elektriksel gücün ve toplam alınan ısı gücün arttığı görülmüştür. Ayrıca yapılan bu çalışmada ısı pompası sisteminin COP si 4,41 olarak hesaplanmıştır. En yüksek ekserji yıkımının kondenserde olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: PV-T, Isı pompası, Enerji, Ekserji, COP

1 Giriş

Fosil yakıtların çevreyi kirletmesinden dolayı alternatif olarak en ön planda temiz ve yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş enerjisi bulunur. Yeryüzünün bir yılda aldığı güneş ışınım enerjisi, dünyadaki belirlenmiş tüm fosil yakıtın yaklaşık 160 katıdır. Ayrıca güneş; dünyadaki hidroelektrik, nükleer ve fosil yakıtlarla üretilebilecek enerjiden 15 bin kat daha fazla enerjiyi bizim kullanımımıza sunmaktadır. Dünyaya, güneşten saniyede 170 milyon MW enerji gelmektedir [1, 2].

Dünya'da güneş enerjisi tek başına ısı ihtiyacını karşılayamamaktadır. Bu nedenle bir enerji kaynağına ihtiyaç vardır. İnsanların bu tür gerekli ihtiyaçlarını karşılayabilmek için kullanılan ısıtma sistemlerinin bir tanesi de ısı pompalarıdır. Isı pompaları; mekanik enerjiyi ısı enerjisine çeviren bir sistemdir.

Elektrikli ısıtma sistemlerine göre 4-5 kat daha iyi sonuçlar vermektedir. Aynı tesisat ile hem ısıtma hem de

Abstract

Today, demand for soil source heat pump, air source heat pump and water source heat pump types with low energy input and high temperature performance has been increasing considering the region where the system will be built, geological structure, geographical location and seasonal conditions. In this study, a PV-T collector which produces 190W rated power with 72 cell single crystal silicon module cell panel has been used for supporting the ground source heat pump. Energy and exergy analyzes for each element in the PV-T assisted heat pump system has been done with the help of EES (Engineering Equation Solver) program. In PV-T hybrid system, total electrical power is 1422 W and total thermal power is 4397 W. Thermal efficiency of PV-T collector has been calculated as 49.7% and electrical efficiency as 15.2%. The efficiency contribution of the collectors to the PV-T welded heat pump system has been 67.9%. It has been observed that the total electrical power and the total thermal power increases as the intensity of heat goes up. In this study, the COP of the heat pump system has been calculated as 4.41. The highest exergy destruction has been observed in the condenser

Keywords: PV-T, Heat pump, Energy, Exergy, COP

soğutma işlemi yapabilmektedir. Çevreye duyarlı bir sistem oldukları için tercih edilirler [3].

PV / T (fotovoltaik / termal) teknolojisi, güneş enerjisinin daha kapsamlı kullanımını sağlayan, verimliliğini artırabilen ve geniş bir uygulama beklentisine sahip olan PV modülü (fotovoltaik kullanım) ve toplayıcının (foto termal kullanım) bir kombinasyonudur. Literatürde PV panele ve PV-T kollektöre yönelik çok sayıda çalışma yapılmış olup genellikle PV-T kollektörlerin soğutulması amacıyla bu kısım evaporatör olarak dizayn edilmiştir. Yao vd.[4], PV-T kollektörünü evaporatör olarak kullandıkları ısı pompası sisteminde ortam ısıtması yapmak amacıyla faz değiştiren malzemeler ile de enerji depolama işlemi yapmışlardır. PV-T ısı pompası sisteminin matematiksel modelini oluşturmuşlardır. 20 m² PV-T panel modülü kullanarak yaptıkları çalışmada 600 W/m² güneş ışınımı için COP %5.79, ısı verimi % 55.76 ve sistem verimini ise % 75.49 olarak hesaplamışlardır. Özakin vd. [5], PV-T ve ısı

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mehmetaltinkaynak@sdu.edu.tr. (M. Altınkaynak)
Geliş / Received: 24.02.2020 Kabul / Accepted: 28.01.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021
doi: 10.28948/ngumuh.693384

pompasını birleştirerek kombine bir sistem oluşturmuşlardır. Çalışmalarında PV-T'yi evaporatör olarak kabul etmişler ve evaporatörün performans katsayısı ve ekserjetik verime olan etkisini fluent yardımıyla incelemişlerdir. Sonuçlara göre elektriksel verimin beklendiği şekilde arttığını görmüşlerdir. Sistemin COP değerinin 4.75 olduğunu, kombine sistemin ekserjetik veriminde soğutucu akışkanın 6 m/s akış hızında olduğu durumda % 55.5 olarak hesaplamışlardır. Ji vd. [6], PV destekli bir ısı pompası sistemini incelemiş ve yaptıkları deney setinde PV panel üzerine buharlaştırıcı yerleştirerek yeni bir dizayn ile hem elektrik hem de ısı enerjisi alabileceklerini ifade etmişlerdir. Verim olarak kıyaslandığında PV panel verimini %12, ısı verimi ise %50 civarında bulmuşlardır. Yaptıkları başka bir çalışmada, güneş enerjisi destekli bir ısı pompası sisteminde güneş enerjisini evaporatör olarak tasarlamışlar ve performans analizlerini incelemişlerdir. Yaptıkları analizlerde COP değerini 8.4 panel verimini ise %13.4 olarak hesaplamışlardır [7]. Yine yaptıkları diğer bir çalışmada, PV-T güneş kollektörünün performans analizini bir yıldan fazla deneysel olarak ölçümlerle incelemişlerdir. PV sistemlere göre PV-T sistemlerinde yüzey sıcaklığının soğutucu akışkan yardımıyla düşürülmesi ile daha verimli olduğunu ifade etmişlerdir. Sonuçlarda ise, PV-T evaporatör sisteminde verimin %64-87 aralığında olduğunu, ısı veriminin de %53-64 ve son olarak da PV kollektörünün veriminin %12.4-14.5 arasında olduğunu deneysel olarak bulmuşlardır [8]. Fu vd. [9], güneş enerjisi destekli bir ısı pompası sisteminde üç farklı durum için modelleme yaparak analiz yapmışlardır. İlk önce ısı borusu, ikinci durumda güneş enerjisi destekli bir ısı pompasını, üçüncü durumda ise hava kaynaklı ısı pompası sistemini incelemişlerdir. Hong-Kong' da yaptıkları deneylerde enerji tasarrufu sağlamak üzere yeni bir tip üç mod da çalışabilen hibrit bir sistem önermişlerdir. Hibrit sistemin enerji ve ekserji analizlerini yapmışlardır. Daghigh vd. [10], yaptıkları çalışmalarında PV-T kollektörlerdeki ısınmayı gidermek için su ve soğutucu akışkanlar kullanmayı tercih etmişlerdir. Su soğutmalı ve soğutucu akışkanlı hibrit fotovoltaik termal toplayıcı sistemlerin gelecekteki durumları üzerine yorumlar yapmışlardır. Bu çalışma ile doğrudan genleşmeli güneş destekli ısı pompası sistemi ile PV / T toplayıcının soğutma etkisi altında daha iyi sonuçlar elde ettiğini ortaya koymuştur. Tyagi vd. [11], yaptıkları derleme makalede güneş enerjisi sisteminin 30 yılını göz önüne almış ve son 30 yıldan bugüne güneş enerjisi sistemlerinin devamlı bir araştırma ve geliştirmeye sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Verimli güneş enerjisi sistemleri için yeni nesil ekipman ve malzemelerle iyileştirmelerin olduğunu belirtmişlerdir. Tek bir cihazla PV-T kollektörleri ile hem elektrik enerjisi hem de ısı enerjisi elde edilebileceğini ifade etmişlerdir. Ayrıca bu sistemler ile ısıtma, sudan tuzun ayrıştırılması, güneş serası, PV-T kollektör destekli ısı pompası son olarak ta soğutma yapılabileceğinin metodları hakkında bilgi vermişlerdir. Zhang vd. [12], Pekinde müstakil bir evin ısıtılması amacıyla, üç akışkanlı PV- T ısı pompası hibrit sistemi önermişlerdir. Ayrıca bu sistem için matematiksel bir model de ortaya koymuşlardır. Geleneksel tip hava kaynaklı bir ısı pompasına kıyasla, bu sistemde %13.2'lik bir enerji tasarrufu

sağladıklarını belirtmişlerdir. Geleneksel bir PV panele göre ise sistemde % 14.7'lik enerji üretimi sağlamışlardır. Shao vd. [13], bina çatısına yerleştirdikleri PV-T kollektör ısı pompası sisteminin farklı mevsimsel performanslarını deneysel olarak incelemişlerdir. Yaz aylarında, kış aylarına göre daha iyi performans gösterdiğini ifade etmişlerdir. Deneylerdeki verilerin analizleri sonucunda elektriksel verimi %11.23, ısı verimi ise %64.25 olarak hesaplamışlardır. Tüm yıl için ortalama COP değerini 5.9 olarak bulmuşlardır. Zhou vd. [14], Çin'de yaptıkları teorik ve deneysel karşılaştırmalı çalışmada, mini kanallı PV-T kollektör ısı pompası modelini geliştirmişlerdir. Veriler ile modelleme ve simülasyon tekniklerini uygulayarak ölçüm sonuçları ve teorik sonuçları karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sonucunda hata analizlerinde %4-9 arasında hata payı olduğunu bununla beraber mevsimsel olaylara dayalı olduğunu ifade etmişlerdir. Mini kanallı sistemden sonra yaptıkları bir diğer çalışmada, mikro kanallı PV-T kollektör ısı pompası modelini geliştirmişlerdir. Teorik ve deneysel karşılaştırmalı çalışmada, veriler ile modelleme ve simülasyon tekniklerini uygulayarak ölçüm sonuçları ve teorik sonuçları karşılaştırmışlardır. Yine yaptıkları hata analizlerinde % 7.2 arasında mevsimsel olaylara dayanan sapmaların olduğunu ifade etmişlerdir. PV / T modülünün deneysel ortalama elektrik, termal ve toplam verimliliği sırasıyla %13.1, %56.6 ve %69.7'dir. Sistemin ortalama deneysel ve simüle edilmiş COP değeri sırasıyla 4.7 ve 5.0'dır [15]. Ammar vd. [16], yaptıkları çalışmada farklı güneş ışınımı değerleri için PV-T kollektör destekli ısı pompası sisteminin enerji ve ekserji analizlerini EES ve Hottel-Whillier denklem çözücülerini kullanarak hesaplamışlardır. R134a soğutucu akışkanını kullandıkları sistemde PV panel sıcaklığının maksimum 35.68 °C, elektriksel verimin 1000 W/m² de maksimum seviyede %11.56 olduğunu ifade etmişlerdir. Ortalama COP değerini 6.14 bulmuşlardır. Bellos ve Tzivanidis [17], yedi farklı akışkanı sabit durumda tamamen PV enerjisi ile çalıştırılan bir ısı pompası sisteminde incelemişlerdir. Optimum tasarım noktalarında R32 ve ona en yakın performans değerini gösteren R1234yf akışkanı olduğunu belirtmişlerdir. Optimum tasarım koşullarında 10 m² PV panel ile ısı pompasını besleyebilmişler ve ısıtımada 4.33 kW, elektrik üretiminde 0.53 kW net elektrik üretmişlerdir. Ayrıca günlük ortalama enerji verimliliğini %60.53, ekserji verimini ise %9.26 olarak hesaplamışlardır. Razali vd. [18], yaptıkları çalışmada PV-T kollektörde 0.012-0.255 kg/s debilerinde su akışlı bir sistemin deneysel analizini ele almışlardır. Farklı güneş ışınım şiddeti değerleri için güç üretimini incelemişlerdir. Ekserji oluşumu değerlerini ise 700 W/m² ve 900 W/m² ışınım şiddetleri için sırasıyla %22.48 ve %20.87 bulmuşlardır. Coventry, yapmış olduğu çalışmada, PV-T sistemin çalışma şartlarında ki verilerini göz önüne alarak analizler yapmışlardır. Analiz sonuçlarına bakıldığında, yoğunlaştırılmış PV/T modüllerinin ısı veriminin %58 civarında, elektriksel veriminin %11 civarında ve toplam verimin yaklaşık olarak %69 olduğunu bildirmiştir [19]. Yamaç yapmış olduğu yüksek lisans tezinde, güneş enerjisi destekli bir ısı pompasını incelemiş, sistemde R-134a akışkanını kullanmıştır. Analizler sonunda işletmenin

günlük 5 ton suya ihtiyacının olduğunu ve bu suyun sıcaklığının yaklaşık 36°C'den ısıtılarak 50°C'ye çıkartılabilmesi için ısı pompasının ihtiyacı olan ısı yükünün ne kadarlık kısmının kolektör yardımıyla karşılandığını araştırmış ve sonuç olarak sistemin COP değerini 4.39 olarak bulmuştur [20]. Duran, Isparta ili için PV-T kolektör sistemini yüksek lisans tez çalışmasında deneysel olarak incelemiştir. Elektrik üretimim esnasında meydana gelen panel sıcaklığının artması ile düşen elektrik verimini paneli soğutarak artırmayı amaçlamıştır. PV panelin arka yüzüne yerleştirdiği borularla ile su akışını sağlayarak soğutmaya amaçlamış ve panelin soğuması ile hem fotovoltaiik termal (PV-T) sistemin verimini arttırmış hem de sıcak su elde etmiştir. Yürüttüğü çalışmada farklı panel açıları ve farklı soğutma suyu debileri kullanmıştır. Yaptığı çalışmanın sonucuna göre elektrik üretiminde yaklaşık %35'lik güç artışı ve %7'lik verim artışı elde etmiş ve ekserji analizi sonucuna göre ekserji verimi ortalamasını %21 olarak bulmuştur [21]. Fudholi vd. PV modülden imal edilen bir PV-T panelin performansını değerlendirmişlerdir Yaptıkları analiz sonucu 800 W/m² ışınım ve 0.041 kg/s su debisinde, %13 PV verimi ve %52 ısı verim elde etmişlerdir. Debinin artması ve azalması panel yüzeyinin soğumasını aynı zamanda sıcak suyun üretilmesini de etkilediğini belirtmişlerdir [22]. Benli, aynı koşullarda PV ve PV/T kolektörlerinin performanslarını deneysel olarak karşılaştırmıştır. Akışkan olarak iki sistem içinde su kullanmış ve ışınım, dış hava sıcaklığı, su giriş sıcaklığı, su debisi gibi farklı parametreler üzerinde çalışma yürütmüştür. Yaptığı çalışmada PV/T kolektörlerinin PV kolektörlere göre elektriksel ve termal verimin yüksek olduğu sonucuna varmıştır [23]. Caner, yatay tip toprak kaynaklı ısı pompası sistemini Sivas koşulları için incelemiş, yerin 2.5 m altına 4 hattan oluşan, içinde su- antifriz karışımı bulunan ısı değiştiricileri kullanarak toplam uzunluğu 370 m olan sistemi kurmuştur. Çalışmasının sonucunda ısı pompası ve sistemin performans katsayılarını (COPPIP ve COPS) sırasıyla 2.3-1.96 ve 1.99-1.7 değerleri arasında olduğunu bulmuştur [24]. Al-Khaldi, Toprak kaynaklı ısı pompasının ısıtma performansını Isparta ili şartlarında bir ısıtma uygulaması üzerine farklı debilerde ve farklı karışım oranlarıyla irdelemiştir. Yaptığı çalışma toprak altı ve toprak üstü olmak üzere iki çevrimden oluşmakta ve en iyi sonuçları %5 karışım oranı, 21 L/dak hacimsel debi ile almıştır. Çalışmanın en yüksek COP 3.42 ve sıcaklığı ise 27.2°C olarak bulmuştur [25]. Horzum, Antalya'da bir meskende bulunan toprak kaynaklı ısı pompası sistemine ait verileri termodinamik açıdan yorumlamıştır. Termodinamik analiz sonucunda ısı pompasının ikinci yasa verimi ve COP değerleri sırasıyla 0.6649 ve 3.683 olarak bulmuştur [26].

Literatürde de görüldüğü gibi, PV / T sisteminden daha fazla güç ve ısı elde etmek için PV hücrelerini soğutmak ve sıcaklığını azaltmak gerekir. Bu durum sonucunda sistemin daha verimli olduğu bilinmektedir. Dolayısıyla yüzeyin soğutulması amacıyla birçok çalışmada, PV-T kollektörü ısı pompası sisteminin evaporatörü olarak kullanılmıştır.

Bu çalışmada da bir ısı pompası sisteminin kompresörünün çalışabilmesi için gerekli olan elektrik enerjisi ile ısı pompasının evaporatör kısmının alabileceği

enerji miktarları üzerine bir sistem tasarımı, Isparta ilinin Eğridir ilçesinin güneyinde bulunan 2109 m yükseklikteki Bozburun dağının yamacında bulunan hali hazırdaki bir adet bağ evi için sistem tasarımı yapılmıştır. Tasarımı yapılan güneş enerjisi destekli bir ısı pompası sisteminin enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Güneş enerjisi kullanım yöntemlerinden ısı pompasının ve bağlı olduğu sistemin elektrik enerjisi ihtiyacı fotovoltaiik panellerden karşılanırken, PV-T panellerdeki ısıtma suyunun bir ısı pompasına girdi olarak verilmesiyle sistemin mahal için gerekli olan ısıtma ihtiyacının da ısı pompasından sağlanması planlanmıştır

2 Materyal ve metot

Bu bölümde, termodinamik yasalara bağlı olarak bazı tanımlayıcı açıklamalar PV-T destekli ısı pompası sisteminin analizi için verilmiştir. Sırasıyla kütle, enerji ve ekserji denge denklemlerini kapsayan ilkeler sistemin iyileştirme potansiyelini araştırmak için incelenmiştir [27]. Kütle denge analizi, herhangi bir termodinamik sistemin analizinde kullanılan en temel bir kuraldır. Rejime sahip bir sistem için kütle dengesi aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\sum \dot{m}_g = \sum \dot{m}_\zeta \quad (1)$$

Burada “g” giren akımı, “ç” alt indisi çıkan madde akımını göstermektedir. Enerjinin korunumu ilkesi gereğince kinetik ve potansiyel enerjinin ihmal edilmesiyle enerji denge denklemi aşağıdaki şekilde yazılmıştır [28].

$$\dot{Q} + \sum \dot{m}_g h_g = \dot{W}_{net} + \sum \dot{m}_\zeta h_\zeta \quad (2)$$

Ekserji analizi, enerjinin kullanılabilirliğinin bir göstergesidir. Endüstride üretimde ısıtmada soğutmada vb. endüstriyel uygulamalarda, enerji sistemlerinde sistemin termodinamik analizi için kullanılmaktadır. Bu sistemlere ait genel ekserji dengesi aşağıdaki gibi yazılmaktadır [27].

$$\sum_g \dot{m}_g ex_g + \dot{E}x_Q = \sum_\zeta \dot{m}_\zeta ex_\zeta + \dot{E}x_W + \dot{E}x_Y \quad (3)$$

Burada ekserji transfer hızı, ısı transfer hızının ekserjisi ve iş ile alakalı ekserji transfer hızıdır. Ekserji yıkımı ile ifade edilmektedir. Prosesin spesifik ekserjisidir. Bu kavramlar aşağıdaki şekilde ifade edilir;

$$\dot{E}x_Q = \left(1 - \frac{T_o}{T_g}\right) \dot{Q}_g \quad (4)$$

$$\dot{E}x_W = \dot{W} \quad (5)$$

$$ex = ex_{ke} + ex_{pe} + ex_{ph} + ex_{ch} \quad (6)$$

Burada ex_{ke} kinetik ekserjiyi, ex_{pe} potansiyel ekserjiyi, ex_{ph} fiziksel ekserjiyi ve ex_{ch} da kimyasal ekserjiyi ifade etmektedir. Kinetik ve potansiyel ekserjiler ihmal edilebilir olduğundan, fiziksel ekserji aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$ex_{ph,i} = (h_i - h_o) - T_o(s_i - s_o) \quad (7)$$

Kimyasal ekserji ise maddenin kimyasal dengesinden kimyasal yapısının uzaklığı ile bağlantılıdır. Yakıtların spesifik kimyasal ekserjileri molar kimyasal ekserji (ξ_i) ve ilgili yakıtın alt ısıl değeri (LHV_y) kullanılarak tanımlanır [29]

$$\dot{E}x_{km}^y = \xi_i LHV_y \quad (8)$$

İdeal gazların kimyasal ekserji içerikleri şu şekildedir;

$$ex_{ch} = ex_{ch}^o + R_u T_o \ln z_i \quad (9)$$

Burada z_i i numaralı bileşenin mol kesrini ve ex_{ch}^o verilen referans sıcaklık ve basınçta molar kimyasal ekserjidir ve şu şekilde ifade edilir;

$$ex_{ch}^o = \frac{T_o}{T} ex_{o,i}^{ch} - \bar{h}_f^o \frac{T - T_o}{T} \quad (10)$$

Burada $ex_{o,i}^{ch}$, \bar{h}_f^o ve T sırasıyla “i” numaralı kimyasal bileşenin standart molar kimyasal ekserjisi, oluşum entalpisi ve gazlaştırma sıcaklığıdır. Materyal akışının ekserjisi aşağıda verildiği gibidir;

$$\dot{E}x_i = \dot{m} ex_i \quad (11)$$

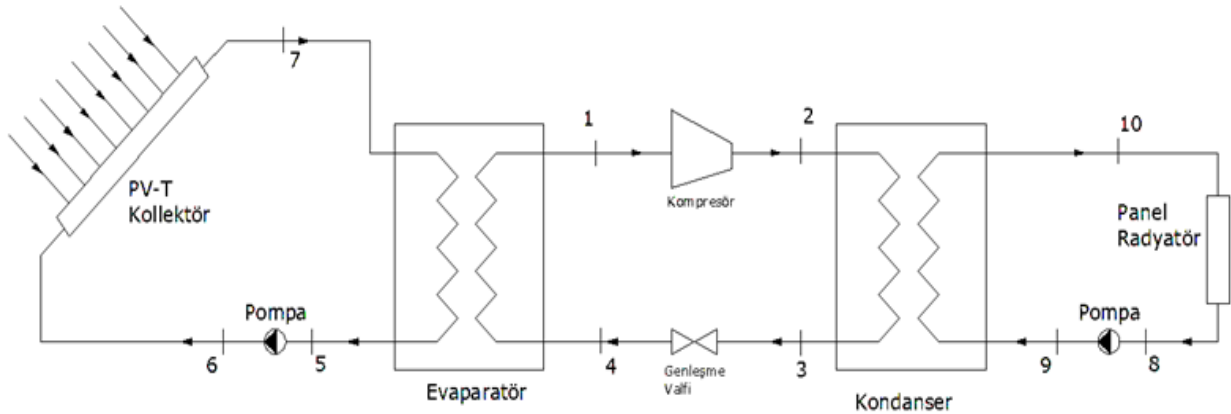
PV-T kolektörün enerjisi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$Q_{u,PV-T} = A_c F_R [(\tau\alpha)I_s - U_L(T_i - T_a)] \quad (12)$$

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p}{A_c U_L} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_c U_L F'}{\dot{m}C_p}\right) \right] \quad (13)$$

Burada F' kolektör verim faktörü olup aşağıdaki gibi yazılabilir [30].

$$F' = \frac{1/U_L}{W \left[\frac{1}{U_L[D + (W - D)F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D h_f} \right]} \quad (14)$$



Şekil 1. Sistemin şematik gösterimi

Burada W ısı taşıyıcı akışkanın geçtiği boruların arasındaki boşluk (m), D borunun iç çapı (m), F standart kanat verimi, C_b sınır ve iletkenliği h_f boruların içindeki ısı transfer katsayısını ifade etmektedir.

PV-T kolektörlerin enerji verimliliği aşağıdaki gibi verilir [31].

$$\eta_{PV-T} = \frac{Q_{u,PV-T}}{I_s x A_c} = \frac{F_R [(\tau\alpha)I_s - U_L(T_i - T_a)]}{I_s} \quad (15)$$

PV-T sisteminin ısı ekserjisi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$Ex_{PV-T,thermal} = \left(1 - \frac{T_i}{T_a}\right) Q_{u,PV-T} \quad (16)$$

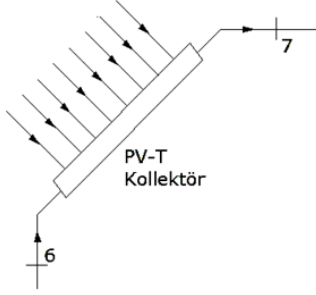
PV-T kolektörler aynı zamanda elektrik enerjisi ve gövdeden ısı enerji sağladığı için ekserji verimi aşağıdaki gibi yazılır.

$$\Psi_{PV-T} = \frac{Ex_{PV-T}}{Ex_{güneş}} = \frac{V_m I_m + \left(1 - \frac{T_a}{T_i}\right) Q_{u,PV-T}}{\left(1 - \frac{T_a}{T_s}\right) A_c I_s} \quad (17)$$

PV-T kolektör destekli ısı pompasına ait sistemin akış diyagramı Şekil 1. 'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi PV-T kolektör yüzeyinden geçirilen kapalı devre kolektör suyu, kolektör pompası ile PV-T kolektöre basılır. Buradan ısı alan su, ısı pompasının evaporatörüne gelir. Burada soğutucu akışkana, ısı değiştirici vasıtasıyla ısını bırakır. Isısını bırakan akışkan su tekrar ısı almak için kolektöre gönderilir. Isı alan soğutucu akışkan buharlaşır ve kompresör ekipmanı ile kondensere basılır. Kondenserde ısını radyatör ısıtma suyuna aktaran soğutucu akışkan, genleşme valfine gelerek soğutma çevrimini tamamlamış olur. Radyatör sistemine ait olan sirkülasyon pompası ile mahal ısıtma suyu kondensere basılarak burada ısı yüklemesi yapılır. Aldığı enerjiyi panel radyatör yoluyla ortama aktararak, ortamın ısıtılması sağlanmış olur.

PV-T kaynaklı ısı pompası sisteminin tüm bileşenlerinin kütle, enerji, entropi ve ekserji dengeleri ayrı ayrı parçalanmış olarak aşağıda verilmiştir

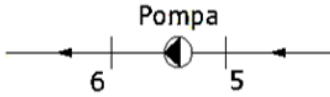
Sisteme ait ekipmanlardan PV-T kollektöre ait Şekil 2’de ve kütle, enerji, entropi, ekserji balansları aşağıda verilmiştir.



Şekil 2. Kollektör

$$\begin{aligned} \text{Kütle} \quad & \dot{m}_2 + \dot{m}_9 = \dot{m}_3 + \dot{m}_{10} & (18a) \\ \text{Enerji} \quad & \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_9 h_9 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_{10} h_{10} & (18b) \\ \text{Entropi} \quad & \dot{m}_2 s_2 + \dot{m}_9 s_9 + \dot{S}_{\text{üretim,Kond}} = \dot{m}_3 s_3 + \dot{m}_{10} s_{10} & (18c) \\ \text{Ekserji} \quad & \dot{m}_2 ex_2 + \dot{m}_9 ex_9 = \dot{m}_3 ex_3 + \dot{m}_{10} ex_{10} + \dot{E}x_{\text{yıkım,Kond}} & (18d) \end{aligned}$$

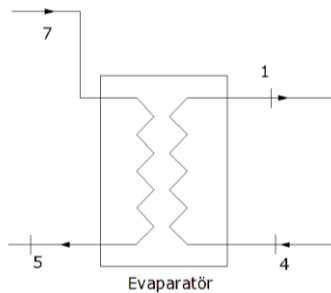
Sisteme ait ekipmanlardan PV-T kollektör ait pompa Şekil 3’de ve kütle, enerji, entropi, ekserji balansları aşağıda verilmiştir.



Şekil 3. Kollektöre ait pompa

$$\begin{aligned} \text{Kütle} \quad & \dot{m}_5 = \dot{m}_6 & (19a) \\ \text{Enerji} \quad & \dot{m}_5 h_5 + \dot{W}_{PV-T,pompa} = \dot{m}_6 h_6 & (19a) \\ \text{Entropi} \quad & \dot{m}_5 s_5 + \dot{S}_{\text{üretim,PV-T,pompa}} = \dot{m}_6 s_6 & (19a) \\ \text{Ekserji} \quad & \dot{m}_5 ex_5 + \dot{W}_{PV-T,pompa} = \dot{m}_6 ex_6 + \dot{E}x_{\text{yıkım,PV-T,pompa}} & (19a) \end{aligned}$$

Sisteme ait ekipmanlardan evaporatör Şekil 4’de ve kütle, enerji, entropi, ekserji balansları aşağıda verilmiştir.



Şekil 4. Evaporatör

$$\text{Kütle} \quad \dot{m}_2 + \dot{m}_9 = \dot{m}_3 + \dot{m}_{10} \quad (20a)$$

$$\text{Enerji} \quad \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_9 h_9 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_{10} h_{10} \quad (20b)$$

$$\text{Entropi} \quad \dot{m}_2 s_2 + \dot{m}_9 s_9 + \dot{S}_{\text{üretim,Kond}} = \dot{m}_3 s_3 + \dot{m}_{10} s_{10} \quad (20c)$$

$$\text{Ekserji} \quad \dot{m}_2 ex_2 + \dot{m}_9 ex_9 = \dot{m}_3 ex_3 + \dot{m}_{10} ex_{10} + \dot{E}x_{\text{yıkım,Kond}} \quad (20d)$$

Sisteme ait ekipmanlardan genişleme valfi Şekil 5’de ve kütle, enerji, entropi, ekserji balansları aşağıda verilmiştir.



Şekil 5. Genişleme valfi

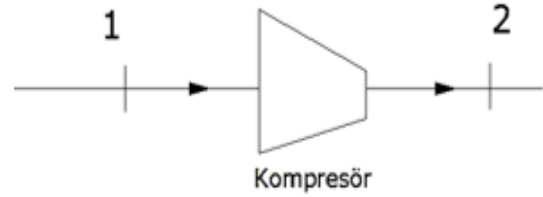
$$\text{Kütle} \quad \dot{m}_3 = \dot{m}_4 \quad (21a)$$

$$\text{Enerji} \quad \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_4 h_4 \quad (21b)$$

$$\text{Entropi} \quad \dot{m}_3 s_3 + \dot{S}_{\text{üretim,GV}} = \dot{m}_4 s_4 \quad (21c)$$

$$\text{Ekserji} \quad \dot{m}_3 ex_3 = \dot{m}_4 ex_4 + \dot{E}x_{\text{yıkım,GV}} \quad (21d)$$

Sisteme ait ekipmanlardan kompresör Şekil 6’de ve kütle, enerji, entropi, ekserji balansları aşağıda verilmiştir.



Şekil 6. Kompresör

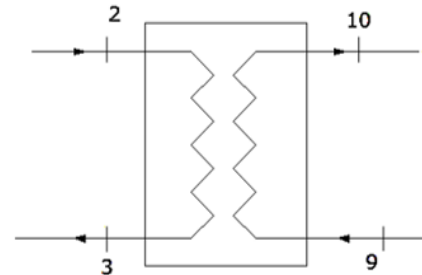
$$\text{Kütle} \quad \dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (22a)$$

$$\text{Enerji} \quad \dot{m}_1 h_1 + \dot{W}_{\text{Komp}} = \dot{m}_2 h_2 \quad (22b)$$

$$\text{Entropi} \quad \dot{m}_1 s_1 + \dot{S}_{\text{üretim,Komp}} = \dot{m}_2 s_2 \quad (22c)$$

$$\text{Ekserji} \quad \dot{m}_1 ex_1 + \dot{W}_{\text{Komp}} = \dot{m}_2 ex_2 + \dot{E}x_{\text{yıkım,Komp}} \quad (22d)$$

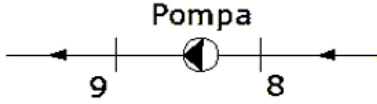
Sisteme ait ekipmanlardan kondenser Şekil 7’de ve kütle, enerji, entropi, ekserji balansları aşağıda verilmiştir.



Şekil 7. Kondenser

$$\begin{aligned} \text{Kütle} \quad & \dot{m}_2 + \dot{m}_9 = \dot{m}_3 + \dot{m}_{10} & (23a) \\ \text{Enerji} \quad & \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_9 h_9 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_{10} h_{10} & (23b) \\ \text{Entropi} \quad & \dot{m}_2 s_2 + \dot{m}_9 s_9 + \dot{S}_{\text{üretim,Kond}} \\ & = \dot{m}_3 s_3 + \dot{m}_{10} s_{10} & (23c) \\ \text{Ekserji} \quad & \dot{m}_2 ex_2 + \dot{m}_9 s_9 \\ & = \dot{m}_3 ex_3 + \dot{m}_{10} h_{10} + \dot{E}x_{\text{yıkım,Kond}} & (23d) \end{aligned}$$

Sisteme ait ekipmanlardan sirkülasyon pompası Şekil 8’de ve kütle, enerji, entropi, ekserji balansları aşağıda verilmiştir.

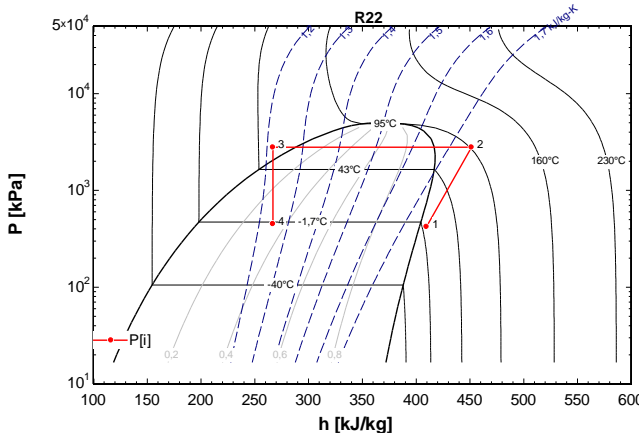


Şekil 8. Sirkülasyon pompası

$$\begin{aligned} \text{Kütle} \quad & \dot{m}_8 = \dot{m}_9 & (24a) \\ \text{Enerji} \quad & \dot{m}_8 h_8 + \dot{W}_{\text{pompa}} = \dot{m}_9 h_9 & (24b) \\ \text{Entropi} \quad & \dot{m}_8 s_8 + \dot{S}_{\text{üretim,pompa}} = \dot{m}_9 s_9 & (24c) \\ \text{Ekserji} \quad & \dot{m}_8 ex_8 + \dot{W}_{\text{pompa}} = \dot{m}_9 ex_9 + \dot{E}x_{\text{yıkım,pompa}} & (24d) \end{aligned}$$

3 Bulgular ve tartışma

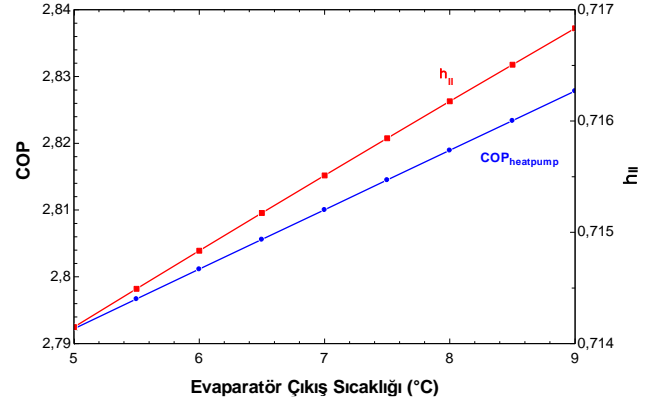
PV-T destekli ısı pompasında kullanılan R22 akışkanına ait P-h diyagramı Şekil 9’da verilmiştir



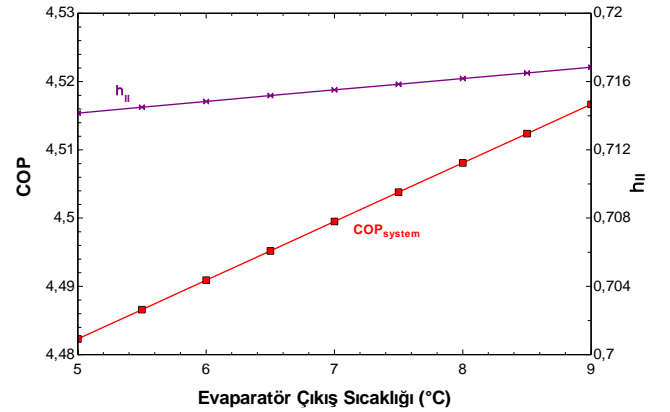
Şekil 9. R22 Soğutucu akışkan P-h diyagramı

Isı pompasının evaporator çıkış sıcaklığının değişimine bağlı olan COP ve I. Yasa verimi Şekil 10’da verilmiştir. Sistemin COP değerinin akışkanın evaporator sıcaklığına bağlı olarak değişim aralığı çok kısa olmaktadır. Bunun sebebi evaporator sıcaklığı aralığının 5 °C ile 9 °C arasında tutulmasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 10’de görüldüğü gibi evaporator çıkış sıcaklığı arttıkça ısı pompasının COP’ si artmakta, dolayısıyla sistemin I. Yasa verimi de artmaktadır. Evaporator çıkış sıcaklığına bağlı olarak değişimin sistemin COP’ sine ve II. Yasa verimine etkisi Şekil 11’de aşağıda verilmiştir.



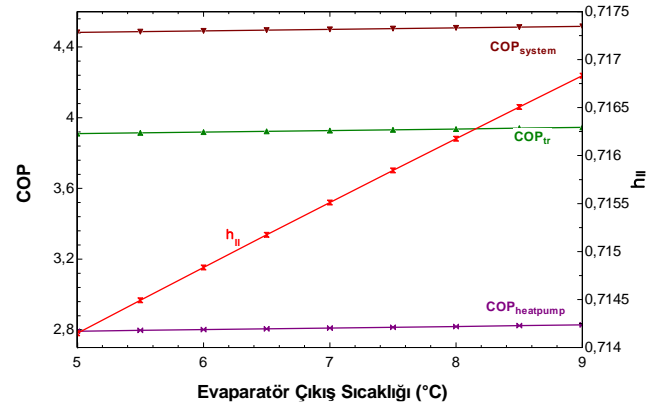
Şekil 10. Evaporator çıkış sıcaklığına bağlı COP değişimi



Şekil 11. Evaporator çıkış sıcaklığına bağlı sistem COP ve II. yasa verimi

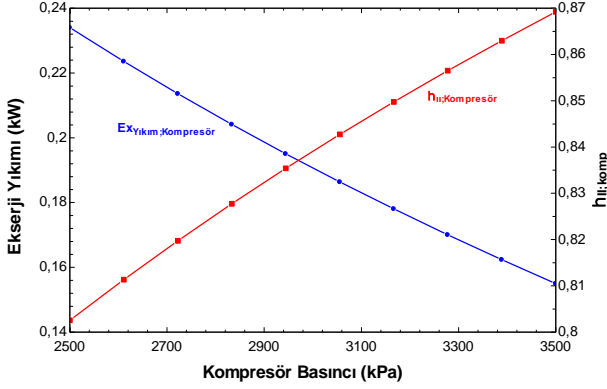
Şekil 11’de görüldüğü gibi evaporator çıkış sıcaklığının artması sistemin COP’ sini arttırmış ve doğal olarak bu artış sistemin ekserji veriminin de artmasına sebep olmuştur. Doğal olarak sistemin COP’si ısı pompasının COP’sinden büyük olmaktadır. Yapılan çoğu çalışmada sistem COP değerleri 3.5-5 aralığında çıktığı literatürde de görülmektedir.

Isı pompasının evaporatorünün çıkış sıcaklığının değişiminin sistemin ve ısı pompasının COP değişimine etkisi Şekil 12’de verilmiştir.



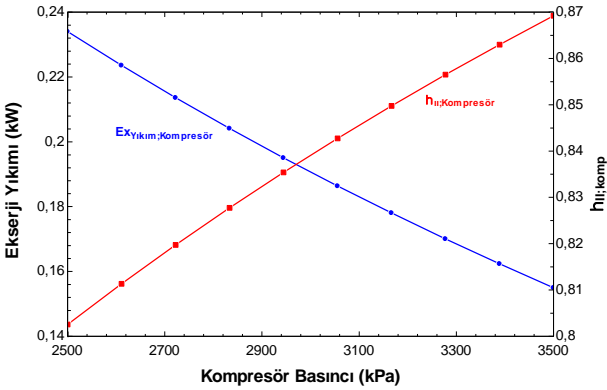
Şekil 12. Evaporator çıkış sıcaklığının COP değişimine etkisi

Evaporatörün çıkış sıcaklığının artması sistemin I. Yasa verimini görülür bir düzeyde artırırken sistemin COP' sini, ısı pompasının COP' sini ve COP_{tr} değerlerini çok az miktarda arttırdığı Şekil 12' de görülmektedir. Kompresör basıncı değişiminin ekserji yıkımı ve ekserji verimine etkisi Şekil 13' de verilmiştir.



Şekil 13. Kompresör basıncı değişiminin ekserji yıkımına ve ekserji verimine etkisi

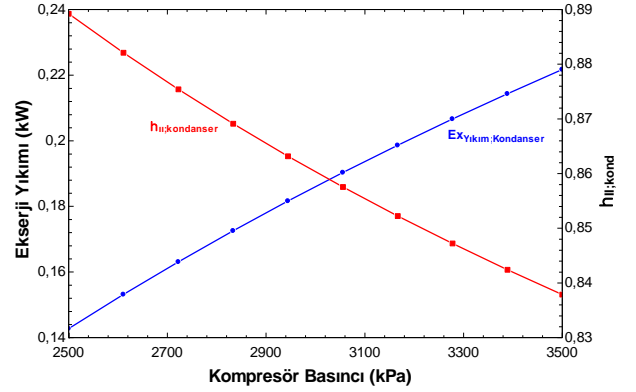
2500 kPa ile 3500 kPa aralığında değişen kompresör basıncının artması kompresördeki ekserji yıkımının azalmasına dolayısıyla II. Yasa veriminin diğer bir değişle ekserji veriminin artmasına sebep olmaktadır. Bu ekserji yıkımındaki azalma değeri 0.227 kW'dan 0.148 kW kadar düşmektedir. Evaporatör çıkış basıncının ekserji yıkımına ve ekserji verimine etkisi Şekil 14' de verilmiştir.



Şekil 15. Evaporatör çıkış basıncının ekserji yıkımına ve ekserji verimine etkisi

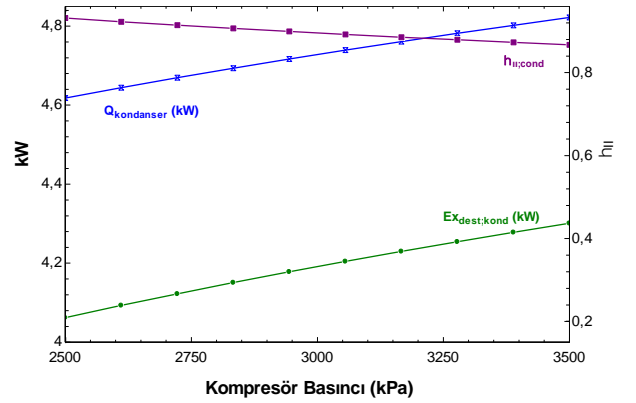
Isı pompasının evaporatör çıkış basıncının artırılması evaporatörün ekserji yıkımını azaltırken II. Yasa verimini arttırdığı Şekil 15' de görülmektedir. Evaporatör çıkış basıncının 500 kPa ile 550 kPa arasında değişimi, evaporatörün ekserji veriminin % 87.8'den % 91.7' ye artmasına sebep olmuştur.

Kompresör basıncı değişiminin kondenser ekserji yıkımına ve verimine etkisi Şekil 16' de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi kompresör basıncı 2500 kPa'dan 3500 kPa çıkartıldığında, kondenserin ekserji yıkımı % 83.2'den % 87.9'a arttığı görülmüştür



Şekil 16. Kompresör basıncı değişiminin kondenser ekserji yıkımına ve verimine etkisi

Şekil 16'de görüldüğü gibi ısı pompasının kompresör basıncının artırılması kondenserdeki ekserji yıkımını arttırmakta ve kondenserin ekserji verimini azaltmaktadır. Kompresör basıncı değişiminin kondenserin ekserji yıkımına, ekserji verimine ve kondensere atılan ısı miktarına etkisi Şekil 17' de verilmiştir

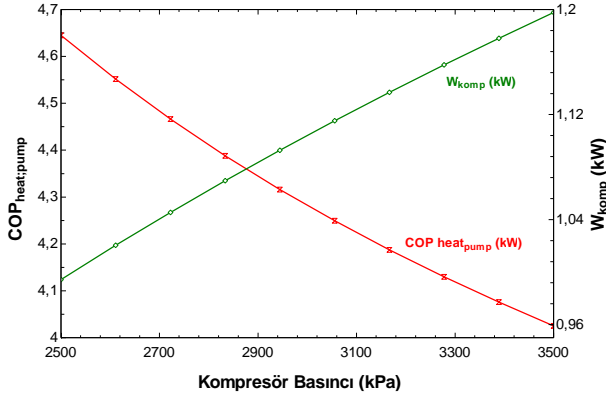


Şekil 17. Kompresör basıncı değişiminin kondenserin ekserji yıkımına ve verimine etkisi

Şekil 17' de görüldüğü gibi ısı pompasının kompresördeki basıncının artırılması kondensere atılan ısı enerjisi miktarını artırırken aynı zamanda kondenserin ekserji yıkımını da arttırmaktadır. Bundan dolayı ekserji yıkımının artması ekserji verimini azaltacağından kondenserdeki ekserji verimi de kompresör basıncının artmasıyla azalmıştır.

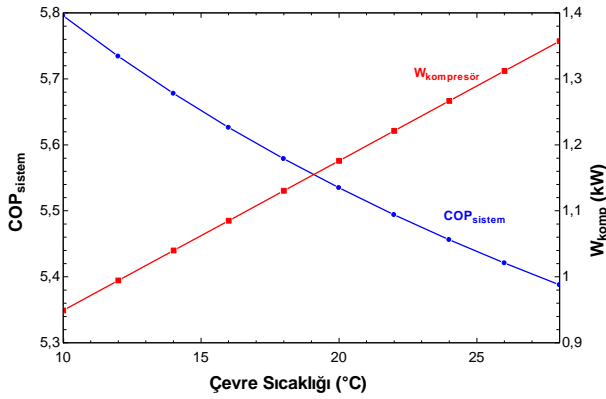
Kompresör basıncının değişiminin ısı pompasının COP' sine etkisi ve kompresörün çektiği güce etkisi Şekil 18' de aşağıdaki gibi verilmiştir.

Şekil 18' de ısı pompasının kompresör basıncının artırılması için daha fazla iş verilmesi gerektiği görülmektedir. Ayrıca yine Şekil 18' de ısı pompasının COP değişiminin kompresör basıncının artmasıyla azaldığı görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi kompresör basıncının 2500 kPa ile 3500 kPa arasında değişiminin, ısı pompasının kompresörünün çektiği elektrik enerjisine 0.5 kW daha fazla yük çekmesine sebep olmuştur.



Şekil 18. Kompresör basıncının değişiminin COP ve harcanan işe etkisi

Isı pompası sisteminin çalıştığı dış ortam sıcaklığının değişiminin sistemin COP'sine etkisi ve kompresörün çalıştırılması için verilmesi gereken işe etkisi Şekil 19' da verilmiştir.



Şekil 19. Çevre sıcaklığının COP ve kompresör işine etkisi

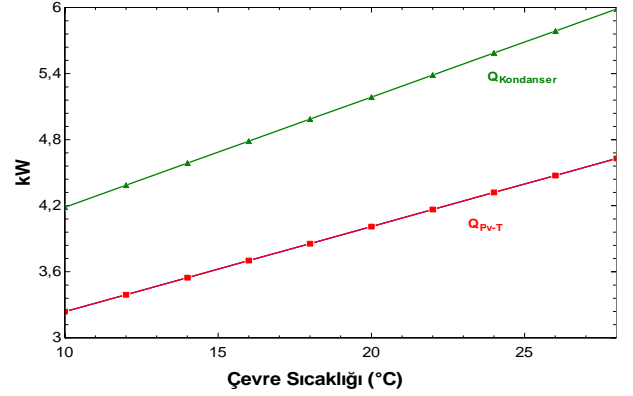
Şekil 19' da görüldüğü gibi çevre sıcaklığının artması sistemin COP değerinin azalmasına sebep olmaktadır. Çevre sıcaklığının artması kompresör emişindeki havanın enerjisini arttıracığından dolayı aynı şartlarda çalıştırılan havanın kompresörde sıkıştırılması zorlaşacağından Şekil 19' da görüldüğü gibi hava sıcaklığının artması kompresörde harcanan işin artacağını ifade etmektedir. Çevre sıcaklığının artırılması, sistemin COP değerinin 5.8' den 5.35'e düşmesine sebep olmuştur.

Dış ortam sıcaklığının artması PV-T' den gelen ısıl enerjinin artmasına ve bu ısının ısı pompasına aktarıldıktan sonra kondensere atılmasının, çevre havası sıcaklığına bağlı değişim grafiği Şekil 21.' de verilmiştir.

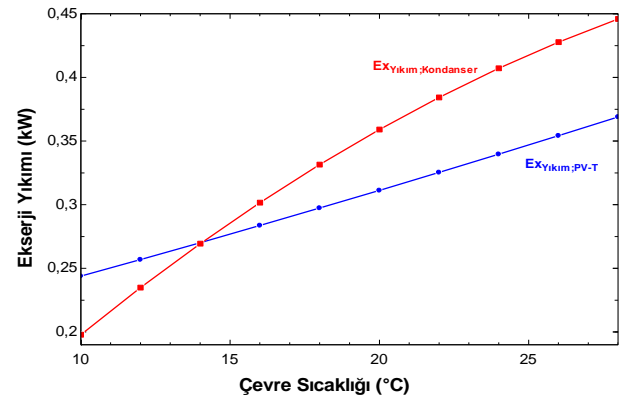
Şekil 20' de görüldüğü gibi çevre sıcaklığının artması PV-T' den gelen ısıl enerjisinin artmasına sebep olduğu görülmektedir. Isı pompasına destek olarak sağlanan bu PV-T kollektörden gelen ısıl enerjisi kondensere atılacağı için doğal olarak kondenser de ısıl enerjisinde artışa sebep olacaktır. Çevre sıcaklığının artması kondensere atılan ısısında artmasına sebep olmaktadır.

Dış ortam sıcaklığının artması PV-T arka yüzeyinde ve PV-T içerisinde dolaştırılan, ısı pompası kaynağına destek amaçlı kullanılan dolaşım suyunun sıcaklığı

arttıracığından dolayı PV-T deki ekserji yıkımı artmaktadır. Bu artış Şekil 21' de görülmektedir.



Şekil 20. Çevre sıcaklığının PV-T ve kondenser enerjisine etkisi



Şekil 21. Çevre sıcaklığının kondenser ve PV-T' nin ekserji yıkımına etkisi

Şekil 21' de görüldüğü gibi çevre sıcaklığının artması kondensere gelen ısıl yükü arttıracığından dolayı, çevre sıcaklığının artması kondensere ekserji yıkımının artmasına da sebep olacaktır.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada toprak kaynaklı ısı pompasına destek amaçlı 72 hücreli, tek kristal silisyum modül hücre paneline sahip 190W nominal güç üreten bir PV-T kollektör hesaplama için kullanılmıştır. PV-T kollektör yüzeyinden alınan ısı, ısı pompasına girdi olarak verilmiş ve aynı zamanda ısı pompası sisteminin çalışması için gerekli olan iş fotovoltaj kollektörden sağlanmıştır. Jeolojik yapının el vermediği ve elektrik hatlarının ulaştırılmadığı bölgelerde tasarlanması için bu sistem ele alınmıştır.

PV-T destekli ısı pompası sistemindeki her bir eleman için enerji ve ekserji analizleri EES (Engineering Equation Solver) programı yardımıyla yapılmıştır. Isı pompasının çalıştırılması için gerekli elektriksel güç 9 adet PV-T kollektörden sağlanmıştır. Ayrıca ısı pompası için gerekli olan ısıl enerjide bu 9 adet PV-T kollektörü yüzeyinden su ile dolaşım sağlanarak ısı pompasına aktarılması gerçekleştirilmiştir. Kullanılan PV-T hibrit sistemde toplam elektriksel güç 1422 W, toplam alınan ısıl güçte 4397 W'dır.

PV-T kollektörün ısı verimi 49.7, elektrik verimi 15.2 olarak hesaplanmıştır. PV-T kaynaklı ısı pompası sistemine kollektörlerin dahil edilmeden önceki verim değerine, uygulandıktan sonraki verim değerine katkısı % 67.9 olarak görülmüştür. Işınım şiddeti arttıkça toplam elektriksel gücün ve toplam alınan ısı gücün arttığı görülmüştür. Ayrıca ortam sıcaklığına göre elektriksel verim ve ısı veriminin değişimi incelenmiş ortam sıcaklığı arttıkça elektriksel verimin düştüğü, ısı veriminin arttığı görülmüştür. Yapılan bu çalışmada ısı pompası sisteminin COP si 4.41 olarak hesaplanmıştır. En yüksek ekserji yıkımının kondenserde olduğu görülmüştür. Isıtma amaçlı yapılan PV-T destekli ısı pompası sisteminde ısı güç olarak toplam 4686 W radyatör ısı gücü alınmıştır. Ayrıca, literatürde belirtilen benzer çalışmalarla ilgili karşılaştırmalarda, ortak ve yakın değerler yapılan analizlerde görülmüştür.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %15

Kaynaklar

- [1] M. Ö. Ültanır, 21. Yüzyılım eşiğinde güneş enerjisi. Bilim ve Teknik, 340, 50-55, 1996
- [2] Z. Şen, Temiz Enerji ve Kaynakları, Su Vakfı Yayınları, İstanbul, 2002
- [3] Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, Güneş enerjisi ve teknolojileri, www.yegm.gov.tr/yenilenebilir/g_enj_tekno.aspx Erişim Tarihi: 09.12.2019.
- [4] J. Yao, H. Xu, Y. Dai and M. Huang, Performance analysis of solar assisted heat pump coupled with build in PCM heat storage based on PV/T panel. Solar Energy, 197, 279-291, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.01.002>
- [5] A. N. Ozakin, K. Yakut and M. N. Khalaji, Performance analysis of photovoltaic-heat pump (PV/T) combined systems: A comparative numerical study. Journal of Solar Energy Engineering, 142, 2, 021010, 2020. <https://doi.org/10.1115/1.4045313>
- [6] J. Ji, H. He, T. Chow, G. Pei, G. He, W. He and K. Liu, Distributed dynamic modelling and experimental study of PV evaporator in a PV/T solar-assisted heat pump. International Journal of Heat and Mass Transfer, 52, 1365-1373, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.08.017>
- [7] J. Ji, K. Liu, T. Chow, G. Pei, W. He and H. He, Performance analysis of a photovoltaic heat pump Applied Energy, 85, 680-693, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.01.003>
- [8] J. Ji, K. Liu, T. Chow, G. Pei and H. He, Thermal analysis of PV/T evaporator of a solar-assisted heat pump. International Journal of Energy Research, 31, 525-545, 2007. <https://doi.org/10.1002/er.1264>
- [9] H. D. Fu, G. Pei, J. Ji, H. Long, T. Zhang and T. T. Chow, Experimental study of a photovoltaic solar-assisted heat pump/heat-pipe system. Applied Thermal Engineering, 40, 343-350, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.02.036>
- [10] R. Daghigh, M. H. Ruslan and K. Sopian, Advances in liquid based photovoltaic/thermal(PV/T) collectors. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 15, 4156-4170, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.028>
- [11] V. V. Tyagi, S. C. Kaushik and S. K. Tyagi, Advancement in solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector technology. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, 1383-1398, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.12.013>
- [12] P. Zhang, X. Rong, X. Yang and D. Zhang, Design and performance simulation of a novel hybrid PV/T-air dual source heat pump system based on a three-fluid heat exchanger. Solar Energy, 191, 505-517, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.09.024>
- [13] N. Shao, L. Ma and J. Zhang, Experimental investigation on the performance of direct-expansion roof-PV/T heat pump system. Energy, 195, 116959, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.116959>
- [14] J. Zhou, Z. Zhu, X. Zhao, Y. Yuan, Y. Fan and S. Myers, Theoretical and experimental study of a novel solar indirect-expansion heat pump system employing mini channel PV/T and thermal panels. Renewable Energy, 151, 674-686, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.054>
- [15] J. Zhou, X. Ma, X. Zhao, Y. Yuan, M. Yu and J. Li, Numerical simulation and experimental validation of a micro-channel PV/T modules based direct-expansion solar heat pump system. Renewable Energy, 145, 1992-2004, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.049>
- [16] A. A. Ammar, K. Sopian, M. A. Alghoul, B. Elhub and A. M. Elbreki, Performance study on photovoltaic/thermal solar-assisted heat pump system. Journal Thermal and Calorimetry, 136, 79-87, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7741-6>
- [17] B. Evangelos and T. Christos, Multi-objective optimization of a solar assisted heat pump-driven by hybrid PV. Applied Thermal Engineering, 149, 528-535, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.12.059>
- [18] N. F. N. Razali, A. Fudholi, M. H. Ruslan and K. Sopian, Experiment study of water based photovoltaic-thermal (PV/T) collector. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 9(1), 118-125, 2019. <http://doi.org/10.11591/ijece.v9i1.pp118-125>
- [19] S. C. Joe, Performance of a concentrating photovoltaic / thermal solar collector. Solar Energy, 78(2), 211-222, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.03.014>
- [20] Ö. Yamaç, Güneş enerjili destekli ısı pompalarının teorik incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay, Türkiye, 2005.
- [21] F. Duran, PV/T Hibrit sistemlerin termodinamik ve performans analizi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, Türkiye, 2014.
- [22] A. Fudholi, K. Sopian, M. Yazdı, I. Ruslan and H. Kazem, Performance analysis of photovoltaic thermal (PVT) water collectors. Energy Conversion and

- Management, 78, 641-651, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.11.017>
- [23] F. Benli, Fotovoltaik (PV) ve Fotovoltaik Termal (PV-T) kolektörlerinin deneysel olarak karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Osmaniye, Türkiye, 2018.
- [24] M. Caner, Yatay tüp topraklı ısı pompası sisteminin Sivas şartlarında değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas, Türkiye, 2018.
- [25] M. Al-Khalıdı, Toprak kaynaklı ısı pompası ile Isparta şartlarında bir ısıtma uygulaması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, Türkiye, 2018.
- [26] F. Horzum, Bir turizm tesisinde toprak kaynaklı ısı pompası sisteminin termodinamik analizi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, Türkiye, 2018.
- [27] I. Dincer and M. A. Rosen, Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development. Newnes, Oxford, UK, 2012.
- [28] A. Bejan, G. Tsatsaronis and M. J. Moran, Thermal Design and Optimization. John Wiley and Sons, 1996.
- [29] J. Szargut, D. R. Morris and F. R. Steward, Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes. Springer-Verlag, Berlin. 1987.
- [30] J. A. Duffie and W. A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Process. A Wiley-Interscience Publication, New York 2006.
- [31] B. J. Huang, T. H. Lin, W. C. Hung and F. S. Sun, Performance evaluation of solar photovoltaic thermal systems. Solar Energy, 70(Feb), 443-448, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0038-092x\(00\)00153-5](https://doi.org/10.1016/S0038-092x(00)00153-5)





YLD 2000 akma fonksiyonu parametrelerinin belirlenmesinde ardışık kuadratik programlama ve aktif set metotlarının performanslarının incelenmesi

Investigation of performances of sequential quadratic programming and active-set methods in the determination of YLD2000 yield function parameters

Bora Şener^{1,*} 

¹ Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34349, İstanbul Türkiye

Özet

Bu çalışmada, Yld2000 akma fonksiyonunun katsayılarının belirlenmesinde nümerik optimizasyon tekniklerinden ardışık kuadratik programlama ve aktif-set metotlarının performansları değerlendirilmiştir. Çalışmada iki alüminyum alaşımı (AA6111-T4, AA6181-T4) ve bir yüksek mukavemetli sac malzeme (DP980) seçilmiştir. Yöntemler, hata fonksiyonunu yakınsama hızlarına ve minimizasyon sırasında inceledikleri fonksiyon sayısına göre değerlendirilmiş olup, üç malzeme için de aktif-set metodunun ardışık kuadratik programlamaya göre daha başarılı olduğu belirlenmiştir. Metodu doğrulamak için, belirlenmiş katsayılara göre malzemelerin akma gerilmesi oranları, Lankford katsayılarının sac düzlemi içerisindeki değişimleri ve akma yüzeylerinin pozitif bölgeleri tahmin edilmiş ve teorik sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalardan malzemelerin düzlemsel anizotropilerinin ve pozitif bölgede akma yüzeylerinin başarılı bir şekilde tahmin edilebildiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Yld2000, Ardışık kuadratik programlama, Aktif-set metot, Düzlemsel anizotropi, Akma yüzeyleri

1 Giriş

Sac malzemeler, haddeleme prosesi sonrasında meydana gelen tercihli yönelme nedeniyle mekanik özelliklerinde anizotropi sergilemektedirler [1]. Plastik anizotropi, Lankford katsayısı (r değeri) olarak belirtilen bir parametre ile ifade edilmektedir ve çekme testinde %15'lik bir mühendislik gerinim değerinde numunenin genişlik yönündeki plastik gerinimlerinin, kalınlık yönündeki plastik gerinimlerine oranı ile belirlenmektedir. Bu parametre, sacın incelmeye karşı direncini göstermektedir ve proses sırasında malzeme akışı, sınır gerinim değerleri üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Bu nedenle, sonlu eleman analizlerinden gerçekçi sonuçlar elde edebilmek için malzeme anizotropisinin doğru bir şekilde tanımlanabilmesi gerekmektedir. Sonlu eleman analizlerinde sac malzemenin plastik davranışı ve anizotropisi düzlem gerilmeli ortotropik akma kriterleriyle tanımlanmaktadır. Literatürde ilk anizotropik akma kriteri 1948 yılında Hill tarafından önerilmiştir [2]. Hill48 akma kriteri, düzlem gerilme hali için

Abstract

In this study, performances of sequential quadratic programming and active-set methods from numerical optimization techniques were investigated in the determination of Yld2000 yield function coefficients. Two aluminum alloys (AA6111-T4, AA6181-T4) and a high strength steel sheet material (DP980) were selected in the study. Methods were examined according to their convergence rate and the number of function evaluations that occurred during the minimization and it was determined that active-set method was more successful than sequential quadratic programming for three materials. The variations of the yield stress ratios and Lankford coefficients in the sheet plane and positive regions of yield surfaces of the materials were predicted and theoretical results were compared with experimental results to validate the method. It is seen from the comparisons that planar anisotropy and yield surfaces of the materials in the positive regions could be successfully predicted.

Keywords: Yld2000, Sequential quadratic programming, Active-set method, Planar anisotropy, Yield surfaces

4 katsayıya sahiptir ve bu katsayılar analitik olarak kolayca belirlenebilmektedir. Ancak, kriter yüksek anizotropiye sahip Al alaşımları, Ti alaşımları ve yüksek mukavemetli çelikler için doğru sonuçlar verememektedir. 2000 yılından itibaren bu malzemelerin anizotropik davranışlarının modellenmesi için yüksek sayıda katsayıya sahip gelişmiş akma kriterleri önerilmektedir [3]. Bu akma kriterlerine ait parametreler, nonlineer denklem sistemi oluşturmaktadır ve belirlenebilmeleri için çeşitli nümerik yöntemlerin uygulanması gerekmektedir [4]. Literatürde farklı akma kriterleri üzerinde farklı nümerik metotların uygulandığı ve başarılı sonuçların elde edilmiş olduğu çok sayıda çalışma bulunmaktadır.

Barlat vd. [5] AA 2090-T3 ve AA 6022-T4 alüminyum alaşımları için Yld2000 akma kriteri parametrelerinin belirlenmesinde Newton-Raphson (N-R) metodunu uygulamışlar ve malzemelerin anizotropik davranışlarını modelleyebilmişlerdir. Cazacu ve Barlat [6] 2001 yılında geliştirmiş oldukları Cazacu-Barlat (CB2001) akma kriterini

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: borasen@yildiz.edu.tr (B. Şener)

Geliş / Received: 16.11.2020 Kabul / Accepted: 15.02.2021 Yayımlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.826850

AA 2026-T3511 ve AA 6022-T4 alüminyum alaşımlarının modellenmesine uygulamışlar ve malzemelere ait model parametrelerini N-R metodu ile belirlemişlerdir. Benzer bir çalışma, Aretz vd. tarafından [7] Yld2003 kriteri için gerçekleştirilmiş ve N-R metodu ile araştırmacılar düşük karbonlu çelik, AA2090-T3 ve 5000 serisi alüminyum alaşımlarının düzlemsel anizotropilerini tanımlayabilmişlerdir. Yukarıda belirtilen çalışmalarda araştırmacılar N-R metodu ile başarılı sonuçlar elde edebilmişlerdir. Ancak N-R metodu ile nonlinear denklem sisteminin çözümünde her zaman çözüm elde edilememektedir. Metot, çözüme ulaşmak için her seferinde non-lineer denklem sisteminin Jacobienini hesaplamakta ve bunun tersini alarak değişkenlerin değerlerini belirlemektedir. Bu işlem, belli bir yakınsama sağlanıncaya kadar devam etmektedir. Bu nedenle metotun çözümü uzun sürmekte ve uygulaması pratik olmamaktadır. Ayrıca, bazı durumlarda sistemin Jacobieni tekil olmakta ve tersi alınmadığı için çözüm elde edilememektedir. Bununla birlikte metot, değişkenler için seçilen ilk değerlere bağlıdır ve eğer kökten uzak değerler seçilmişse N-R metodu global minimuma yakınsayamamaktadır [8]. N-R metodunun bu gibi dezavantajlı durumları nedeniyle, hata fonksiyonunun minimizasyonu alternatif bir tanımlama yöntemi olarak geliştirilmiş ve çalışmalarda kullanılmıştır. Banabic vd. [9], 2000 yılında geliştirmiş oldukları Banabic-Balan-Comsa (BBC2000) modeline ait parametreleri belirlemek için inişli simpleks algoritmasını kullanmışlar ve 6000 serisi alüminyum alaşımlarının anizotropik davranışlarını modellemişlerdir. Aretz [10], Yld2003 malzeme modeli parametreleri için hata fonksiyonunu en dik iniş optimizasyon yöntemi ile minimize etmiş ve AA2090-T3 ve AA6111-T4 alüminyum alaşımları için model parametrelerini belirlemiştir. Comsa ve Banabic [11] AA2090-T3 alüminyum alaşımının anizotropik davranışını BBC2008 akma kriteri ile tanımlamışlar ve Levenberg-Marquardt algoritması ile hata fonksiyonunu minimize ederek model parametrelerini tespit etmişlerdir. Hata fonksiyonunun minimizasyonunda türev içeren metotlardan farklı olarak sezgisel algoritmalar da literatürde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu metotların içerisinde genetik algoritma çoğu araştırmacı tarafından optimizasyon problemlerinin çözümünde tercih edilmektedir. Kohar vd. [12] AA6063 alüminyum alaşımının plastik davranışını Yld2004 malzeme modeline göre modellemişler ve genetik algoritma ile hata fonksiyonunu minimize ederek model parametrelerini tespit etmişlerdir. Abedini vd. [13] AA2090-T3 ve AA7075-T6 için yaptıkları çalışmada, genetik algoritma ile Yld2000 malzeme modelinin katsayılarını kalibre etmişlerdir. Kılıç vd. [14] genetik algoritma, en küçük kareler ve kısıtlı optimizasyon yöntemlerini kullanarak Yld2000 kriterinin katsayılarını AA7003-T6 ve AA6063-T6 alüminyum alaşımları için belirlemişler ve ayrıca yöntemlerin ilk değere olan bağlılıklarını da incelemişlerdir.

Bu çalışmada, Yld2000 malzeme modelinin parametrelerinin tanımlanmasında nümerik optimizasyon metotlarından ardışık kuadratik programlama ve aktif set metotlarının performansları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma

AA6111-T4, AA6181-T4 alüminyum alaşımları ve DP980 çift fazlı çelik için gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırmada metotların yakınsaması ve minimizasyon sırasında değerlendirdikleri fonksiyon sayısı dikkate alınmıştır. Performans değerlendirmesinin ardından, malzemeler için belirlenmiş olan Yld2000 katsayılarıyla malzemelerin düzlemsel anizotropileri ve akma yüzeylerinin pozitif bölgeleri tahmin edilmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Çalışma 4 bölümden oluşmakta olup, 2. Bölümde Yld2000 malzeme modeli, ardışık kuadratik programlama ve aktif set metotları hakkında bilgi verilmiş, 3. Bölümde her iki optimizasyon metodu malzemelere uygulanmış, metotlar karşılaştırılmış ve her iki metoda göre belirlenmiş Yld2000 katsayıları kullanılarak, malzemelerin akma gerilmesi oranlarının ve Lankford katsayılarının sac düzlemi içerisindeki değişimleri tahmin edilmiş ve teorik sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çalışmanın son bölümünde ise elde edilen sonuçlar yorumlanmış ve malzemeler için en uygun yöntem belirlenmiştir.

2 Materyal ve metot

Bu çalışmada, otomotiv endüstrisinde kullanılan AA6111-T4, AA6181-T4 alüminyum alaşımları ve DP980 çift fazlı çelik test malzemesi olarak seçilmiştir. Belirtilen malzemelerin anizotropik davranışlarının tanımlanmasında Yld2000 malzeme modeli kullanılmıştır. Aşağıda YLD2000 akma fonksiyonu ve çalışma kapsamında uygulanan ardışık kuadratik ve aktif-set nümerik optimizasyon yöntemleri anlatılmaktadır.

2.1 Yld2000 akma fonksiyonu

Yld2000 kriteri, lineer dönüşüm yaklaşımına dayalı olarak geliştirilmiş bir anizotropik akma fonksiyonudur ve **Denklem (1)**' de ifade edilmektedir.

$$|\tilde{s}'_1 - \tilde{s}'_2|^a + |2\tilde{s}''_2 + \tilde{s}''_1|^a + |2\tilde{s}''_1 + \tilde{s}''_2|^a = 2\bar{\sigma}^a \quad (1)$$

Eşdeğer olarak akma fonksiyonu efektif gerilme cinsinden aşağıdaki gibi yazılır.

$$\bar{\sigma} = \left\{ \frac{1}{2} (|\tilde{s}'_1 - \tilde{s}'_2|^a + |2\tilde{s}''_2 + \tilde{s}''_1|^a + |2\tilde{s}''_1 + \tilde{s}''_2|^a) \right\}^{1/a} \quad (2)$$

Bu eşitliklerde, \tilde{s}'_1 , \tilde{s}'_2 ve \tilde{s}''_1 , \tilde{s}''_2 dönüşüme uğramış deviatörük tensörlerin (\tilde{s}' ve \tilde{s}'') asal değerlerini, a ise malzemenin kafes türünü belirten bir üsteli ifade etmekte olup, hacim merkezli kafes yapısına sahip malzemeler için 6, yüzey merkezli kafes yapısına sahip malzemeler için ise 8 alınmaktadır.

Dönüşüme uğramış deviatörük tensörler, düzlem gerilme hali ve ortotropik simetri gözönünde bulundurularak aşağıdaki gibi matris formunda yazılabilirler:

$$\tilde{s}' = \begin{bmatrix} \tilde{s}'_{xx} \\ \tilde{s}'_{yy} \\ \tilde{s}'_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{xx} \\ s_{yy} \\ s_{xy} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\tilde{s}'' = \begin{bmatrix} \tilde{s}_{xx}'' \\ \tilde{s}_{yy}'' \\ \tilde{s}_{xy}'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{4\alpha_5 - \alpha_3}{3} & \frac{2\alpha_6 - 2\alpha_4}{3} & 0 \\ 2\alpha_3 - 2\alpha_5 & 4\alpha_4 - \alpha_6 & 0 \\ 3 & 3 & \alpha_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{xx} \\ s_{yy} \\ s_{xy} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Düzlem gerilme hali için asal değerler yazılırsa, **Denklem (1)** deki üç mutlak değer içerisindeki ifadeler aşağıdaki gibi belirlenirler.

$$|\tilde{S}'_1 - \tilde{S}'_2| = 2 \sqrt{\left(\frac{\tilde{s}'_{xx} - \tilde{s}'_{yy}}{2}\right)^2 + \tilde{s}'_{xy}{}^2}$$

$$|2\tilde{S}''_2 + \tilde{S}''_1| = \frac{3}{2}(\tilde{s}''_{xx} + \tilde{s}''_{yy}) - \sqrt{\left(\frac{\tilde{s}'_{xx} - \tilde{s}'_{yy}}{2}\right)^2 + \tilde{s}'_{xy}{}^2} \quad (5)$$

Denklem (3) ve **Denklem (4)** deki ifadeler **Denklem (5)**'de yerine yazılırsa, akma fonksiyonunda bulunan mutlak değer içerisindeki ifadeler deviatörük gerilme bileşenlerine ve buradan da gerilme bileşenlerine bağlı olarak ifade edilmiş olurlar.

Yukarıdaki ifadelerde görüldüğü gibi Yld2000 akma fonksiyonunun tanımlanabilmesi için 8 katsayının belirlenmesi gereklidir. Bu katsayılardan altısı malzemenin haddeleme yönüne paralel, diyagonal ve dik yönlerindeki akma gerilmeleri ($\sigma_0, \sigma_{45}, \sigma_{90}$) ve Lankford katsayıları (r_0, r_{45}, r_{90}) ile belirlenmekte olup, ilgili mekanik özellikler tek eksenli çekme testleriyle tespit edilmektedir. Geriye kalan iki katsayı malzemenin iki eksenli akma gerilmesi (σ_b) ve Lankford katsayısı (r_b) ile belirlenmektedir. Bu parametreler ise sırasıyla şişirme ve disk basma testleri ile tespit edilmektedir [5, 15]. Bu çalışmada, Yld2000 akma fonksiyonunun katsayılarının belirlenmesinde hata minimizasyon prosedürü uygulanmıştır. Bu yöntemle göre, akma kriterinden tahmin edilen akma gerilmeleri ve Lankford katsayıları ile deneysel sonuçlar arasındaki farkların kareleri toplamından oluşan bir hata fonksiyonu tanımlanmıştır:

$$E(\alpha_i) = \sum_{j=1}^3 w_1 \left(\frac{\sigma_{\theta j}}{\sigma_{d j}} - 1\right)^2 + w_2 \left(\frac{\sigma_b}{\sigma_{bd}} - 1\right)^2 + \sum_{k=1}^3 w_3 \left(\frac{r_{\theta k}}{r_{dk}} - 1\right)^2 + w_4 \left(\frac{r_b}{r_{bd}} - 1\right)^2 \quad (6)$$

Bu ifadeye, σ_θ ve r_θ sırasıyla hadde yönüne göre θ açısında tahmin edilen akma gerilmesini ve Lankford katsayısını, σ_d ve r_d parametrelerin deneysel değerlerini, σ_b ve r_b ise iki eksenli akma gerilmesi ve Lankford katsayısını ifade etmektedir. Her iki parametre de akma fonksiyonu ve akış kuralına göre kriterden tahmin edilmektedir. Eşitlikteki w katsayıları ise ağırlık katsayıları olup, bu çalışmada 1 alınmıştır. Çalışmada hata fonksiyonu minimize edilerek ilgili malzemeler için Yld2000 kriterinin katsayıları belirlenmiştir. Minimizasyonda nümerik optimizasyon metodlarından ardışık kuadratik programlama ve aktif set

metotları uygulanmıştır. Belirtilen metodlar alt bölüm 2.2'de açıklanmaktadır.

2.2 Ardışık kuadratik programlama

Ardışık kuadratik programlama metodu, arama yönünün belirlenmesi ve ardından belirlenen yön boyunca adım uzunluğunun hesaplanması olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Metot, arama yönünü belirleyebilmek için her iterasyonda bir kuadratik programlama altproblemini çözmektedir. Metotta, öncelikle Lagrange fonksiyonu aracılığıyla kuadratik programlama altproblemi formüle edilmektedir. Altproblem aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$\min \bar{f} = \frac{1}{2} d^T H_k d + \nabla f(x_k)^T d$$

$$\nabla g_i(x_k)^T d + g_i(x_k) = 0, i = 1, \dots, m \quad (7)$$

$$\nabla g_i(x_k)^T d + g_i(x_k) \leq 0, i = 1, \dots, m$$

Burada Lagrange fonksiyonunun kritik noktaları Newton metodu ile belirlenmekte ve istenilen yakınsama sağlanıncaya kadar kuadratik altproblemlerin çözümüne devam edilmektedir.

2.3 Aktif set metodu

Aktif set metodu kuadratik programlama problemlerinin çözümünde kullanılan yaklaşımlardan birisidir. Metotta ilk olarak optimum aktif setin (A) tahmini ile başlanır. Mevcut aktif set kümesinden bir indeks çıkarmak için türev ve Lagrange çoğaltıcıları kullanılır. Bir sonraki nokta aşağıdaki eşitliğe göre belirlenir:

$$x_{k+1} = x_k + \alpha_k d_k \quad (8)$$

Burada α_k adım uzunluğunu ve d_k ise kuadratik programlama altprobleminin çözümünden elde edilen arama yönünü göstermektedir. Bu altproblem, çalışma seti olarak adlandırılan (W_k) ve eşitlik olarak dayatılmış olan kısıtlamaların bir alt kümesine sahiptir. Metotta, Karush-Kuhn-Tucker (KKT) koşullarına göre tüm Lagrange çoğaltıcıları pozitif olana ya da optimum koşullar sağlanana kadar yeni değerler hesaplanmakta ve çalışma seti güncellenmektedir. Optimizasyon problemi aşağıdaki gibi formüle edilir:

$$\min_{d_k} f(d_k) = \frac{1}{2} d_k^T Q d_k + g_k^T d_k \quad (9)$$

s.to:

$$a_i^T(x_k) = b_i, i \in W_k \quad (10)$$

Çalışma setinde tüm i indisleri için a_i^T içeren matris A ile ifade edilirse;

$$A = [a_i^T], i \in W_k \quad (11)$$

Lagrange fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılır:

$$L(d_k, \lambda) = \frac{1}{2} d_k^T Q d_k + g_k^T d_k + \lambda^T A d_k \quad (12)$$

KKT birinci-derece optimallik koşuluna göre;

$$\frac{\partial L}{\partial d_k} = Qd_k + g_k + A^T \lambda = 0 \quad (13)$$

$$Ad_k = 0 \quad (14)$$

Bu ifade matris formunda aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{bmatrix} Q & A^T \\ A & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_k \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -g_k \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Lineer denklem sisteminin çözümü ile yön d_k ve Lagrange çöğaltıcıları belirlenir [16].

3 Bulgular ve tartışma

Bu bölümde, yukarıda anlatılan nümerik optimizasyon yöntemleri hata fonksiyonunun minimizasyonunda uygulanmış ve AA6111-T4 ($t = 1\text{ mm}$), AA6181-T4 ($t = 1.13\text{ mm}$) ve DP980 ($t = 1.2\text{ mm}$) malzemeleri için Yld2000 akma fonksiyonunun katsayıları belirlenmiştir. Malzemelerin mekanik özellikleri literatürden alınmış olup, sırasıyla **Tablo 1**, **Tablo 2** ve **Tablo 3**'de sunulmuştur.

Tablo 1. AA6111-T4 alaşımının mekanik özellikleri [17]

σ_0	σ_{15}	σ_{30}	σ_{45}	σ_{60}	σ_{75}	σ_{90}	σ_b
194.1	189.6	182.2	177.9	176.5	175.0	173.4	184.2
r_0	r_{15}	r_{30}	r_{45}	r_{60}	r_{75}	r_{90}	r_b
0.894	0.885	0.743	0.611	0.611	0.627	0.660	1.225

Tablo 2. AA6181-T4 alaşımının mekanik özellikleri [18]

σ_0	σ_{45}	σ_{90}	σ_b	r_0	r_{45}	r_{90}	r_b
142	138	137	134	0.672	0.606	0.821	0.820

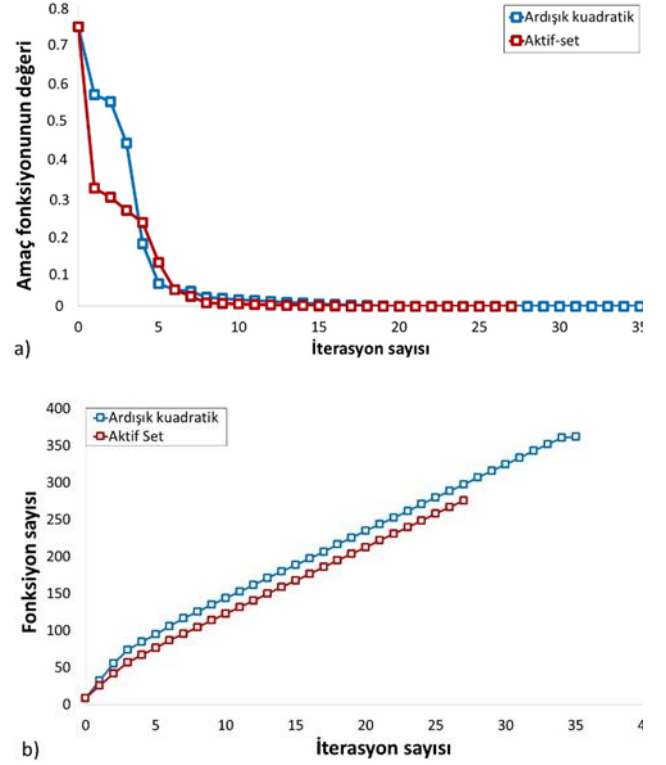
Tablo 3. DP980 malzemenin mekanik özellikleri [19]

σ_0	σ_{15}	σ_{30}	σ_{45}	σ_{60}	σ_{75}	σ_{90}	σ_b
684.2	676.9	669.9	676.6	685.2	691.4	701.5	691.04
r_0	r_{15}	r_{30}	r_{45}	r_{60}	r_{75}	r_{90}	r_b
0.691	0.760	0.888	1.050	1.080	1.020	0.959	0.879

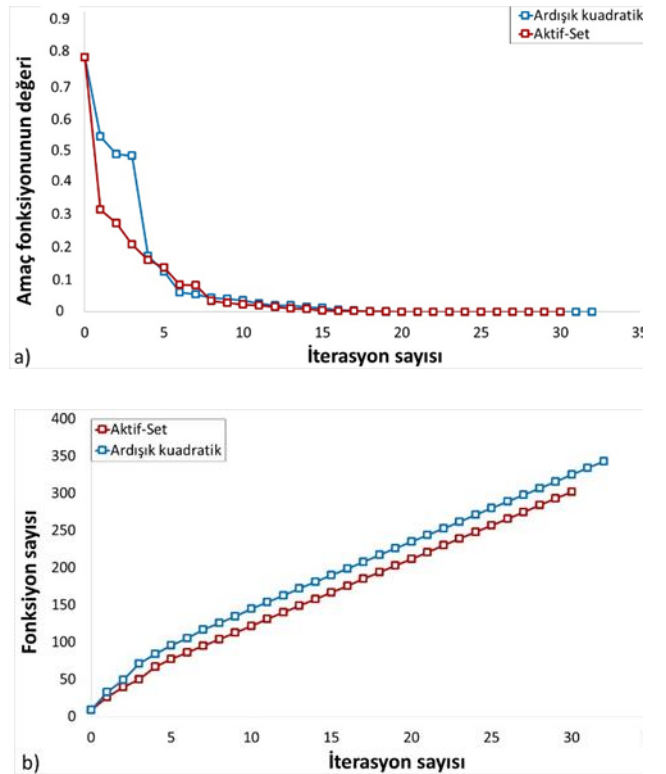
Çalışmada ilk olarak iki yöntemin performansları değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonuçları gözönünde bulundurulmuş ve ardından her iki metoda göre Yld2000 akma kriterinden tahmin edilen sonuçlar doğrulama için deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

3.1 Yöntemlerin performanslarının değerlendirilmesi

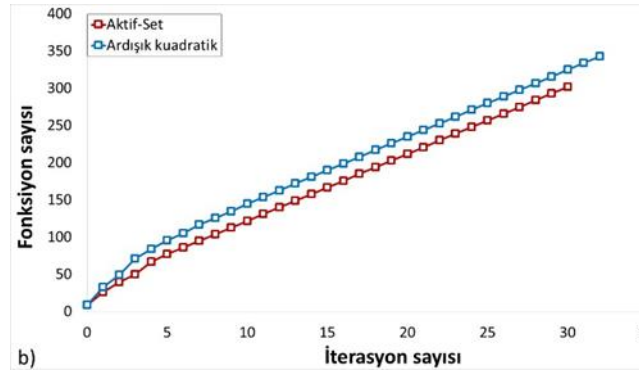
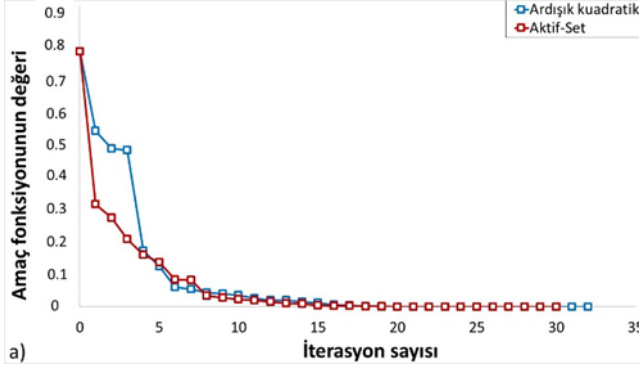
Ardışık kuadratik ve aktif set optimizasyon yöntemlerinin değerlendirilmesinde, yöntemlerin minimizasyon sırasında yakınsamaları ve değerlendikleri fonksiyon sayıları dikkate alınmıştır. Test edilen üç malzeme için elde edilen sonuçlar sırasıyla **Şekil 1**, **2** ve **3**'de gösterilmektedir.



Şekil 1. AA6111-T4 alaşımı için yöntemlerin karşılaştırılması a) amaç fonksiyonunun değışımi, b) değerlendirilen fonksiyon sayısı



Şekil 2. AA6181-T4 alaşımı için yöntemlerin karşılaştırılması a) amaç fonksiyonunun değışımi, b) değerlendirilen fonksiyon sayısı



Şekil 3. DP980 için yöntemlerin karşılaştırılması a) amaç fonksiyonunun değeri, b) değerlendirilen fonksiyon sayısı

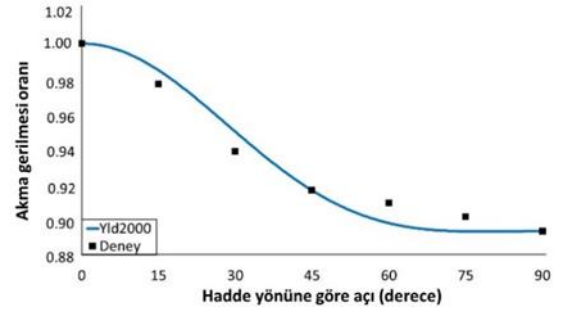
Şekil 1, 2 ve 3'ten görüldüğü gibi her iki yöntem de tüm malzemeler için global minimuma yakınsamıştır. Burada, aktif-set metodunun tüm test malzemelerinde daha az iterasyon sayısı ile yakınsayabildiği görülmektedir. Bu sonuç aktif set-metodunun ardışık kuadratik programlamaya göre daha hızlı bir yöntem olduğunu göstermektedir. Minimizasyon sırasında, değerlendirilen amaç fonksiyonu sayısına bakıldığında ise, aktif set metodunun üç malzeme için de aynı iterasyon sayısında ardışık kuadratik programlamaya göre daha az sayıda fonksiyon değerlendirdiği görülmektedir. Bu da metodun verimliliğini göstermektedir.

3.2 Deneysel sonuçlarla karşılaştırma

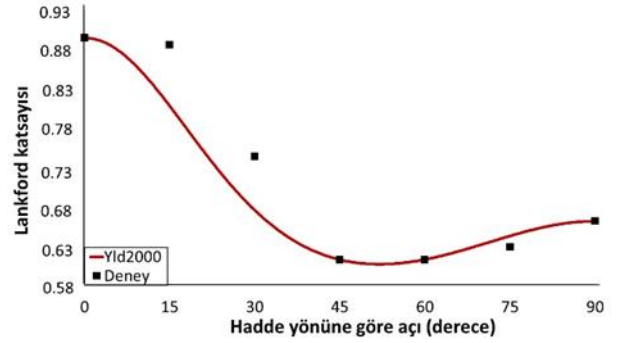
Metotların doğrulamasında, her iki optimizasyon yöntemi test edilen tüm malzemeler için uygulanmış ve malzemelerin Yld2000 katsayıları belirlenmiştir. Ardından malzemelerin akma gerilmesi oranı, Lankford katsayılarının hadde yönüne göre değişimleri ile akma yüzeylerinin pozitif bölgeleri tahmin edilmiş ve teorik sonuçlar deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Çalışmada, aynı malzeme için her iki yöntemden elde edilen model parametrelerinin aynı olduğu görülmüş olup, malzemeler için belirlenmiş katsayılar ve karşılaştırma sonuçları aşağıda sunulmuştur.

Tablo 4. AA6111-T4 alaşımının Yld2000 katsayıları

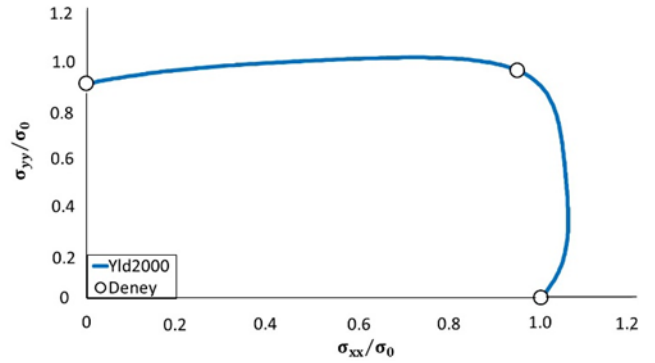
α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8
0.898	1.169	0.945	1.099	1.035	1.108	1.037	1.207



Şekil 4. Akma gerilmesi oranının açığa göre değişimi



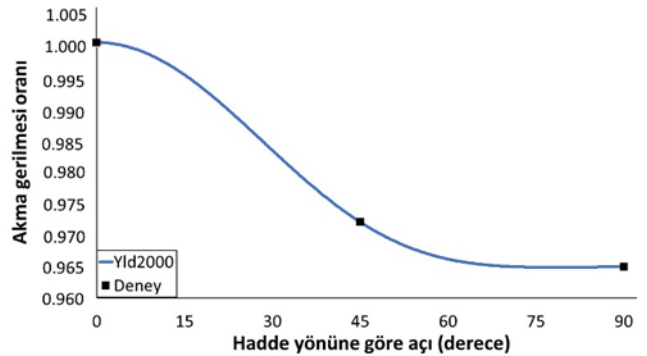
Şekil 5. Lankford katsayısının açığa göre değişimi



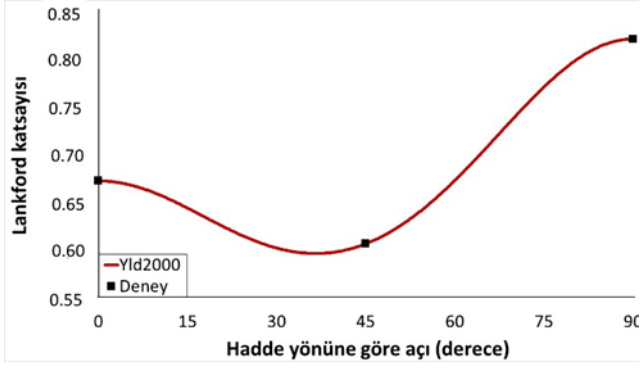
Şekil 6. Akma yüzeyinin pozitif bölgesi (AA6111-T4)

Tablo 5. AA6181-T4 alaşımının Yld2000 katsayıları

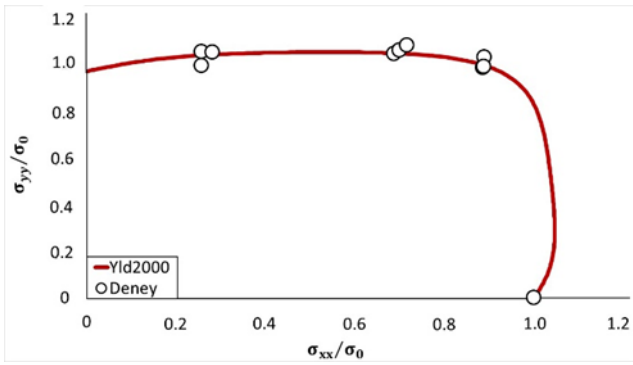
α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8
0.926	1.080	1.025	1.039	1.050	1.142	0.993	1.056



Şekil 7. Akma gerilmesi oranının açığa göre değişimi



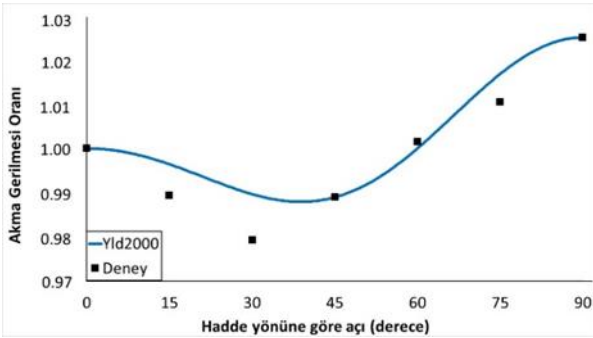
Şekil 8. Lankford katsayısının açığa göre değişimi



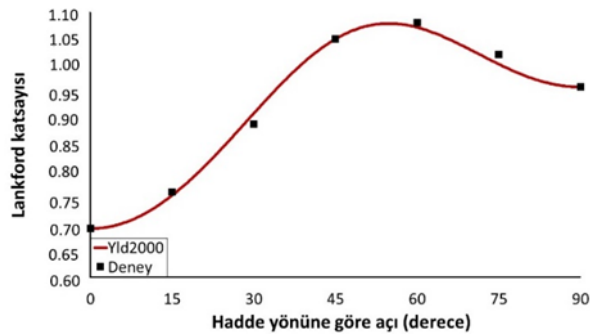
Şekil 9. Akma yüzeyinin pozitif bölgesi (AA6181-T4)

Tablo 6. DP980 malzemenin Yld2000 katsayıları

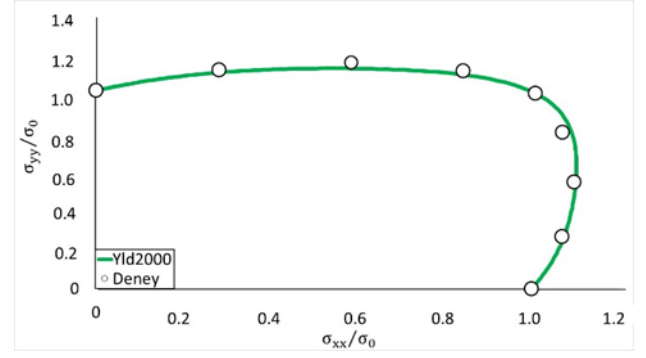
α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8
0.916	1.014	1.016	0.981	1.015	0.937	1.012	1.030



Şekil 10. Akma gerilmesi oranının açığa göre değişimi



Şekil 11. Lankford katsayısının açığa göre değişimi



Şekil 12. Akma yüzeyinin pozitif bölgesi (DP980)

Şekil 4-12'de görüldüğü gibi Yld2000 kriteri ile üç malzemenin akma gerilmesi oranları, Lankford katsayıları ve akma yüzeylerinin pozitif bölgeleri başarılı bir şekilde tahmin edilmiştir. Çalışmada, malzemelerin akma gerilmesi oranlarının belirlenmesinde, haddeleme yönüne paralel yöndeki akma gerilmesi referans alınmış ve diğer yönlerdeki gerilmeler referans değere göre normalize edilmiştir. AA6181-T4 alüminyum alaşımı ve DP980 çift fazlı çeliğe ait farklı iki eksenli gerilme oranlarındaki deneysel değerler literatürden alınmıştır [18-19].

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, Yld2000 malzeme modelinin katsayılarının belirlenmesinde nümerik optimizasyon yöntemlerinden ardışık kuadratik programlama ve aktif set metotları incelenmiş ve metotlar AA6111-T4, AA6181-T4 ve DP980 malzemeler üzerinde uygulanmıştır. Çalışmada elde edilen bulgulara dayanarak aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

- Yöntemler, minimizasyon sırasındaki yakınsama hızlarına ve değerlendirdikleri amaç fonksiyonu sayısına göre karşılaştırılmış olup, her iki durumda da üç malzeme için aktif-set metodunun ardışık kuadratik programlama metodundan daha başarılı olduğu görülmüştür.
- Doğrulama amacıyla, ilk olarak her iki yönetime göre malzemelerin Yld2000 katsayıları belirlenmiştir. Belirlenen katsayılar incelendiğinde, aynı malzeme için her iki yöntemin aynı sonuçlar verdiği görülmüştür. Ardından malzemelerin akma gerilmesi oranı, Lankford katsayılarının sac düzlemi içerisindeki değişimleri tahmin edilmiş ve teorik sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalarda, üç malzeme için tahmin edilen sonuçların deneysel sonuçlara oldukça yakın olduğu görülmüştür.
- Gerilme oranı ve Lankford katsayıları ile birlikte malzemelerin akma yüzeylerinin pozitif bölgeleri de tahmin edilmiş ve farklı iki eksenli gerilme oranlarındaki deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalarda üç malzemenin de akma yüzeylerinin pozitif bölgelerinin doğru bir şekilde tahmin edilebildiği görülmüştür.
- Tüm bu sonuçlara göre, Yld2000 katsayılarının belirlenmesinde aktif-set metodunun kullanılması hız ve doğruluk açısından önerilmektedir.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %11

Kaynaklar

- [1] G. E. Dieter, Mechanical Metallurgy. McGraw-Hill Book Company, 1988.
- [2] R. Hill, A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical and Physical Sciences, 193 (A), 281–297, 1948. <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0045>.
- [3] D. Banabic, Sheet Metal Forming Processes Constitutive Modelling and Numerical Simulation. Springer, 2010.
- [4] K. Mattiasson and M. Sigvant, An evaluation of some recent yield criteria for industrial simulations of sheet forming processes. International Journal of Mechanical Sciences, 50, 774-787, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2007.11.002>.
- [5] F. Barlat, J. C. Brem, J. W. Yoon, K. Chung, R. E. Dick, D. J. Lege, F. Pourboghra, S. H. Choi, and E. Chu, Plane stress yield function for aluminum alloy sheets-part 1: theory. International Journal of Plasticity, 19, 1297-1319, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0749-6419\(02\)00019-0](https://doi.org/10.1016/S0749-6419(02)00019-0).
- [6] O. Cazacu and F. Barlat, Application of the theory of representation to describe yielding of anisotropic aluminum alloys. International Journal of Engineering Science, 41, 1367-1385, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0020-7225\(03\)00037-5](https://doi.org/10.1016/S0020-7225(03)00037-5).
- [7] H. Aretz, O. S. Hopperstad, O-G. Lademo, Yield function calibration for orthotropic sheet metals based on uniaxial and plane strain tensile tests. Journal of Materials Processing Technology, 186, 221-235, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.12.037>.
- [8] J. S. Arora, Introduction to Optimum Design. Elsevier, 2004.
- [9] D. Banabic, T. Balan, D. S. Comsa, A new yield criterion for orthotropic sheet metals under plane-stress conditions. Proceedings of the 7th Conference, sayfa 217-224, Cluj Napoca, Romania, 11-12 May 2000.
- [10] H. Aretz, A non-quadratic plane stress yield function for orthotropic sheet metals. Journal of Materials Processing Technology, 168, 1-9, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.10.008>.
- [11] D. S. Comsa and D. Banabic, Plane-stress yield criterion for highly-anisotropic sheet metals, Proceedings of the 7th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes, sayfa 43-48, Interlaken, Switzerland, 1-5 September 2008.
- [12] C. P. Kohar, A. Brahme, J. Imbert, R. K. Mishra, and K. Inal, Effects of coupling anisotropic yield functions with the optimization process of extruded aluminum front rail geometries in crashworthiness. International Journal of Solids and Structures, 128, 174-198, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2017.08.026>.
- [13] A. Abedini, C. Butcher, T. Rahmaan, and M. J. Worswick, Evaluation and calibration of anisotropic yield criteria in shear loading: constraints to eliminate numerical artefacts. International Journal of Solids and Structures, 151, 118-134, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2017.06.029>.
- [14] S. Kılıç, İ. Kaçar, F. Öztürk, and S. Toros, Effects of different optimization methods on the predictions of Yld2000 yield criterion coefficients. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi 8, 447-463, 2019. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.517160>.
- [15] L. Lăzărescu, I. Nicodim, I. Ciobanu, D. S. Comşa, and D. Banabic, Determination of material parameters of sheet metals using the hydraulic bulge test. Acta Metallurgica Slovaca, 19, 4-12, 2013. <https://dx.doi.org/10.12776/ams.v19i1.81>.
- [16] Matlab Optimization Toolbox User' Guide. The MathWorks, Inc. 2016.
- [17] J. C. Brem and F. Barlat, Characterization of aluminum alloy (6111-T4). 5th International Conference and Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes, Jeju Island, Korea, 21-25 October 2002.
- [18] D. Banabic, H. Aretz, D. S. Comsa, and L. Paraianu, An improved analytical description of orthotropy in metallic sheets. International Journal of Plasticity, 21, 493-512, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2004.04.003>.
- [19] T. Kuwabara, Hole expansion of high strength steel sheet. 11th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes, Tokyo, Japan, 30 July-3 August 2018





CETP kompozitlerin ağaç matkabıyla delinme performanslarının deneysel incelenmesi

Experimental investigation of CETP composites with wooden drilling performance

Murat Koyunbakan^{1,*} , Ali Ünüvar² , Volkan Eskizeybek³ , Ahmet Avcı⁴ 

¹ Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 43500, Kütahya, Türkiye

² İstanbul Ticaret Üniversitesi, Endüstriyel Tasarım Bölümü, 34840, İstanbul, Türkiye

³ Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, 17020, Çanakkale, Türkiye

⁴ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, 42090, Konya, Türkiye

Özet

Cam elyaf takviyeli polimer (CETP) kompozit malzemeler sahip oldukları üstün özelliklerinden dolayı yeni ve önemli mühendislik malzemeleridir. Mekanik özellikleri, rijitlik/ağırlık oranlarından dolayı özellikle hafiflik istenilen mühendislik yapılarında vazgeçilmez yapısal malzemelerdir. Bu sayede CETP kompozit malzemeler endüstride sıklıkla kullanılmaktadır. Delme işlemi endüstride CETP kompozitlerin montajı için gerekli deliklerin elde edilmesinde en önemli prosestir. Delik kalitesine kesme parametrelerinin yanı sıra matkap geometrisinin etkisi de ele alınmalıdır. Bu çalışmada, farklı kesme parametreleri (kesme hızı, ilerleme) ve matkap geometrileri (farklı çaplar) ile delme işlemi gerçekleştirilmiştir. İtme kuvveti ile giriş ve çıkış yüzeyleri için deformasyon faktörü sonuçları elde edilmiştir. Ayrıca kesme parametrelerinin sonuçlara olan etkilerinin belirlenmesi için Taguchi metodu ve varyans analizi kullanılarak analiz yapılmıştır. Taguchi analizi için $L_9(3^{13})$ ortogonal deney tasarımı seçilmiş ve cevap tabloları kullanılmıştır. İtme kuvveti ve çıkış deformasyon faktörü için ilerlemenin, giriş deformasyon faktörü içinse matkap çapının daha etkin parametre oldukları tespit edilmiştir. Sonuçlar, CETP kompozit malzemelerin delinmelerinde bu yaklaşımın etkin bir şekilde uygulanabileceğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: CETP kompozit, Delme, İtme kuvveti, Deformasyon faktörü, Taguchi analizi, Varyans analizi

1 Giriş

Kompozit malzemelerin mühendislik alanında kullanılması gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Çünkü bu malzemelerin özgül mukavemet, rijitlik, yorulma sınırı, hafifliği ve son şekline yakın üretilebilmesi ve kalıplanması gibi özellikleri oldukça iyidir [1]. Kompozit malzemelerin sahip olduğu bu özellikler onların işlenebilirlik özellikleri konusunda da yoğun çalışmalar yapılmasını gerektirmekte

Abstract

Glass fiber reinforced polymer (CETP) composite materials are new and important engineering materials due to their superior properties. Due to their mechanical properties, rigidity / weight ratio, they are indispensable structural materials, especially in engineering structures where lightness is required. Therefore, GFRP composite materials are commonly used in industry. Drilling is an important process for obtaining the holes which is necessary for the assemblies of GFRP in industry. In addition to drilling parameters, the impact of drill geometry on the hole quality should be considered. In this paper, drilling process was carried out with different cutting parameters (cutting speed, feed rate) and drill geometries (different diameters). The obtained the results of thrust force and deformation factor for exit/entrance surface. Taguchi method and analyze of variance (ANOVA) was also applied to determine the effects of cutting parameters on experimental results. $L_9(3^{13})$ orthogonal experimental design was selected for analysis of Taguchi and response Tables was used. Besides the cutting parameters, the impact of drill geometry on the results are also discussed. It is obtained that feed rate governs the thrust force and exit deformation factor; however, the entrance deformation is driven by the drill bit diameter. The results show that this approach has been demonstrated can be used effectively for drilling of GFRP composite materials.

Keywords: GFRP composite, Drilling, Thrust force, Deformation factor, Analyzes of Taguchi, Analyzes of variance.

ve pek çok araştırmacı bu konuda çalışmaktadır [2]. Kompozit malzemeler her ne kadar son şekli verilerek üretilseler de yine de bazı talaşlı imalat işlemlerine tabi tutulmaktadırlar. Bu işlemlerden en fazla kullanılan yöntemse delme işlemidir. El Sonbaty ve diğ. [3], küçük bir motorlu uçakta 100000'in üzerinde delik bulunduğunu belirtmektedir. Endüstride kompozit elemanlar yaygın olarak matkapla konvansiyonel biçimde işlenmektedir [4].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: murat.koyunbakan@dpu.edu.tr (M. Koyunbakan)

Geliş / Received: 23.11.2020 Kabul / Accepted: 08.03.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.830262

Kompozit malzemelerde delme işlemi yapılırken karşılaşılan bazı problemler vardır. Bunların başında tabaka ayrılması ve elyaf sıyrılması gibi problemlerdir. Bu hasarlar, özellikle fiber takviyeli tabakalı kompozitlerde fiber yönüne ve tabaka simetrisinden kaynaklanan anizotropiden dolayı ortaya çıkmaktadır [5-7]. Tabaka ayrılması, iki komşu fiber tabakası arasında yer alan reçinece zengin bölgenin özellikle kalınlık yönünde yüklere maruz kaldığında tabakaların birbirinden ayrılması olarak ortaya çıkan, tabakalı kompozitlerde rijitliğin hasar oluşumu ile birlikte ani düşmesine neden olarak yapının fonksiyonunu yitirmesine neden olan bir hasar tipidir. Tabaka ayrılması hasarı üzerine yapılan çalışmalarda itme kuvvetlerinin bu hasarın oluşmasında etkin rol oynadığı tespit edilmiştir [8, 9].

Cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerin delinmesinde delik kalitesini artırmak üzere pek çok çalışma yapılmaktadır. Bunlardan bazıları da matkap uç geometrisinin değişiminin delik kalitesine olan etkilerinin incelenmesi üzerinedir. Can ve Ünüvar [10], çalışmalarında farklı kesme parametrelerinin cam elyaf takviyeli kompozitlerin delinmelerinde meydana gelen itme kuvvetleri ile giriş ve çıkış deformasyonları üzerine olan etkilerini incelemişlerdir. Matkap çapını 6 mm olarak seçmişler ancak uç açılarının değişiminin sonuçlara olan etkisini araştırmışlardır.

Yapılan çalışmalarda farklı kesme parametreleri (kesme hızı, ilerleme), kesici türleri (HSS, karbür vb.), ve kesici takım geometrilerinin delik kalitesine olan etkileri incelenmektedir. Abrao ve diğ. [11], farklı matkap uçları ve kesme parametreleri kullanarak yapmış oldukları çalışmada kesme hızı ve ilerleme oranına bağlı olarak meydana gelen itme kuvvetlerini ve oluşan deformasyonu incelemişlerdir. Latha ve diğ. [12], cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin delinmesinde üç farklı matkap uç geometrisi kullanarak itme kuvvetine olan etkilerini araştırmışlardır. En uygun sonuçların kademeli matkapla delmede elde edildiğini belirtmişlerdir. Rakesh ve diğ. [13], dört farklı matkap ucu kullanarak meydana gelen itme kuvvetlerini incelemişlerdir. Matkap uçlarının geometrisinin oluşan itme kuvvetleri ve hasarla büyük ölçüde ilişkili oldukları anlaşılmıştır.

Son zamanlarda elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi için matris içerisine nano partiküller ilave edilmektedir. Bu nano kompozitlerin işlenebilirliği üzerine de bazı çalışmalar yapılmaktadır. Kaybal ve diğ., karbon nano tüp katkılı ve katkısız karbon elyaf takviyeli polimer kompozitlerde kesme parametrelerinin delaminasyon oluşumu üzerine etkilerini ve işlenebilirliğini incelemişlerdir. Tepki yüzey metodoloji kullanarak kesme parametrelerinin etkilerini incelemişlerdir. Taguchi yöntemini kullanarak kesme parametrelerin etki dereceleri araştırılmıştır. Karbon elyaf takviyeli polimer kompozitlerin delinmelerinde delaminasyonun en aza indirilmesi için düşük ilerleme hızının yüksek kesme hızıyla kombinasyonunun gerekli olduğunu belirtmişlerdir [14]. Kaybal ve diğ., karbon fiber nano kompozit malzemelerin özelliklerinin geliştirilmesi için matris içerisine bor nitrür nano partikül ilavesi yapılmış ve daha sonra delme performanslarını araştırmışlardır. Bor nitrür nano partiküllerinin takviyesi ile itme kuvvetleri artmış olmasına

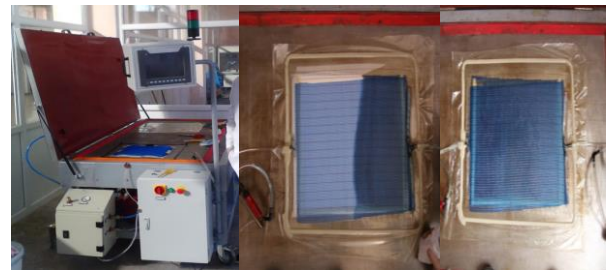
rağmen literatürün aksine deformasyon faktörü azalma eğilimi göstermiştir [15]. Köklü ve diğ. cam ve karbon elyaf takviyeli polimer kompozit malzemeler ile birlikte işlevsel olarak derecelendirilmiş kompozit malzemelerin delinme performanslarını araştırmışlardır. Üç malzeme de delme sırasında meydana gelen itme kuvveti, delaminasyon, delik çapı ve yuvarlaklık açısından karşılaştırılmıştır. Kesme kenarında 90° ve 110° iki açıya sahip karbür matkap kullanılmıştır. Derecelendirilmiş kompozit malzemelerde deliğin çıkışındaki delaminasyon deliğin çıkışına yerleştirilen malzemeden etkilenmiştir [16]. Gemi ve diğ., mekanik özelliklerini daha önce belirledikleri çeşitli cam ve karbon elyaf dizileri ile filaman sargılı hibrit kompozit boruların işlenebilirlik özelliklerini incelemişlerdir. Farklı ilerleme ve devir sayılarında yapılan deneylerde 8 mm çapında parmak freze kullanılmış ve karbon katmanının iki cam katman arasında istiflenmesi işlenebilirlik açısından daha iyi performans göstermiştir [17].

Bu çalışmanın amacı CETP kompozit malzemelerin farklı çaplarda iğne uçlu ağaç matkaplar ile delinmesinde meydana gelen itme kuvveti ve giriş-çıkış yüzeylerinde oluşan deformasyonun matkap çapı ve işlem parametrelerinden ne yönde etkilendiğini incelemektir.

2 Materyal ve metot

2.1 Kompozit levhaların üretilmesi

Deney numunelerinin üretilmesinde vakum infüzyon yöntemi kullanılmıştır. Üretilen kompozit numunelerin kalınlıkları yaklaşık 2.5 mm'dir ve 12 tabakadan oluşmaktadır. Kompozit numunelerin üretilmesinde laminasyon reçinesi kullanılmıştır. Alana bağlı yoğunluğu 200 gr/m² olan cam elyaf kumaşlar ile üretilen numunelerin ASTM D 3039 standardına uygun yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir. Yeterli miktarda epoksi ve sertleştirici (kütlece %25) tartılmıştır. Birbirine mekanik olarak karıştırıldıktan sonra 0.7 Bar vakum altında epoksinin cam elyaf kumaşları ıslatması sağlanmıştır. Daha sonra kompozit 50 °C'de 1 saat, 90 °C'de 1 saat ve 125 °C'de 4 saat olacak şekilde kürlenmiştir. Şekil 1'de vakum infüzyon ünitesi ve malzeme üretimi gösterilmiştir.



Şekil 1. Vakum infüzyon ünitesi ile malzeme üretimi

Tablo 1. Üretilen parçaların çekme testi sonuçları

Malzeme	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastikiyet Modülü (GPa)
Cam Elyaf/Epoksi	420	8

2.2 Delme işlemi

Delme deneyleri Mazak Variaxis 500 CNC işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. Matkap ucu olarak METABO firması tarafından üretilen 34CrAl6 yüksek alaşımlı çelik malzemeden yapılan ağaç matkabı seçilmiştir. Literatürde kompozit malzemelerin işlenmesinde matkap geometrisinin delik kalitesine olan etkilerini inceleyen pek çok çalışma mevcuttur [1, 2, 18]. Yapılan çalışmalar incelendiğinde farklı uç açlarına sahip standart HSS ve karbür matkapların yoğun olarak kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmalarda keskin uç geometrileri ile delik kalitesinde daha iyi sonuçların alındığı vurgulanmaktadır. Ağaç matkaplarının uç geometrileri metallerin işlenmelerinde kullanılan standart matkap uçlarından farklıdır. Kesme kenarları daha keskin olacak şekilde tasarlanmıştır. Bunun sebebi ağaç liflerini daha kolay kesebilmesi ve temiz bir delik yüzeyi oluşturması içindir. Ayrıca uç kısmındaki iğne ile merkezleme yapabilmektedir. Tabakalı kompozit malzemeler de yapı olarak ağaç malzemelere benzemektedirler. Metal malzemelerin delinmelerinde kullanılan standart matkap uçları ile yapılan bir takım delme işlemlerinde elyaf lifleri tam olarak kesilememekte bu yüzden delik giriş, çıkış ve iç yüzeylerinde çapak benzeri yapılar kalmaktadır. Bu ise hem delik kalitesi hem de görünüş açısından uygun olmayan bir durumdur. Cam elyaf takviyeli polimer kompozitlerin delinmelerinde farklı bir uç geometrisine sahip olan ağaç matkaplarının kullanımı bu tür problemler oluşturmayacağı düşünüldüğünden tercih edilmiştir. Seçilen matkapların görüntüleri Şekil 2’de verilmiştir. Deney numuneleri, yazarlar tarafından geliştirilen bağlama düzeneği olan çelik levhalar arasında delinmiştir. Bu levhalar KISTLER marka 9257B model dinamometre üzerine bağlanarak itme kuvvetleri ölçülmüştür. Şekil 3’te deneylerin yapıldığı işleme merkezi görülmektedir.

Deneyler, farklı kesme parametreleri kullanılarak kuru ortamda yapılmıştır. Kesme parametreleri Tablo 2’de verilmiştir. Delme deneyleri üç kez tekrarlanmıştır. Delme esnasında her bir deney için yeni ağaç matkabı kullanılmıştır.

Bu nedenle matkap uç geometrisinde meydana gelebilecek aşınmaların deney sonuçlarına olan etkisi önlenmiştir. Deney tasarımında deney sayısını azaltmak ve en ideal sonuçların elde edilebilmesi amacıyla uygun olan deney parametrelerinin belirlenebilmesi için Taguchi metodu kullanılmıştır. Bu çalışmada, $L_9 (3^{13})$ ortogonal deney tasarımı seçilmiştir. Ortogonal tasarım ve elde edilen sonuçlar Tablo 3’te görülebilir. Bunun yanı sıra, bağımsız değişkenlerin (deney parametreleri) bağımlı değişkenler (ölçülen sonuçlar) üzerindeki etkilerinin belirlenebilmesi için varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır.



Şekil 2. Ağaç delme matkaplarının görünümü



Şekil 3. İşleme merkezi ve deney düzeneği

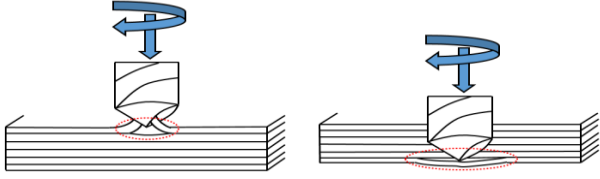
Tablo 2. Deney parametreleri ve seviyeleri

Deneyel Parametreler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Kesme hızı (m/dk)	50	67	90
İlerleme (mm/dev)	0.05	0.10	0.20
Matkap çapı (mm)	6	8	10

Tablo 3. Ortogonal dizinin kullanıldığı deneysel tasarım ve cevaplar

Deney No	Kesme Hızı (m/dk)		İlerleme (mm/dev)		Matkap Çapı (mm)		İtme Kuvveti (N)	Giriş Deformasyon Faktörü	Çıkış Deformasyon Faktörü
	Kod	Gerçek	Kod	Gerçek	Kod	Gerçek			
1	1	50	1	0.05	1	6	21.34	1.100494	1.245671
2	1	50	2	0.10	2	8	133	1.158684	1.419611
3	1	50	3	0.20	3	10	332	1.193927	1.503367
4	2	67	1	0.05	2	8	81.13	1.137712	1.42664
5	2	67	2	0.10	3	10	483.4	1.216756	1.517802
6	2	67	3	0.20	1	6	275.77	1.19352	1.599345
7	3	90	1	0.05	3	10	327.15	1.247579	1.502434
8	3	90	2	0.10	1	6	322.65	1.173695	1.484359
9	3	90	3	0.20	2	8	537.11	1.160563	1.948156

Tabakalı kompozit malzemelerin delinmelerinde giriş ve çıkış yüzeylerinde deformasyonlar meydana gelmektedir. Şekil 4'te oluşan mekanizma şematik olarak verilmektedir. Şekil de kırmızı elips içinde olan bölgelerde (Giriş ve çıkış yüzeylerindeki) deney numunesinin doğal renginden beyaza doğru renk değişimi şeklinde görülen hasarın tespit edilmesinde yaygın olarak kullanılan bir tahribatsız muayene tekniği olan deformasyon faktörünün belirlenmesi işlemi uygulanmaktadır. Maksimum hasar çapı ölçülerek matkap çapına orantılanması ile tespit edilmektedir.

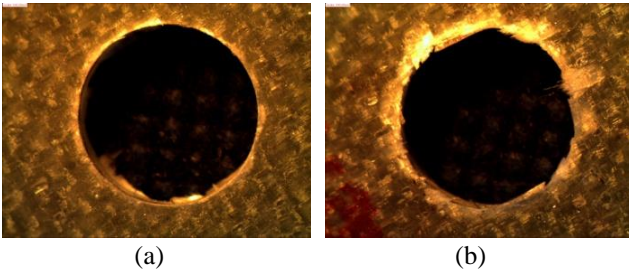


Şekil 4. Giriş ve çıkış yüzeylerinde oluşan deformasyonu meydana getiren mekanizmanın şematik resmi

Bu çalışmada delme işlemleri sonrası meydana gelen deformasyon faktörlerinin tespit edilmesi için Nikon Eclipse E100 optik mikroskop kullanılarak 100 µm ölçekte optik görüntüler alınmıştır. Deformasyon faktörü delik etrafında oluşan matris hasarının matkap çapına oranı olarak tanımlanmış ve aşağıda verilen Denklem (1) ile hesaplanmıştır. Burada; F_D -Deformasyon faktörü, D_{max} - Maksimum hasar çapı, D ise matkap çapıdır [2].

$$F_D = \frac{D_{max}}{D} \quad (1)$$

Deformasyon faktörleri matkabın giriş ve çıkış bölgeleri için ayrı olarak tespit edilmiştir. Optik mikroskop kullanılarak 6 mm çap, 50 m/dk kesme hızı ve 0.05 ilerleme değerlerinde elde edilen giriş ve çıkış bölgelerine ait görüntüler Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Matkap ucunun a) giriş yüzeyi, b) çıkış yüzeyi

3 Bulgular ve tartışma

Kesme parametrelerinin polimer tabakalı kompozitlerin delinmelerindeki etkileri biliniyor olmakla birlikte matkap geometrilerinin etkisi için aynı şeyi söylemek zordur [19]. Bu çalışmada iğne uçlu 34CrAl6 yüksek alaşımli çelik malzemeden yapılmış ağaç matkabının farklı çapları ve farklı kesme parametreleri kullanılarak bir takım deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler kapsamında kesme hızı ve

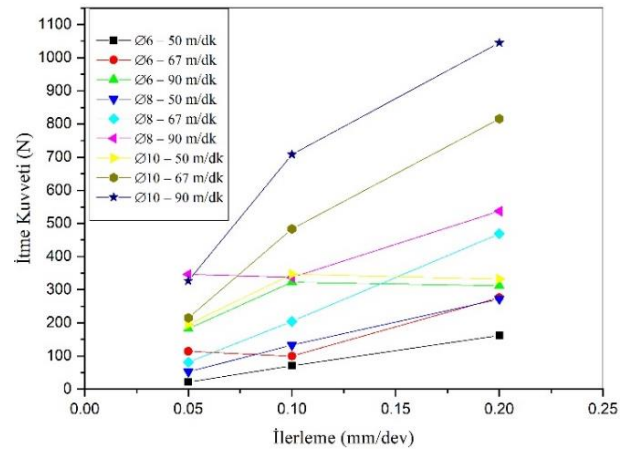
ilerlemeye bağlı olarak meydana gelen itme kuvvetleri ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar Şekil 6'da grafik olarak verilmiştir.

Ölçülen ve ortalamaları alınan kesme kuvvetlerinin, matkap çaplarına göre elde edilen grafik incelendiğinde kesme hızı ve ilerlemenin artışına bağlı olarak itme kuvvetlerinde artışlar olduğu gözlemlenmektedir. CETP kompozitlerin delinmelerinde kesme hızının etkisinin önemsiz olduğunu belirten birçok çalışma olmakla birlikte Khashaba ve diğ. [20], kesme hızının matkap ucu ön aşınmasına bağlı olarak itme kuvvetlerini arttırdığını bulmuşlardır. Bu çalışmada kullanılan ağaç matkaplarının tasarımlarından dolayı bir miktar ön aşınmaya maruz kalabildikleri ve bu nedenle kesme hızındaki artışa bağlı olarak itme kuvvetlerinin arttığı düşünülmektedir. En küçük itme kuvveti 6 mm çap, 50 m/dk kesme hızı ve 0.05 mm/dev ilerleme değerinde meydana gelmiştir. Ayrıca matkap çapının büyümesi de itme kuvvetlerinde artışa sebep olmaktadır.

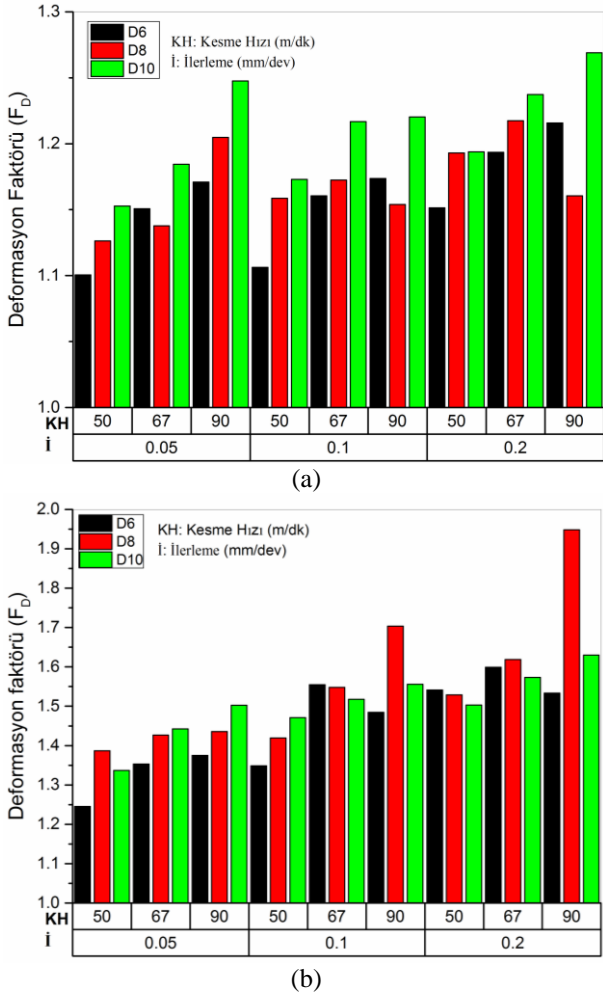
Kesme parametreleri ve matkap çapının deney numunelerinin giriş ve çıkış kısımlarında meydana getirdiği deformasyon faktörleri Şekil 7'de verilmiştir.

Meydana gelen deformasyon faktörü sonuçları incelendiğinde kesme hızı, ilerleme ve matkap çapının giriş ve çıkış deformasyon faktörleri üzerinde önemli etkiye sahip oldukları söylenebilir. Ağaç matkabının uç profili nedeni ile giriş deformasyonları çıkış deformasyonlarına göre daha az çıkmıştır. Ağaç matkabının uç profilinde merkezleme yapması için bir iğne uç bulunmaktadır. Bu iğne ucun ve kesme kenarlarının konumunun çıkış yüzeylerinde daha fazla baskı oluşmasını sağladığı düşünülmektedir. Oluşan bu baskı kuvveti sonucunda en alta bulunan tabaka ayrılmaya zorlanmakta bu nedenle giriş yüzeyinden daha fazla deformasyona uğramaktadır.

Kesme hızı, ilerleme ve matkap çapının artması deformasyon faktörlerini arttırmaktadır. Çıkış deformasyon faktörleri için Şekil 7b'deki sonuçlar incelendiğinde bir düzenli değişim görülememiştir.



Şekil 6. İtme kuvvetlerinin ilerleme ve kesme hızına bağlı değişimi



Şekil 7. Deformasyon faktörü değerleri a) giriş b) çıkış

Özellikle 8 mm çapındaki matkap için 0.10 ve 0.20 mm/dev ilerleme parametrelerinde elde edilen deformasyon faktörleri beklenenden daha yüksek çıkmıştır. Bununla birlikte benzer değişim özellikle çıkış deformasyon faktörleri için diğer matkap çaplarında da bulunmuştur. Bu durumun özellikle ince tabakalı kompozitlerde delme işlemi esnasında azalan kalınlıkla birlikte artan eğilme gerilmelerinin kompozit malzemelerin son tabakalarında yarattığı ilave gerilmeler kaynaklı “patlatarak çıkma durumu” olduğu düşünülmektedir. Bu durumun önlenmesi için delme işleminde prosesi etkilemeyecek şekilde kompozit malzemenin alttan desteklenmesi uygun olabilir.

Çalışmada, Dr. Genichi Taguchi tarafından geliştirilen Taguchi metodu kullanılmıştır. Sonuçları analiz edebilmek için S/N oranı olarak bilinen bir istatistiksel performans ölçüsü kullanılmaktadır. Deneylerden elde edilen sonuçlar sinyal/gürültü oranına (S/N) çevrilerek değerlendirme yapılmaktadır. S/N oranındaki S sinyal faktörünü, N ise gürültü faktörünü ifade etmektedir. Sinyal faktörü deneylerden alınan gerçek değeri, gürültü faktörü ise deney tasarımına katılmayan fakat deney sonucuna etki eden faktörleri ifade etmektedir. Gürültü kaynakları, elde edilmek istenen performans karakteristiklerinin hedef değerden sapmasına sebep olan tüm değişkenlerdir [21].

S/N oranı, üç temel performans karakteristiğine göre saptanmaktadır. CETP kompozit malzemelerin delinmelerinde itme kuvvetlerinin ve deformasyon faktörünün az olması istendiğinden S/N oranı için “daha küçük-daha iyisi” performans karakteristiği seçilmiştir. S/N oranlarının hesaplanmasında kullanılan Denklem (2) aşağıda verilmiştir [22]. Deney tasarımı ve istatistiksel analizler, Taguchi metoduna göre Minitab 17 yazılımı ile yapılmıştır.

$$S/N_{SB} = \eta = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (2)$$

İtme kuvveti, giriş ve çıkış deformasyon faktörleri sonuçları için S/N oranları Tablo 4’te verilmiştir.

Ayrıca varyans analizi yapılmış ve kesme parametrelerinin sonuçlara olan katkıları tespit edilmiştir. Tablo 5’te S/N oranı için cevap tablosu, Tablo 6’da S/N oranı için varyans analizi tablosu görülmektedir. S/N oranlarının her bir parametre için büyük olduğu değerler optimal faktör kombinasyonunu vermektedir [17]. Buna göre Tablo 6 incelendiğinde itme kuvveti için her üç parametrenin de birinci seviyeleri optimum olanlardır. Giriş deformasyon faktörü açısından kesme hızı ve ilerlemenin birinci seviyeleri matkap çapının ise ikinci seviyesi optimum faktörlerken çıkış deformasyon faktörü içinse her üçünün birinci seviyeleri optimum faktörler olarak tespit edilmiştir.

CETP kompozit malzemelerin ağaç matkabı ile delinmelerinde 3 seviye kesme hızı, ilerleme ve matkap çapı için itme kuvvetlerinin minimum değerleri “daha küçük daha iyidir” kuralına göre 50 m/dak kesme hızı, 0.05 ilerleme ve 6 mm matkap çapında elde edilmiştir. İtme kuvvetlerine ilerlemenin etkisi %43.59’la en fazladır. Giriş ve çıkış deformasyon faktörlerinin minimum değerleri “daha küçük daha iyidir” kuralına göre 50 m/dak kesme hızı, 0.05 ilerleme ve 6 mm matkap çapında elde edilmiştir. Giriş deformasyon faktörüne en büyük etkiyi %55.54’le matkap çapı yaparken, çıkış deformasyonuna en fazla etkiyi %48.76 ile ilerleme yapmıştır.

Tablo 4. Sonuçlar için S/N oranları

Deney No	S/N oranları		
	İtme Kuvveti	Giriş Deformasyon Faktörü	Çıkış Deformasyon Faktörü
1	-26.5839	-0.83175	-1.90806
2	-42.477	-1.2793	-3.04338
3	-50.4228	-1.53956	-3.5413
4	-38.1836	-1.12065	-3.08629
5	-53.6861	-1.70407	-3.6243
6	-48.8109	-1.53659	-4.07884
7	-50.2949	-1.92136	-3.53591
8	-50.1746	-1.3911	-3.43078
9	-54.6013	-1.29337	-5.79248

Tablo 5. S/N oranı için cevap tablosu

Seviye	İtme Kuvveti			Giriş Deformasyon Faktörü			Çıkış Deformasyon Faktörü		
	Kesme Hızı	İlerleme	Matkap Çapı	Kesme Hızı	İlerleme	Matkap Çapı	Kesme Hızı	İlerleme	Matkap Çapı
1	-39.8279	-38.3542	-41.8565	-1.21687	-1.29125	-1.25315	-2.83092	-2.84342	-3.13923
2	-46.8936	-48.7793	-45.0873	-1.45377	-1.45816	-1.2311	-3.59648	-3.36615	-3.97405
3	-51.6903	-51.2783	-51.4679	-1.53528	-1.45651	-1.72166	-4.25305	-4.47087	-3.56717
Fark	11.86238	12.92417	9.611457	0.318411	0.165252	0.490558	1.422136	1.627454	0.834822
Önem Derecesi	2	1	3	2	3	1	2	1	3

Tablo 6. S/N oranı için varyans analizi tablosu

Kaynak	SD	Kareler Toplamı			Ortalama Kareler			F-Oranı			%Katkı		
		İK	GDF	ÇDF	İK	GDF	ÇDF	İK	GDF	ÇDF	İK	GDF	ÇDF
Kesme Hızı	2	213.64	0.16	3.03	106.82	0.08	1.51	28.20	1.09	11.35	33.03	19.79	35.78
İlerleme	2	281.96	0.05	4.14	140.98	0.02	2.07	37.21	0.36	15.48	43.59	6.65	48.76
Matkap Çapı	2	143.53	0.46	1.04	71.76	0.23	0.52	18.94	3.08	3.90	22.19	55.54	12.30
Hata	2	7.57	0.14	0.26	3.78	0.07	0.13				1.17	18.01	3.14
Toplam	8	646.71	0.82	8.49									

SD: Serbestlik derecesi, İK: İtme Kuvveti, GDF: Giriş Deformasyon Faktörü, ÇDF: Çıkış Deformasyon Faktörü

4 Sonuçlar

CETP kompozit malzemelerin ağaç matkabı ile delinmelerinde kesme parametrelerinin ve matkap çapının itme kuvveti ve giriş/çıkış deformasyon faktörleri üzerine etkilerinin incelendiği bir deneysel çalışma gerçekleştirilmiş ve bu parametrelerin sonuçlar üzerindeki etkilerinin analizi için Taguchi metodu kullanılmıştır. Sonuçlara ve analizlere dayalı olarak sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

1. Kesme hızı, ilerleme ve matkap çapının değişimi itme kuvvetlerini etkilemektedir. Her biri için değer arttıkça itme kuvvetleri de artmaktadır.
2. Taguchi metodu ile yapılan analizlerde “en küçük en iyidir” kuralına göre itme kuvvetleri açısından ilerleme %43.59, kesme hızı %33.03 ve matkap çapı %22.19 etkili oldukları belirlenmiştir.
3. Giriş deformasyon faktörü açısından matkap çapı %55.54, kesme hızı %19.79 ve ilerleme %6.65 etkili oldukları belirlenmiştir.
4. Çıkış deformasyon faktörü açısından ise ilerleme %48.76, kesme hızı %35.78 ve matkap çapı %12.30 etkili oldukları belirlenmiştir.
5. Tüm sonuçlar için en uygun kesme parametrelerinin ve matkap çapının 50 m/dk kesme hızı, 0.05 ilerleme ve 6 mm matkap çapı olduğu tespit edilmiştir.
6. Taguchi analizi sonuçlar açısında uygun bir teknik olarak uygulanabilmiştir.
7. Çalışmanın doğruluğu daha fazla parametre ve seviye içerecek şekilde uygulanarak geliştirilebilir.

Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleşmesindeki katkılarından dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumuna (TÜBİTAK) Proje No:113M789 teşekkür ederiz.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 14

Kaynaklar

- [1] V. A. Nagarajan, S. Sundaram, K. Thyagarajan, J.Selwin Rajadurai, and T.P.D Rajan., Measuring delamination severity of glass fiber-reinforced epoxy composites during drilling process. *Experimental Techniques*, 37, 66–73, 2013. <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2012.00809.x>
- [2] E. Kilickap, Optimization of cutting parameters on delamination based on Taguchi method during drilling of GFRP composite. *Expert Systems with Applications*, 37, 6116–6122, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.02.023>
- [3] I. El-Sonbaty, U.A. Khashaba, T. Machaly, Factors affecting the machinability of GFR/epoxy composites. *Compos Struct*, 63(3–4), 329–338, 2004. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(03\)00181-8](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(03)00181-8)
- [4] C. C. Tsao, Experimental study of drilling composite materials with step-core drill. *Materials and Design*, 29, 1740– 1744, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.03.022>
- [5] J. L. Deng, Introduction to grey system, *Journal of Grey System*, 1, 1–24, 1989.

- [6] N. Tosun, Determination of optimum parameters for multiperformance characteristics in drilling by using grey relational analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing*, 28, 450–455, 2006. <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2386-y>
- [7] C.-J. Tzeng, Y.-H. Lin, Y.-K. Yang, M.-C. Jeng, Optimization of turning operations with multiple performance characteristics using the Taguchi method and Grey relational analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 2753–2759, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.06.046>
- [8] J. P. Davim, P. Reis, A.C. Conceicao, Drilling fiber reinforced plastics (FRPs) manufactured by hand lay-up: influence of matrix (Viopal VUP 9731 and ATLAC 382–05). *Journal of Materials Processing Technology*, 155–156, 1828–1833, 2004-a. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.173>
- [9] J. P. Davim, P. Reis, A.C. Conceicao, Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up. *Composites Science and Technology*, 64, 289–297, 2004-b. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00253-7](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00253-7)
- [10] A. M. Abraço, J.C. Campos Rubio, P.E. Faria, J.P. Davim, The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination when drilling glass fibre reinforced plastic composite. *Materials and Design*, 29, 508–513, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.01.016>
- [11] B. Latha, V.S. Senthilkumar K. and Palanikumar, Influence of drill geometry on thrust force in drilling GFRP composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 30, (6), 463–472, 2011. <https://doi.org/10.1177/0731684410397681>
- [12] P. K. Rakesh, I. Singh and D. Kumar, Drilling of composite laminates with solid and hollow drill point geometries. *Journal of Composite Materials*, 46,(25), 3173–3180, 2012. <https://doi.org/10.1177/0021998312436997>
- [13] H. B. Kaybal, A. Ünüvar, M. Koyunbakan, A. Avcı, A novelty optimization approach for drilling of CFRP nanocomposite laminates, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100, 2995–3012, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2873-1>
- [14] H. B. Kaybal, A. Unuvar, Y. Kaynak, A. Avcı, Evaluation of boron nitride nanoparticles on delamination in drilling carbon fiber epoxy nanocomposite materials, *Journal of Composite Materials*, 54(2), 215–227, 2020. <https://doi.org/10.1177/0021998319860245>
- [15] U. Köklü, O. Demir, A. Avcı, A. Etyemez, Drilling performance of functionally graded composite: Comparison with glass and carbon/epoxy composites, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31 (10), 4703–4709, 2017. <https://doi.org/10.1007/s1206-017-0916-4>
- [16] L. Gemi, U. Koklü, S. Yazman, S. Morkavuk, The effects of stacking sequence on drilling machinability of filament wound hybrid composite pipes: Part-1 mechanical characterization and drilling tests, *Composites Part B: Engineering*, 186, 1077871, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107787>
- [17] T. N. Valarmathi, K. Palanikumar, B. Latha, Measurement and analysis of thrust force in drilling of particle board (PB) composite panels. *Measurement*, 46, 1220–1230, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.11.024>
- [18] A. Can, A. Ünüvar, Optimization Of Process Parameters In Drilling Of Smc Composites Using Taguchi Method. *Technical Gazette*, 24, 2, 435–442, 2017. <https://doi.org/10.17559/TV-20160103215256>
- [19] L. Gemi, S. Morkavuk, U. Koklü, D. S. Gemi, An experimental study on the effects of various drill types on drilling performance of GFRP composite pipes and damage formation. *Composites Part B: Engineering*, 172, 186–194, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.05.023>
- [20] U. A. Khashaba, I.A. El-Sonbaty, A.I. Selmy, A.A. Megahed, Machinability analysis in drilling woven GFR/epoxy composites: Part II – Effect of drill wear. *Composites: Part A*, 41, 1130–1137, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2010.04.011>
- [21] F.Kara, O. Özbek, M. Kam, H. Saruhan, AISI 4140 ıslah çeliğinin tornalanmasında yüzey pürüzlülüğü ve titreşimin taguchi metodu ile optimizasyonu, II. International Academic Research Congress, pp. 1132–1140, Alanya/Antalya, Türkiye, 18-21 October 2017.
- [22] A. Kaçal, and M. Gülesin, Determination of optimal cutting conditions in finish turning of austempered ductile iron using Taguchi design method. *Journal Of Scientific & Industrial Research*, 278–283, 2011.





An experimental study on interlaminar shear strength and fracture toughness: Carbon fiber reinforced epoxy composites enhanced with the CaCO₃ nanoparticles

Tabakalararası kayma mukavemeti ve kırılma tokluğu üzerine deneysel bir çalışma: CaCO₃ nanoparçacıkları ile iyileştirilmiş karbon fiber takviyeli epoksi kompozitler

Halil Burak Kaybal^{1,*} 

¹ Amasya University, Mechanical Engineering, 05100, Amasya Turkey

Abstract

This study examines the effect of nano-CaCO₃ particles on interlaminar shear strength (ILSS) and fracture toughness properties for carbon fiber reinforced epoxy composites. The nano-CaCO₃ modified carbon fiber epoxy composites (nC-CFECs) were prepared using the vacuum assisted resin infusion (VARI) method. The short beam shear (SBS) test and single edge notch bending (SENB) test were conducted to calculate ILSS and fracture toughness, respectively. The results illustrate that the introduction of 2% wt. nano-CaCO₃ into the epoxy increased the ILSS by up to 24%. Moreover, the fracture toughness in the nanoreinforced composite was 32.3% higher than the unmodified composite. Overall, the nanocomposite material has shown better mechanical performance in terms of ILSS and SENB tests.

Keywords: Carbon fiber, Composite, Nano-CaCO₃, ILSS, SENB

1 Introduction

Carbon fiber reinforced composite materials have been widely preferred by various industries such as marine, defence, aviation, automotive, and sport due to their improved mechanical properties such as high strength, excellent stiffness [1]. Interlaminar shear strength (ILSS) and fracture behavior of carbon fiber reinforced composites play an important role in their design and performance [2, 3]. While the fracture behavior such as delamination resistance is outperformed on fiber dominated in the plane, it is shown a significant performance decrease in through the thickness direction (Z-axis) due to weak matrix/fiber interface bonding [1]. Therefore, improving the interface properties of composite materials is important to their performance of shear strength and fracture behavior.

Nanoparticles are emerged as a key reinforcing element to improve the fracture behavior of carbon fiber composites by means of advances in nanocomposite technology [1, 4-7]. Many researchers have investigated to enhance fracture resistance by using nanoparticles. Ulus et al. found that 2

Özet

Bu çalışma, nano-CaCO₃ partiküllerin, karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerin tabakalar arası kayma mukavemeti (ILSS) ve kırılma tokluğu özellikleri üzerindeki etkisini incelemek üzere gerçekleştirilmiştir. Nano-CaCO₃ ile modifiye edilmiş karbon fiber epoksi kompozit malzemeler (nC-CFEC) vakum destekli reçine infüzyon (VARI) yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. ILSS ve kırılma tokluğunu hesaplamak için sırasıyla kısa kiriş kesme (SBS) testi ve tek kenar çentik eğilme (SENB) testi yapılmıştır. Sonuçlar, epoksiye ağırlıkça %2 nano-CaCO₃ eklenmesinin ILSS 'yi %24'e kadar artırdığını göstermektedir. Dahası, nano-takviyeli kompozit malzemede kırılma tokluğu, nano takviyesiz kompozitten %32.3 daha yüksek bulunmuştur. Genel olarak, nanokompozit malzeme, ILSS ve SENB testleri açısından daha iyi bir mekanik performans göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Karbon elyaf, Kompozit, Nano-CaCO₃, ILSS, SENB

wt% halloysite nanotube into fiber reinforced composites (FRC) increased the interlaminar shear strength (ILSS) by 19% [4] and, in their other study, increased the critical stress intensity factor (K_{Ic}) by 24% [8]. Fan et al. [3] achieved 33% enhancement in the short beam test (SBT) by adding multi-walled carbon nanotube (MWCNT) into FRC. The improved by 31% fracture toughness of MWCNT/Zr₂O₂-based hybrid epoxy nanocomposites (MNCs) is obtained by Rathi and Kundalwal [9]. Furthermore, carbon nanotubes (CNTs) can be delayed the onset of matrix cracking in the carbon fiber reinforced composites [10]. 2 wt.% melamine-functionalized graphene nanoplatelets (MGNPs) reinforced epoxy nanocomposite increased fracture toughness by 124% in the paper of Cha et al [11]. Naous et al. [12] gained that adding 2% vol Al₂O₃ into epoxy improved the stress intensity factor (K_Q) of single edge notch bending (SENB) by 40%. The prepared carbon fiber epoxy composite with the addition of 4 wt.% nano-CaCO₃ by hot press process has occurred 36.6% increment in the ILSS [13] and in another study of the continuation of this work, carbon fiber/epoxy composite

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: hburak@amasya.edu.tr (H. B. Kaybal)

Geliş / Recieved: 10.12.2020 Kabul / Accepted: 05.03.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.838807

modified with silane coupled nano-CaCO₃ is even more increased the ILSS [14]. In our previous reports, we have addressed the efficiency of nano-CaCO₃ on the static and dynamic behavior of carbon fiber epoxy composites [15]. Notwithstanding, studies on the fracture properties of nano-CaCO₃ modified carbon fiber reinforced epoxy polymer composites are limited.

The inclusion of a certain value of nanoparticles into a composite is meant to improve fracture performance in many studies. However, particle agglomeration due to high particle ratio and poor dispersibility are limited the fracture resistance [16-18].

Up to now, the fracture toughness performance of nano-CaCO₃ modified carbon fiber epoxy composites (nC-CFECs) has been faintly discussed. Moreover, no studies have addressed on single edge notch bending of nC-CFECs. In this study, one of the first investigations is to evaluation in detail the effect of nano-CaCO₃ particles on interlaminar shear strength and fracture properties of carbon fiber epoxy composites (CFEC). ILSS and SENB tests are separately conducted to assess the fracture behavior for CFEC and n-CFEC samples. Moreover, the fracture surfaces are examined based on the optical and scanning electron microscopy (SEM).

2 Material and methods

2.1 Materials

Epoxy resin and its curing agent (MGS L160 and H160) were purchased from Momentive Hexion. Plain weave carbon fiber fabric (0/90) with 400 g/m² areal density was procured from DowAksa. Nano-CaCO₃ reinforcements (98% purity, 30~100 nm) were supplied by Chengdu Kelong Chemical Co., Ltd.

2.2 Production of Carbon Fiber Reinforced Nanocomposites

The required amount of CaCO₃ nanoparticles was scattered in acetone by tip sonicator (frequency of 20 kHz) for 15 minutes. Afterwards, the blend was poured into the epoxy and sonicated for 30 minutes. The acetone was then evaporated from a mixture in a vacuum furnace at 70 °C for 24 hours. After removing acetone, the curing agent was applied to the mixture and then mixed with a mechanical mixer for 5 min. The Vacuum Assisted Resin Infusion (VARI) process was used to manufacture carbon fiber (CF) reinforced epoxy nanocomposites composed of stacked sheets, which were set on a stainless steel tool plate. After the vacuum bagging process, the tool plate was preheated to 70 °C to minimize the viscosity of the mixtures during infusion. The wet fiber fabric infused with the mixture was cured at 70 °C for 1 h and cured at 120 °C for 4 h. The same method of curing was used for counterpart sample in the epoxy infusion of carbon fabric layers without CaCO₃s. By the way of this production, 1-5% nano- CaCO₃ reinforcement carbon fiber epoxy nanocomposite laminates were attained. To reduce the filtering effect of nanoparticles which formed in layers and fiber bundles, the nanocomposite laminates were produced as rectangular parts (300 x 150 mm²).

2.3 Characterization

Two different fracture tests were conducted in the mechanical test procedures of the samples. The geometries of sample and test setups are schematically illustrated in Figure 1. Both of fracture tests were carried out using Shimadzu AGS-X testing machine at room temperature. According to ASTM D2344/2344M, interlaminar shear strength (ILSS) was performed by the short beam shear (SBS) method (Figure 1(a)). The test speed was adjusted at a rate of 1 mm/min. The short beam strength is the transverse shear stress as calculated from Equation (1) implemented at the mid-plane of sample, following;

$$F^{sbs} = 0.75 \frac{P_{max}}{b h} \quad (1)$$

Where F^{sbs} is short-beam strength, P_{max} is the maximum load, b is width, and h is the sample thickness. The span length specified for the samples was 16 mm and the dimensions of the samples were determined 4 mm in thickness, 8 mm in width, and 24 mm in length.

To determine the fracture toughness (K_{Ic}), the single edge notch bend (SENB) test was implemented according to ASTM 5045. Considering the width of the samples to be 16 mm, the notches were carefully shaped by a circular saw to achieve a notch length of approximately 8 mm and the tip of the notch was sharpened by a razor blade (Figure 1(b)). A crosshead speed of 1 mm/min was identified for the SENB tests at room temperature and all of tests were repeated five times.

The stress intensity factor (K_Q) of SENB test was calculated by Equations (2) and (3).

$$K_Q = \left(\frac{P_Q}{B \sqrt{W}} \right) f(x) \quad (2)$$

$$f(x) = \frac{6x^{1/2}[1.99 - x(1-x)(2.15 - 3.93x + 2.7x^2)]}{[(1+2x)(1-x)^{3/2}] \quad (3)$$

Where P_Q is the private load value (see in ASTM 5045) B is specimen thickness, “ W ” is specimen width, “ a ” is crack length and “ $f(x)$ ” is a unitless calibration factor and its value depends on “ $x=a/W$ ”.

After the fracture tests, damage areas were observed with the FX 50 mm 1.8 d lens of Nikon DSLR camera and scanning electron microscopy (SEM) of Zeiss EVO LS 10.

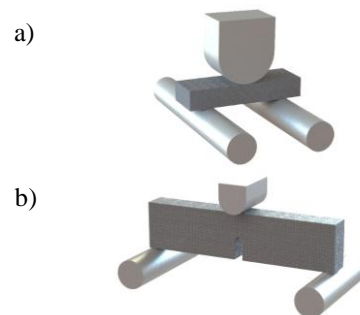


Figure 1. Schematic representation of test samples
a) ILSS test sample b) SENB test sample

3 Result and discussion

3.1 ILSS tests

Figure 2 presents several experimental results of load-displacement and ILSS versus nano-CaCO₃ contents for CFEC and nC-CFEC samples. In Figure 2 (a), two different load-displacement behaviors have been appeared as (I) and (II). In Figure 2(a.I), the curve is gradually raised and then softly dropped, while in Figure 2(a.II), the curve is directly raised and then dropped suddenly. In case of the sample forming a curve such as Figure 2(a.II), interlaminar shear failure clearly can be appear with some failure mechanism. The curve form of Figure 2(a.I) is flattened for a while now after the dropping load. At the end of this present case, some fracture failures such as matrix cracking and fiber breakage can be observed [3]. Load-displacement curves of samples are illustrated that the shear load of the nC-CFEC samples is higher than that of 0% wt. CFEC except containing 5% wt. nC-CFEC sample. The addition of 2% wt CaCO₃ has exhibited the highest fracture resistance. Note that ILSS performance of the 1-4 % wt nC-CaCO₃ is better than the other counterparts. This indicates the nano reinforcement enhances the shear resistance due to nanoscale toughening mechanisms [4]. As summarized in Figure 2(b), the shear strength of unmodified CFEC laminate is calculated as 40.3 MPa. The addition of 2 % wt nano-CaCO₃ is gained to increase the shear strength up to 50.2 MPa, which is approximately 24% higher than that of the unmodified sample. Afterward, the increasing nano-CaCO₃ content from 2% to 5% wt. is decreased the shear strength. He and Gao [13] stated that the reason for this decreasing shear strength was the agglomeration of nano-CaCO₃ particles and the weak interaction between particle and epoxy.

Figure 3 shows the fracture surface versus different nano content after the ILSS test. Failure mechanisms of samples are represented by the symbols in the figure. When the fracture surface is examined, the severity of the interlaminar shear failure clearly can be seen in Figure 3 (a) and (f). This explains the reason of the low shear stress for unmodified and 5% wt reinforced samples. Figure 3 (b) shows the preforms of fiber breakages and shear failure in the compression regions under the loading punch. With the addition of 2% wt nano-CaCO₃, a decrease in fiber breakage compared with Figure 3(b) and matrix damage are observed in the regions under compression stress (Figure 3 (c)). The absence of clear shear failure in Figure 3 (c) is explained as a good interlaminar strength. Furthermore, damage forms of interlaminar shear failure, matrix crack, and fiber breakages can be seen in Figure 3 (d) and (e). The breakage of fibers, which occurred during the transfer of forces, illustrates that the enhanced matrix with nano-CaCO₃ has performed a good performance against shear stress.

3.2 SENB Test

The relationships of bending loads and displacement for samples obtained from SENB tests are drawn in Figure 4. The maximum bending loads are increased in the all of nC-CFEC samples apart from the addition of 5% wt content compared to unmodified samples. A representative critical load (P_{crit}) point on curves illustrates a new crack initiation in

front of the preexisted notch [2]. While the value of P_{crit} is 4406.5 N in the unmodified sample, the value of 2% wt nano reinforcement nanocomposite is increased by 30% to 5753.6 N. The crack initiation load is decreased to 3556.8 N by 19% reduction in the 5% wt additive rate. On the other hand, the point P_{max} is denoted the maximum bending load. The samples are quickly lost their durability after the point P_{max} . P_{max} values and changes of the samples are given in Table 1. The increasing P_{max} value of composite specimens with nano reinforcement is reached 35%. When the fracture toughness of samples in the Table is examined, the increment of 2% wt nC-CFEC sample is eventuated as 32.3 % compared with unmodified counterpart. However, the reduction of the fracture toughness for the samples is about 12.3 % with the addition of 5% wt nano-CaCO₃.

Figure 5 demonstrates damaged samples after the SENB tests. When the fracture behavior is compared, the effect of nano reinforcement can be clearly seen in the bending angle of samples. It is observed that the bending angle (α) of unmodified samples is lower than that of the nano-reinforced samples due to the damage formation such as matrix crack, fiber breakage and mostly delamination.

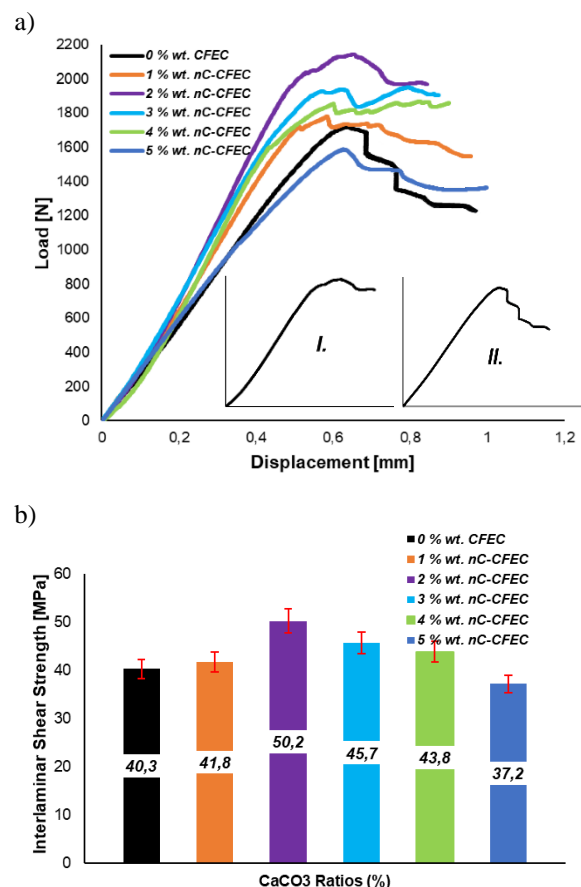


Figure 2. Short beam shear test results versus nano-CaCO₃ contents a) typical curves of load vs. displacement b) ILSS of CFEC and nC-CFEC samples

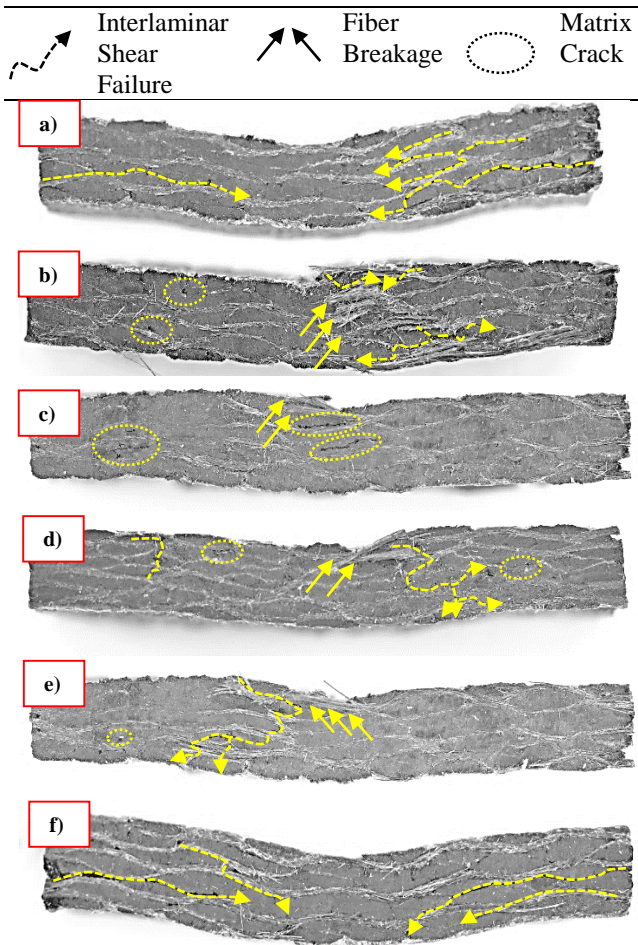


Figure 3. Optical images of fracture surface for ILSS test a) 0% wt. CFEC (b)-(f) 1-5% wt. nC-CFEC

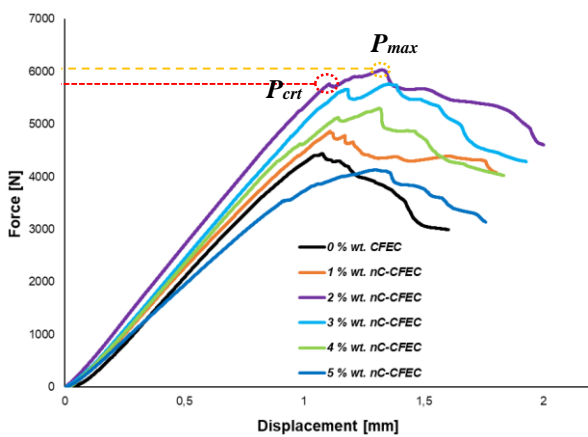


Figure 4. SENB curves of CFEC and nC-CFEC samples

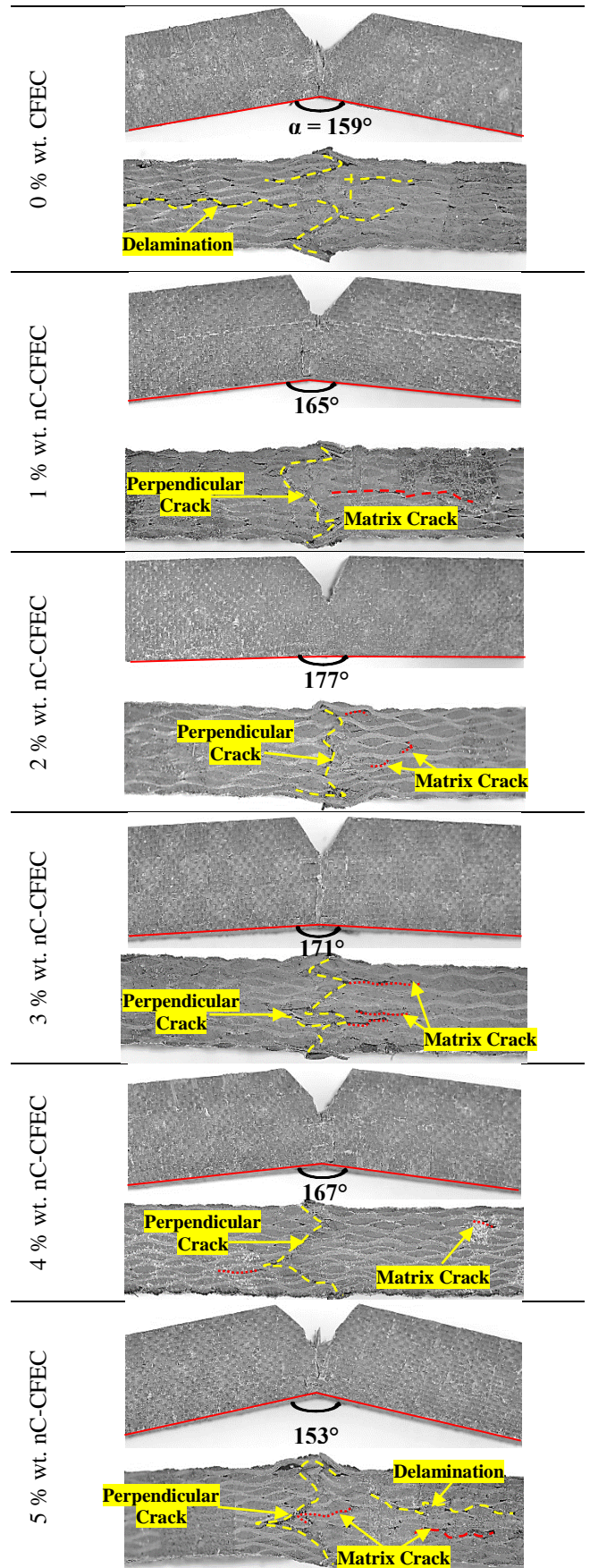


Figure 5. Optical image of damaged SENB specimens

Table 1. Fracture toughness of samples

Samples	P_{max} (N)	Change of P_{max} (%)	P_0 (N)	K_Q (MPa m ^{1/2})	Change of K_Q (%)
0 % wt. CFEC	4445.6	-	4405.5	46.4	-
1 % wt. nC-CFEC	4861.5	9.3	4717.0	49.6	6.9
2 % wt. nC-CFEC	6035.3	35.8	5834.3	61.4	32.3
3 % wt. nC-CFEC	5768.4	29.8	5553.1	58.4	25.9
4 % wt. nC-CFEC	5302.3	19.3	5076.6	53.4	15.1
5 % wt. nC-CFEC	4133.6	7 (-)	3867.6	40.7	12.3 (-)

Increasing the nano reinforcement ratio has resulted in a decrease in the bending angle. In particular, the bending angle line of the 2% wt. nano doped sample is became an almost straight line. Accordingly, the 2% wt. nano reinforced sample is not illustrated any significant delamination damage other than matrix cracking and perpendicular crack to the layer. The effectiveness of delamination damage appears to be reduced in the nano-doped samples. In addition, the matrix cracks are formed. However, in the sample with 5% nano reinforced, delamination is reappeared.

3.3 SEM observations of fracture morphology of nC-CFEC

The observation of fracture surfaces of the nanocomposites samples is shown in Figure 6 for 2% and 5% wt. nC-CFEC samples.

The improved ILSS and fracture behavior performances of nanocomposite samples are related to the toughness mechanisms tracked in Figure 6 (a). The nano mechanisms such as crack deflection, debonding, pinning are increased the fracture energies and interlaminar strength with the homogenous distribution of nano reinforce into the matrix [3, 4]. The distribution of nanoparticles non-homogeneously, which is call the agglomeration, in the matrix may be caused the initiation of cracks due to the residual stresses [4]. It can be said that the worsening of nanocomposites performance containing 5 % wt. CaCO₃ is owing to these huge agglomerations in Figure 6 (b).

Figure 7 illustrates a view of the fracture surfaces of the unmodified and modified samples. A number of the fibers are debonded from the unmodified epoxy with smooth fracture areas which indicate poor adhesion at the interface

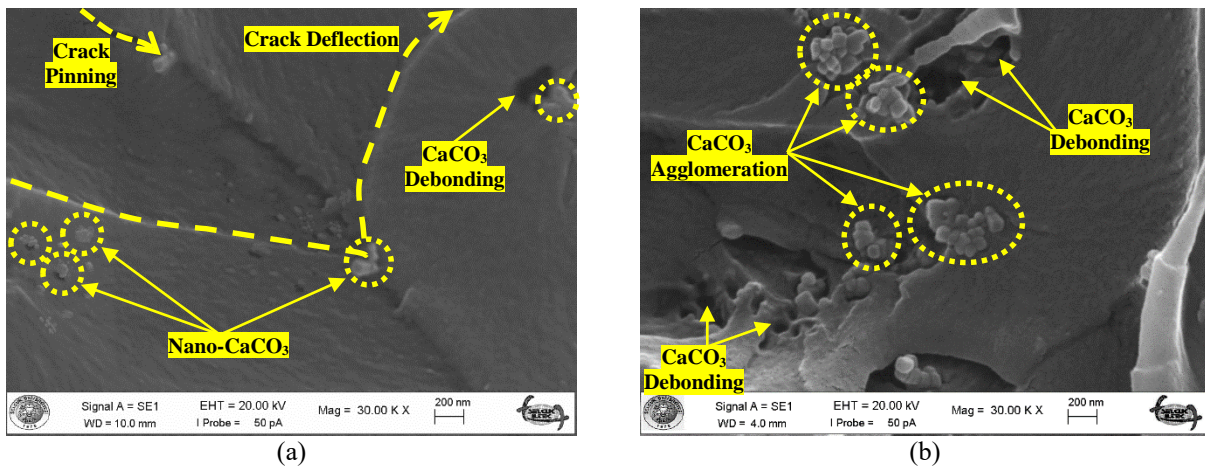


Figure 6. Toughness mechanisms of nanocomposites samples a) 2% wt. nC-CFEC b) 5% wt. nC-CFEC

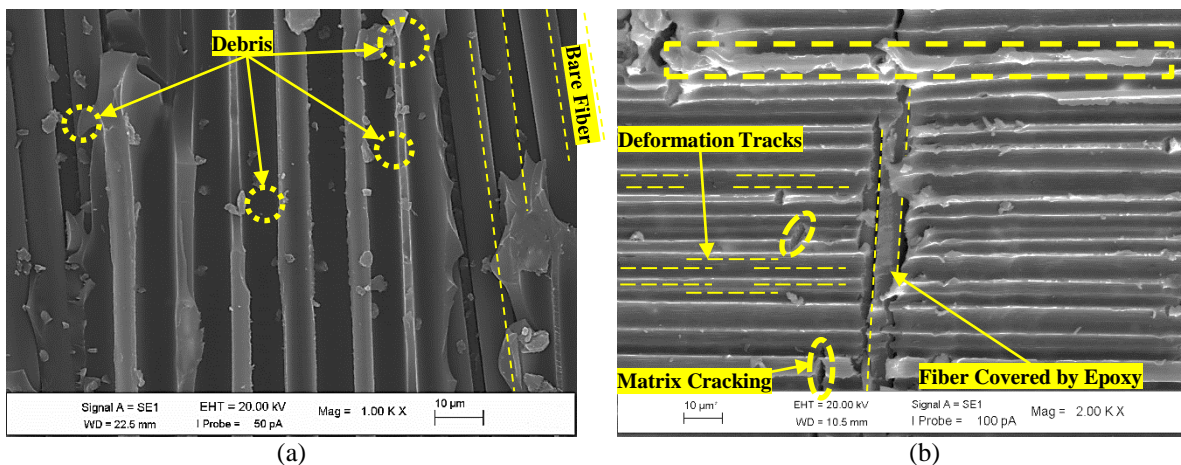


Figure 7. Fracture surfaces of CFEC samples a) 0% wt. CFEC b) 2% wt. nC-CFEC

for the carbon-epoxy sample (Figure 7(a)). As seen in Figure 7(b), the deformation tracks in the fiber slots are proof of the better interfacial interactions in the 2% wt. nC-CFEC compared to unmodified counterpart sample. Furthermore, the carbon fibers partially covered with epoxy are sighted plastic deformation which shows enhancement of interfacial strength.

As a result, the redesign of epoxy matrix with the CaCO₃, which causes an improvement in the fracturing properties of the composite, improves the load-carrying capacity in the interfacial regions by increasing the interfacial interaction of CFEC.

4 Conclusions

The aim of the present research was to examine the effect of nano-CaCO₃ particles at different weight ratios on the interlaminar shear strength and fracture behavior of carbon fiber epoxy composite laminates. Resultants from ILSS and SENB tests revealed that the performance of CFEC was remarkably improved with 2% wt. nano-CaCO₃ particles into epoxy. A drastic enhancement at the interlaminar strength was found as nearly 24% increase. Also, the SENB load and K_Q performances of 2% wt. CaCO₃ introduced CFEC improved up 35.8% and 32.3%, respectively. Further, optical microscopy analysis revealed the shear failure formation was minimized with CaCO₃ reinforcement except for 5% wt. ratio after the ILSS test. In the optical examination of the SENB test, the bending angles of the nano-reinforced samples were decreased based on not catastrophic damage formation such as delamination especially compared to neat counterparts. The SEM examinations demonstrated that the increment of fracture performance was related to the several toughening mechanisms of nano-CaCO₃ such as crack deflection, crack pinning, and particle debonding. When the damages on the interface were examined, traces of plastic deformation in the nano-reinforced sample were evidence of a strong carbon fiber / epoxy interaction. These findings provide important insights into the role of nano-CaCO₃ reinforcement help to improve the interlaminar shear strength and fracture behavior of carbon fiber epoxy composites.

Acknowledgment

Technical support from Amasya University and Necmettin Erbakan University is much appreciated.

Declaration of interests

The author declares that no known competing financial interests or personal relationships could have appeared to influence the work reported in this paper.

Similarity Index (iThenticate): 8%

References

- [1] X. Han, Y. Zhao, J-m. Sun, Y. Li, J-d. Zhang and Y. Hao, Effect of graphene oxide addition on the interlaminar shear property of carbon fiber-reinforced epoxy composites. *New Carbon Materials*, 32(1), 48-55, 2017. [https://doi.org/10.1016/S18725805\(17\)60107-0](https://doi.org/10.1016/S18725805(17)60107-0)
- [2] W. Mao, J. Chen, M. Si, R. Zhang, Z. Peng and C. Dai, Study of mechanical properties and cracking extension resistance behavior of c/sic composites by single edge notched beam and digital image correlation techniques. *Materials Science and Engineering: A*, 649, 222-228, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.09.101>
- [3] Z. Fan, M. H. Santare and S. G. Advani, Interlaminar shear strength of glass fiber reinforced epoxy composites enhanced with multi-walled carbon nanotubes. *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, 39(3), 540-554, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.11.013>
- [4] H. Ulus, H. B. Kaybal, V. Eskizeybek and A. Avcı, Halloysite nanotube reinforcement endows ameliorated fracture resistance of seawater aged basalt/epoxy composites. *Journal of Composite Materials*, 0021998320902821, 2020. <https://doi.org/10.1177/0021998320902821>
- [5] S. Shadlou, E. Alishahi and M. Ayatollahi, Fracture behavior of epoxy nanocomposites reinforced with different carbon nano-reinforcements. *Composite Structures*, 95, 577-581, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.08.002>
- [6] H. Ulus, T. Üstün, V. Eskizeybek, Ö. S. Şahin, A. Avcı and M. Ekrem, Boron nitride-mwcnt/epoxy hybrid nanocomposites: Preparation and mechanical properties. *Applied Surface Science*, 318, 37-42, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.12.070>
- [7] A. B. Sengul and E. Asmatulu, Toxicity of metal and metal oxide nanoparticles: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 1-25, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01033-6>
- [8] H. Ulus, H. B. Kaybal, V. Eskizeybek and A. Avcı, Enhanced salty water durability of halloysite nanotube reinforced epoxy/basalt fiber hybrid composites. *Fibers and Polymers*, 20(10), 2184-2199, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12221-019-9316-y>
- [9] A. Rathi and S. I. Kundalwal, Mechanical and fracture behavior of mwcnt/zro2/epoxy nanocomposite systems: Experimental and numerical study. *Polymer Composites*, 2020. <https://doi.org/10.1002/pc.25551>
- [10] T. Yokozeki, Y. Iwahori and S. Ishiwata, Matrix cracking behaviors in carbon fiber/epoxy laminates filled with cup-stacked carbon nanotubes (cscnts). *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(3), 917-924, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2006.07.005>
- [11] J. Cha, J. Kim, S. Ryu and S. H. Hong, Comparison to mechanical properties of epoxy nanocomposites reinforced by functionalized carbon nanotubes and graphene nanoplatelets. *Composites Part B: Engineering*, 162, 283-288, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.011>
- [12] W. Naous, X. Y. Yu, Q. X. Zhang, K. Naito and Y. Kagawa, Morphology, tensile properties, and fracture toughness of epoxy/al2o3 nanocomposites. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 44(10), 1466-1473, 2006. <https://doi.org/10.1002/polb.20800>

- [13] H. He and F. Gao, Resin modification on interlaminar shear property of carbon fiber/epoxy/nano-caco3 hybrid composites. *Polymer Composites*, 38(9), 2035-2042, 2017. <https://doi.org/10.1002/pc.23775>
- [14] H. He and K. Li, Silane coupling agent modification on interlaminar shear strength of carbon fiber/epoxy/nano-caco3 composites. *Polymer composites*, 33(10), 1755-1758, 2012. <https://doi.org/10.1002/pc.22311>
- [15] V. Eskizeybek, H. Ulus, H. B. Kaybal, Ö. S. Şahin and A. Avcı, Static and dynamic mechanical responses of caco3 nanoparticle modified epoxy/carbon fiber nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*, 140, 223-231, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.12.013>
- [16] X. Zhang, H. Peng, A. Limmack and F. Scarpa, Viscoelastic damping behaviour of cup stacked carbon nanotube modified epoxy nanocomposites with tailored interfacial condition and re-agglomeration. *Composites science and technology*, 105, 66-72, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.09.020>
- [17] H. Ulus, The impact of seawater aging on basalt/graphene nanoplatelet-epoxy composites: Performance evaluating by dynamic mechanical analysis (dma) and short beam shear (sbs) tests. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(1), 412-419. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.791161>
- [18] E. F. Şükür, Dry sliding friction and wear properties of caco3 nanoparticle filled epoxy/carbon fiber composites. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(2), 1108-1117. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.725631>





Finite element stress analysis of three-stage gearbox

Üç kademeli bir dişli kutusunun sonlu elemanlar ile gerilme analizi

Mehmet Sarıtaş¹, Özgür Gölbol², Paşa Yayla^{3,*}

^{1,2,3} Marmara University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, İstanbul, Turkey

Abstract

The stress analysis of the three-stage gearbox is carried out by the finite element analysis method using the Ansys commercial program. The triple reduction helical gearbox is manufactured from AISI 5115 (16MnCr5) and AISI 8620 steels. Static structural and rigid dynamic analyzes are performed in this work. The three-stage helical gearbox is a three-stage gearbox transmitting 0.5 kW at 1390 rpm with a reduction ratio of 127.99:1. After setting the boundary conditions for helical gears, the analysis is performed. Rotational velocity is given to rotating gears for static structural analysis. Analyzing these types of gearboxes to be produced enables the product to be produced more consciously with optimum design parameters with its right safety coefficients.

After the static analysis, the dynamic analysis is also performed using the modal analysis option of Ansys software. After the mode shape analysis and natural frequency analysis are performed, the operation frequency values of the gearbox are calculated by considering the input and output rpm values in the gearbox. These calculated values are compared with the normal operating condition to see if there will be any resonance in the gearbox design during normal operating conditions.

Keywords: Three-stage gearbox, Finite element analysis, Computer simulation, Static analysis, Modal analysis

1 Introduction

This article aims to analyze the three-stage gearbox and find strain and stress values at each component under normal operating conditions. The typical components of the gearbox are gears, shafts, bearings, pins, screws and case. Three-stage means, the power and speed are reduced in a three-stage gear system so one can get higher torque at each stage, thus gear reduction has the opposite effect on torque.

The analysis of these stresses is important to find out which gears and shafts can withstand how much stress and where the weakest area is and to recommend strengthening this area or using stronger materials. This is mainly due to the well-known fact that a chain is as strong as its weakest ring. In addition to the static analysis, dynamic analysis is also important in terms of observing how much stress and strains this gear system undergoes at what frequencies. Furthermore, by using modal analysis, one can observe

Özet

Bu çalışmada üç kademeli bir dişli kutusunun sonlu elemanlar analizi kullanılarak gerilme analizi gerçekleştirilmiştir. Üç kademeli dişli kutusu AISI 5115 (16MnCr5) ve AISI 8620 çelikleri kullanılarak üretilmiştir. Bu çalışmada yapısal statik ve katı dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Göz önüne alınan üç kademeli helisel dişli kutusu 0.5 kW gücünü 1390 dev/dak da 127.99:1 dönüştürme oranı ile iletmektedir. Helisel dişliler için sınır şartları belirlendikten sonra analizler gerçekleştirilmiştir. Statik analizler için dönme hızları girilmiştir. Üretilecek olan dişli kutuları için bu tür analizlerin yapılması ürünleri optimum tasarım parametreleri ve doğru emniyet katsayıları göz önüne alınarak daha doğru bir şekilde üretilmelerine imkan tanımaktadır.

Statik analizden sonra, ANSYS programının modal analiz seçeneği kullanılarak dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Serbest titreşim analizleri ile birlikte doğal frekans analizleri de gerçekleştirilmiş olup, giriş ve çıkış devir sayıları göz önüne alınarak dişli kutusunun normal çalışma frekansları belirlenmiştir. Dişli kutusunda normal çalışma koşullarında bir hasarın oluşup oluşmayacağını belirlemek üzere hesaplanan bu değerler ile dişli kutusunun normal çalışma koşullarındaki değerleri kıyaslanmıştır.

Anahtar kelimeler: Üç kademeli dişli kutusu, Sonlu elemanlar analizi, Bilgisayar simülasyonu, Statik analiz, Modal analiz

whether there is resonance at certain speed ranges and at what speeds the resonance occurs in mode shape analysis.

These analyzes are performed in ANSYS finite element commercial program. The Static Structural part in the program is selected for the static stress part of the analysis and the modal part is selected for the dynamic analysis. The reason for using ANSYS program in this work is to find the desired analysis types in a single program and that it is one of the most reliable and most widely used computer aided engineering (CAE) programs.

2 Literature survey

There are several works done on the finite element stress analysis of gearbox [1-9]. Bathe [2] described that the Finite Element Analysis (FEA) is an important part of engineering analysis and design. Finite element analysis is a practical application for the analysis of all the physical phenomena. Designers use it to minimize the number of physical

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: pasa.yayla@marmara.edu.tr (P. Yayla)

Geliş / Recieved: 14.09.2020 Kabul / Accepted: 10.03.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.794874

prototypes so it can be easier to solve and to improve the design in minimum time by optimizing the components.

Yang and his co-workers [3] studied the dynamic characteristics of the brake drum with the finite element in using ANSYS software. After the analysis, the natural frequencies and vibration shapes are also computed.

Vikhe [4] improved and optimized the efficiency of the design process based on static and dynamic modal analysis results. He recommended modifying and developing the geometric model and maintained the optimization until satisfactory results are obtained. This helped to find an optimized design for the transmission case, where it performed best with minimal loads on the housing.

Vijaykumar and his co-workers [5], by using ANSYS finite element analysis software, determined the vibration analysis of the transmission case using a harmonic frequency response for the case to prevent resonance. It is observed that to prevent resonance, the frequency ratio should be set to 0.25 from the first modal natural frequency.

Ramamurti [6] made a comparison of stress results obtained from the classical method and FEM method and dynamic analysis of the model. The results of this analysis determined the deflection of the shaft under the influence of gear forces by using FEM and classical methods.

Devan and Muruganatham [7] stated in their works that the resonance will not take place on gear train if the natural frequencies found as a result of modal analysis are much higher than the operating frequency calculated using the input and output rpm values of the gear system.

Yesilyurt and his co-workers [8] measured the reduction of stiffness of gear teeth with the help of modal analysis. Besides, with the help of modal analysis, they determined that the gear tooth can be detected as damage and wear damage. To prove these analyzes in a physical environment, an experiment is also conducted to obtain the Frequency Response Function (FRF) of the gear tooth. The steel-tipped impact hammer is used as a stimulator and the accelerometer acts as a response detector.

Weis and his co-workers [9] tried to calculate the first 20 natural frequencies and corresponding mode shapes in the modal analysis of gearbox housing with Ansys workbench.

3 CAD design of three-stage gearbox

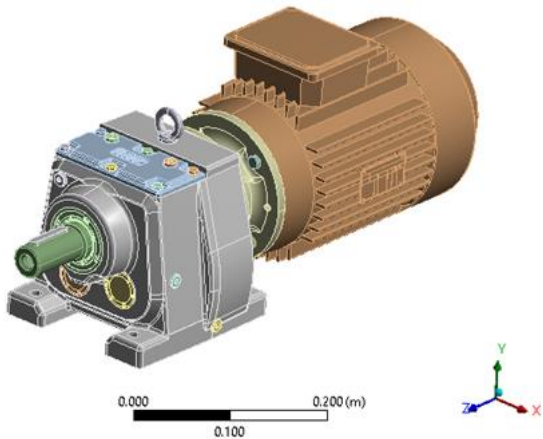


Figure 1. Whole design of three-stage gearbox

The drawing of the three-stage gearbox was created within the scope of this project in a computer environment. The design has “6 gears”, “3 shafts”, “6 keys”, and a rotor engine, as shown in Figure 1 and Figure 2. For static analysis, the stresses at each gear, shaft, key, and gearbox case are calculated.

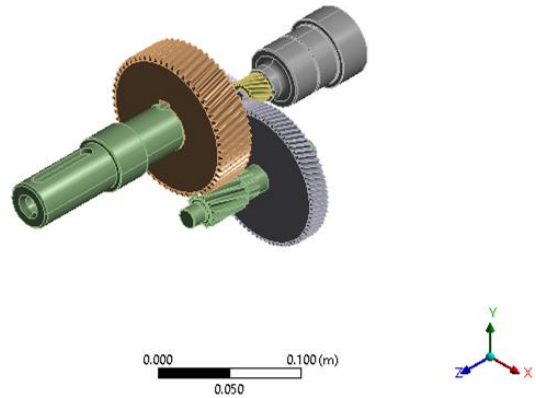


Figure 2. Gearing system in the whole design

4 Analytical calculations in gearbox

In this section, the analytical calculations of a three-stage gearbox design are explained. First, the speed, power, and torque transfer calculations of the 6 helical gears given in Table 1 are analytically calculated as following.

Table 1. Speed of gears

Gear	Rotational Speed (RPM)	Rotational Speed (rad/s)
Z1	1390	145.56
Z2	281.3	29.45
Z3	281.3	29.45
Z4	53.41	5.59
Z5	53.41	5.59
Z6	10.86	1.13

The CAD drawings of this gearbox are taken from industry, given in Figure 3.

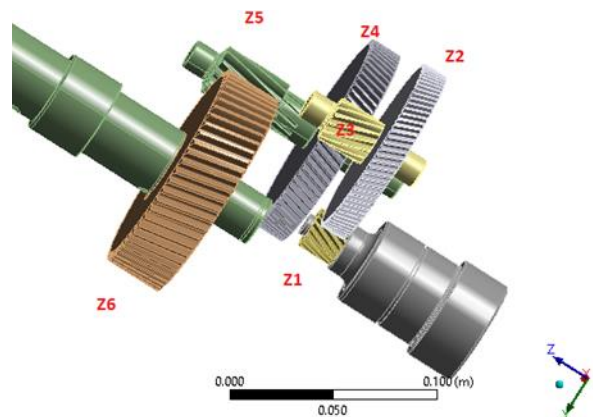


Figure 3. Gearbox CAD drawing

Table 2. Properties of the gears

Gear	Number of Teeth	Normal Module (m)	Pressure Angle (°)	Helix Angle	Helix	Status
Z1	17	1	20	20	Right	Returns
Z2	84	1	20	22	Left	Returned
Z3	15	1.25	20	18	Left	Returns
Z4	79	1.25	20	18	Right	Returned
Z5	12	1.75	20	12	Right	Returns
Z6	59	1.75	20	12	Left	Returned

4.1 Speed calculations

The input starts with 1390 rpm and the output is reduced to 10.86 rpm by applying the following formula at each stage.

N_i : Number of teeth in gear (i)
 W_i : Rotational speed in gear (i)

$$W_2 = \frac{W_1}{N_2} * N_1 \quad (1)$$

4.2 Gear efficiency

For the value of pressure angle $\alpha_0=20^\circ$ (shown in Table 2) the efficiency is approximately $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 0.89$ taken from references [1].

4.3 Power calculations

To calculate power for each gear, the gear efficiency for each stage is assumed as:

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 0.89.$$

$$\text{Then } \mu_{total} = \mu_1 \times \mu_2 \times \mu_3 = 0.89 \times 0.89 \times 0.89 = 0.705 \text{ kW}$$

$$P_1 = P_{input} = 0.5 \text{ kW}$$

$$P_2 = P_3 = P_1 \times \mu_1 = 0.5 \times 0.89 = 0.445 \text{ kW}$$

$$P_4 = P_5 = P_2 \times \mu_2 = 0.445 \times 0.89 = 0.396 \text{ kW}$$

$$P_6 = P_{output} = P_1 \times \mu_{total} = 0.5 \times 0.705 = 0.352 \text{ kW}$$

Total power losses in reducer:

$$P_{input} - P_{output} = 0.5 - 0.352 = 0.148 \text{ kW}$$

4.4 Torque calculations

$$\tau_Z = \frac{P}{W} \quad (2)$$

P : Power

W : Angular velocity

$$I_{12} = \frac{N_2}{N_1} \quad (3)$$

$$\tau_{Z2} = I_{12} \times \tau_{Z1} \times \mu_1 \quad (4)$$

I_{12} : Gear ratio

μ_1 : Gear efficiency

Table 3. Torque of Gears

Gears	Torques of Gears (N.m)
τ_{Z1}	3.43
τ_{Z2}	14.71
τ_{Z3}	14.71
τ_{Z4}	68.88
τ_{Z5}	68.88
τ_{Z6}	301

4.5 Stress control in stages

The contact stress at the pitch point of gear is calculated using American Gear Manufacturer's Association (AGMA) stress equation [10]. The examined bending stress analysis in gear:

$$\sigma_{max} = W_t \times \frac{1}{b \times m} \times \frac{1}{Y} \quad (5)$$

W_t is the tangential transmitted load (N)

b is the face width of the narrower member, in (mm)

m is the metric module, in (m)

Y is the geometry factor for bending stress (which includes root fillet stress-concentration factor (K_f))

Forming Factor Y is obtained from Figure 4.

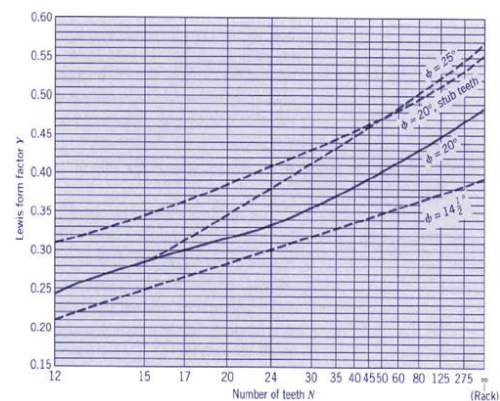


Figure 4. Forming factor Y [10]

Based on the AGMA equation, the maximum stresses in the gears are calculated as in Table 4.

Table 4. Maximum calculated stresses in the gears

Gears	Maximum Stresses σ_{max} (MPa)
$\sigma_{max z1}$	67.255
$\sigma_{max z2}$	40.72
$\sigma_{max z3}$	185.96
$\sigma_{max z4}$	103.81
$\sigma_{max z5}$	428.41
$\sigma_{max z6}$	226.64

The mechanical properties of the gear material are presented in Table 5 [11-12].

Table 5. Properties of gear materials

Properties	AISI 5110 (16MnCr5) [11]	AISI 8620 [12]
Tensile Strength	880 MPa	1157 MPa
Yield Strength	484 MPa	833 MPa
Modulus of Elasticity	210 GPa	250 GPa
Poisson's Ratio	0.27-0.3	0.29
Hardness Rockwell C	57±2	57±2
Shear Modulus	80 GPa	80 GPa
Density	7850 kg/m ³	7850 kg/m ³

The safety factor for all gears is assumed as $S=1.5$. From the comparison of Table 4 and Table 5, the calculated maximum stresses are lower than allowable stresses so one can see that all gears are durable from an analytical static stress analysis perspective.

5 Finite element analysis

5.1 Materials

The ANSYS program begins by defining materials [13]. First, the materials to be used must be written in the engineering data section. 3 materials are used in this work. These materials are AISI 1050 Steel for input and output shaft, AISI 8620 for gears with pitch diameter less than 50 mm (Gear 1,3 and 5) and AISI 5115 MnCr5 for gears with a pitch diameter bigger than 50 mm (Gear 2, 4 and 6), respectively. Structural steel is used for keys, which is the default option of the program. After entering the engineering data tab, add material and change the data of the structural steel option and write the properties of the desired material according to the material in the design.

5.2 Contacts boundary conditions

There is “no separation” contact between the rotor shaft and gear Z1 because these parts will move separately. Besides that, the contact between the key and shaft must be bonded because these parts will move together.

As stated above, contact boundary conditions can be given in shaft, key and gear analysis. In the analysis of stresses between 2 gears, boundary conditions are given as following.

“No separation” option is selected since gears cannot rotate in the same direction.

5.3 Meshing

Mesh generation is one of the most important parameters in Finite Element Method. Mesh generation can be defined as the process of dividing a physical definition range into smaller definition ranges (elements). The aim is to simplify the solution of a differential equation. After the element properties are determined, the model is divided into small elements. The important thing here is, considering the

computing resources, how better split the model into smaller pieces using the selected element.

In the beginning, default mesh is performed for gears. But the small number of elements limited the accuracy of the results. So, the accuracy of the solution is increased by increasing the number of meshes and nodes in the sensible areas where higher stress concentrations are expected.

Sphere-shaped body sizing is considered in the region where the highest stresses are expected, Figure 5. In these regions, remarkable finer mesh densities are used for more accurate results. Outside of the spherical region where lower stresses are expected, coarse meshes are used.

To create a body sizing mesh, a new coordinate is created from the coordinate system and its spherical shape is created according to that coordinate system. Considering this shape, the spherical body radius is 10 mm smaller, but it may take more time to solve the process according to the performance of the computer.

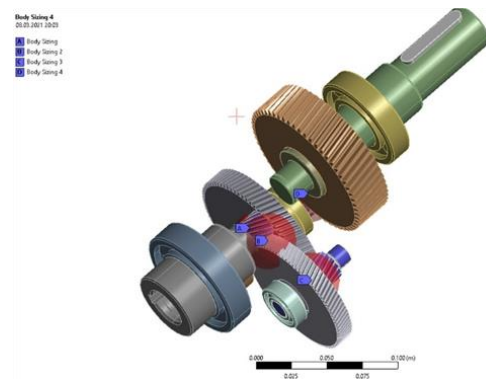


Figure 5. Influence of spheres used for mesh refinement

These operations are repeated in all areas between gear-gear and gear-wedge locations. It is worth pointing out that finer mesh densities may give more accurate results, but they may exceed the capacity of the compute or may take longer CPU time.

5.4 Loading

The FEM analysis of the whole gearbox is performed at this stage. To achieve this, the end of the output shaft and bottom surfaces of the casing is fixed, and the input moments are introduced from the input shaft, as shown in Figure 6 and Figure 7. By doing this, the static analysis of the whole system together with the gearbox case is obtained.

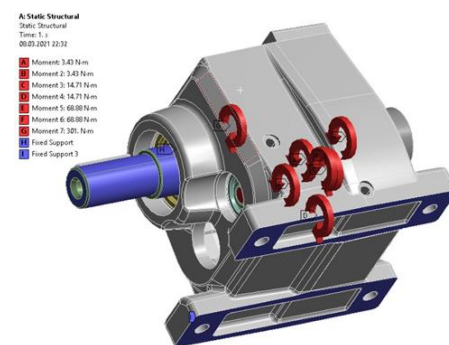


Figure 6. Fixed supports

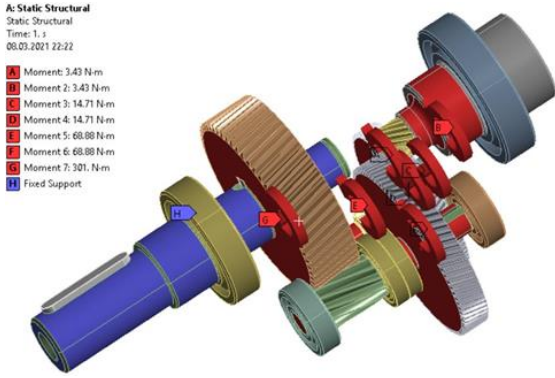


Figure 7. Moment application to shafts and fixed supports

6 Analysis results

There are 6 gears in contact with each other. Two parameters of the analysis results are presented here. These are; total deformation and equivalent (von Mises) stress.

6.1 Results of static analysis

In this part of our analysis, the end of the output shaft and the bottom surfaces of the gearbox case are fixed, and a torsional moment is applied from the input shaft of the gearbox. The driving force behind this analysis is to calculate the static stresses and deformations of the gearbox, namely total deformation and maximum and minimum principal stresses, and equivalent (von Mises) stress. A logarithmic scale is chosen for color change and results chart bar. Those calculated parameters for gears and shafts are depicted in Figure 8 and Figure 9.

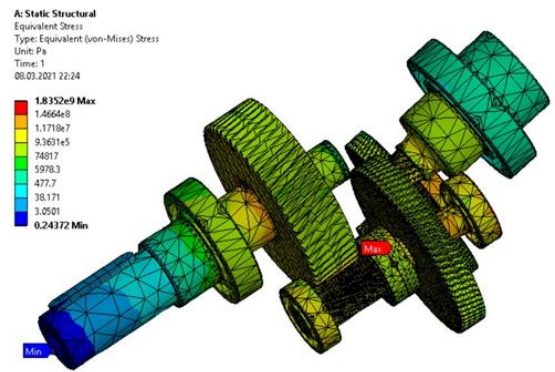


Figure 8. Equivalent (von Mises) stress results of gearbox

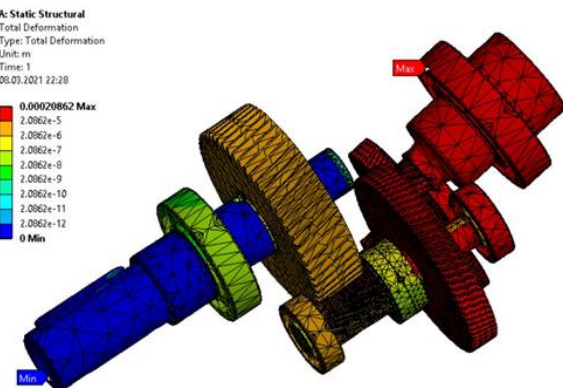


Figure 9. Total deformation of gearbox

To be able to see the deformation and stress on the gearbox casing, torsion is applied from the input shaft, and the output shaft and bottom of the casing are fixed, as presented in Figure 10.

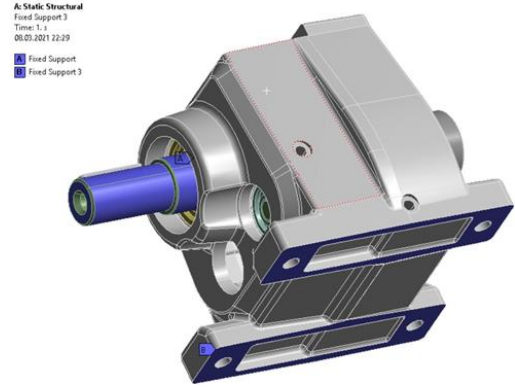


Figure 10. Fixed supports at casing, input, and output shafts

The logarithmic scale is selected for presenting the calculated parameters in a better visual format. Equivalent (von Mises) stress and total deformation results are presented in Figure 11 and Figure 12, respectively.

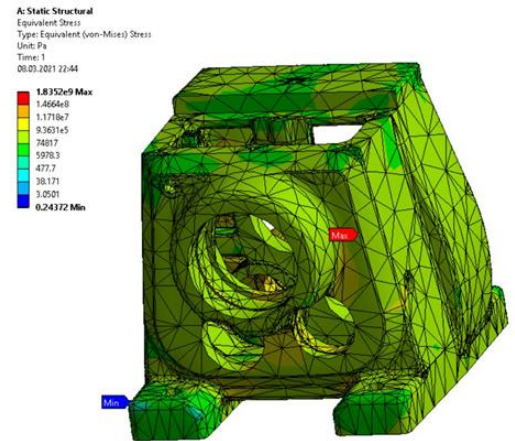


Figure 11. Equivalent (von Mises) stress results of the gearbox casing

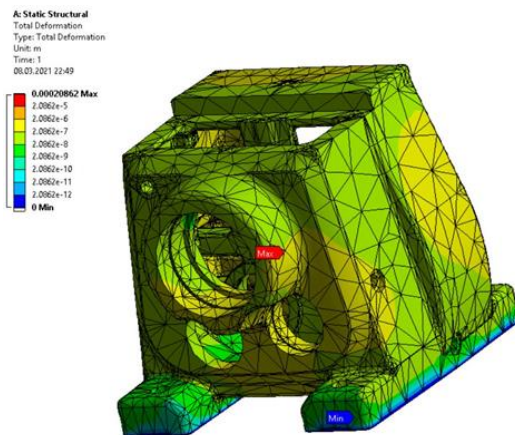


Figure 12. Total deformation of the gearbox casing

6.2 Results of dynamic analysis

6.2.1 Mode shape analysis

The mode shape is a special vibration pattern that is carried out by a mechanical system at certain frequencies. Depending on the stiffness of the engineering structures, different mode shapes is associated with different frequencies. The experimental technique of modal analysis explores these modal shapes and frequencies, but it is rather time-consuming and costly.

In the mode shape analysis of this three-stage gearbox, maximum 6 modes are selected. Total deformation is solved by selecting modes from 1 to 6. The image of the maximum and minimum points of the frequencies formed in the gears are depicted separately for gears and gearbox case in Figure 13.

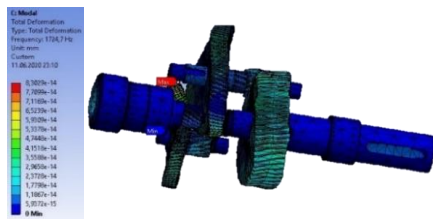


Figure 13. Results of mode 1 analysis of gears

6.2.1.1 Gears

The analysis results have revealed different mode shapes at different frequencies. The frequency results obtained are depicted in Table 6.

Table 6. Frequency of modes

Mode	Frequency (Hz)
1	1724.7
2	1902.4
3	2808.7
4	2842.6
5	3048.1
6	3069.4

6.2.1.2 Gearbox casing

In this part of the analysis, the mode shape analysis is carried out in maximum 6 modes using a case together with gears. The shape and the result in mode 1 are given in Figure 14.

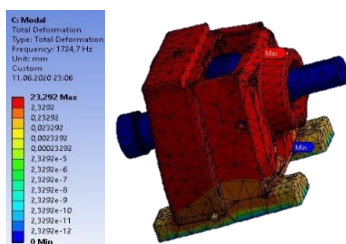


Figure 14. Results of mode 1 analysis of gearbox casing

6.2.2 Natural frequency analysis

Natural frequency analyses are used to determine the dynamic properties of a system and identify its resonant frequencies.

In this analysis, gears and casing are analyzed in 6 modes. To evaluate the behavior of gear at the resonance frequency, the natural frequencies of the gear are compared with operating frequency. The gearbox manufacturer has foreseen the operating speed of the gearbox for the range of 10,86 to 1390 rpm.

$$Fn = \frac{1}{2\pi} \omega \quad \text{and} \quad \omega = \frac{2\pi N}{60} \quad (5)$$

$$Fn = \frac{1}{2\pi} \frac{2\pi * 1390}{60} = 23,16 \text{ Hz}$$

$$Fn = \frac{1}{2\pi} \frac{2\pi * 10,86}{60} = 0,181 \text{ Hz}$$

Thus, the operating frequency range of the gearbox is in between 24 Hz to 0.1 Hz approximately. This range is very small compared with the lowest natural frequency of 1724.7 Hz. Hence FEM results reveal that resonance will not take place on the gearbox and the design is safe for both gears and casing. Min frequency is 1724.7 Hz, and the maximum frequency is 3069.4.

7 Discussions

7.1 Discussion of static analysis

In this section, the results presented here are discussed. The stress occurring on each gear under static loading is questioned compared with the yield strength of the gear material.

In the analysis, we observed the maximum von Mises stress value of 994.86 MPa on the 3rd gear. It is foreseen that this excessive von Mises stress is above the yield strength, which is 833 MPa, and as a result, it appears that a failure is inevitable on the gear ends. These higher stresses are attributed to the geometric incompatibility in the gearbox system, mainly the distance between the related shaft axes. Another source of these high stresses could be the misalignments of the shafts [14]. These misalignments may result from elastic deformation, manufacturing, and/or assembly errors.

As a casing material, structural steel is used in the analysis. As seen in the results, the maximum stress is in the bearing of the shaft carrying the 4th and 5th gears and has a value of 35,16 MPa which is well below the yield strength of the casing material, (460 MPa). As a result, it could be concluded that there is room for reducing the weight of the gearbox casing.

7.2 Discussions of dynamic analysis

7.2.1 Mode shape analysis

In this section, 6 modes are selected, the modal analysis is performed, and mode shapes are obtained. The most noticeable result is to observe that, regarding the mode shapes of gears, shafts, and casing, the total deformation of

the casing at all the natural frequency values is much higher than the gears. It might mainly since the material and the stiffness of the gearbox casing is different from the shafts and gears.

7.2.2 Natural frequency analysis

When the results of the natural frequency analysis are examined, it is much less than the calculated operation frequencies of the system. Thus, the results of this analysis reveal that this gear system with the given design parameters is safe against resonance.

8 Conclusions

In this study, analysis of the three-stage gearbox is carried out in Ansys using the finite element method. Static and dynamic analyses of gears, shafts, and casing of the gearbox are performed. After the necessary boundary conditions are set, the parts' materials are assigned. After carefully creating the meshes setting the boundary conditions, for obtaining more accurate solutions, finer meshes are created at critical locations. After obtaining the solution, total deformation, von Mises, maximum principal stresses, and minimum principal stresses options are paid special attention in static analysis results. In the calculations section, it is examined whether the gearbox can withstand the targeted torques with a 1.5 safety factor.

Besides the static analysis, the dynamic analysis is carried out in the system. The modal analysis option of Ansys software is used in dynamic analysis. Thus, the mode shape analysis and the natural frequency analyzes are carried out. While creating mode shape analyzes, maximum of 6 modes are used and frequency values in each mode are examined. In the natural frequency analysis section, F_n values are calculated by considering the input and output rpm values in the gearbox. The targeted operating values are in a much smaller range than the frequency values obtain in different modes in the program. Thus, there will be no resonance for the gearbox design, and it can be used safely.

In this study, the static and dynamic analyzes of the three-stage gearbox are targeted and the results of the analysis are presented and discussed. To increase the accuracy of the analysis and obtain more precise results, the analyses could be made on powerful computers. Furthermore, the gears and wedges in contact with each other have been contacted using the no separation option, more powerful computing resources may give better results if the frictional option is considered in the analysis. Another issue is that in this study spheres are created to tighten the mesh processes, but in the regions where higher stresses are expected, the body sizing method could be considered for more accurate and sensible results.

Declaration of interest

The author declares that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Similarity rate (iThenticate): %12

Kaynaklar

- [1] F. Petrescu, R. Petrescu, Gear's Design for the Mechanism's Highest Efficiency, Bucharest, Romania, 2005.
- [2] K. J. Bathe, Finite Element Procedures, Prentice-Hall, Pearson Education, Inc., Second Edition, 2014.
- [3] D. Yang, Z. Yu, L. Zhang, W. Cheng, "Modal Analysis of Automobile Brake Drum Based on ANSYS Workbench", Advances in Computer Science Research, 75, 608-612, 2017 <https://doi.org/10.2991/mcei-17.2017.129>
- [4] B. S. Vikhe, Optimization of Industrial Gear Box Casing, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 3(12), 686-691, 2016.
- [5] M. Vijaykumar, M. Shivaraju, M. Srikanth, Vibration Analysis for Gearbox Casing Using Finite Element Analysis. The International Journal of Engineering And Science (IJES), 3(2), 18-36, 2014
- [6] V. Ramamurti, A Computer-aided Design of a Two-stage Gearbox, Advances in Engineering Software, 28(1), 73-82, 1997 [https://doi.org/10.1016/s0965-9978\(96\)00042-7](https://doi.org/10.1016/s0965-9978(96)00042-7)
- [7] P. D. Devan, C. R. Muruganatham, Determination of Natural Frequencies of Spur Gear in Portal Axle Gearbox, International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE), 8(9S2), 422-426, 2019.
- [8] I. Yesilyurt, F. Gu, A. D. Ball, Gear Tooth Stiffness Reduction Measurement Using Modal Analysis and Its Use in Wear Fault Severity Assessment of Spur Gears. NDT & E International. 36(5), 357-372, 2003, [https://doi.org/10.1016/s0963-8695\(03\)00011-2](https://doi.org/10.1016/s0963-8695(03)00011-2)
- [9] P. Weis, K. Kučera, P. Pecháč, M. Močilan, Modal Analysis of Gearbox Housing with Applied Load. Procedia engineering. 192, 953-958, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.164>
- [10] R. G. Budynas, J. K. Nisbett, Shigley's Mechanical Engineering Design, 9. Ed., New York 2011.
- [11] MatWeb, Material Property Data, <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matgu id=8979f7b4e06d49d691afef1abb837846&ckck=1> Accessed: 23 December 2019
- [12] ASM Aerospace Specification Metals Inc., <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?b assnum=M862AR>, Accessed: 23 December 2019
- [13] ANSYS R19.1, Workbench User's Guide, 2019
- [14] M. A. Adnan, A. Shehata, Stress Analysis Validation for Gear Design, MSc Thesis, Blekinge Institute of Technology, Gothenburg, Sweden, 2018.





A similarity approach to boundary layer equations of a non-Newtonian fluid: Carreau-Yasuda model

Bir non-Newtonyen akışkanının sınır tabakası denklemleri için benzerlik yaklaşımı: Carreau-Yasuda modeli

Yiğit Aksoy^{1,*} , Hikmet Sümer² , Kıvanç Samra³ 

^{1,2,3}Manisa Celal Bayar University, Mechanical Engineering Department, 45140, Manisa, Turkey

Abstract

The present study considers a non-Newtonian flow over a horizontally immersed flat plate kept at a different temperature relative to the fluid. An inviscid free stream with uniform velocity induces the flow over the plate where an incompressible boundary layer viscously occurs. It is stipulated that the fluid obeys the Carreau-Yasuda constitutive equation. Analytical investigations begin with the derivation of momentum and energy equations followed by boundary layer simplifications. Scaling symmetries are subsequently calculated to define similarity variables to transform boundary layer equations into ordinary differential forms. Later, solutions of the governing equations are pursued by a numerical scheme based on finite differences. Thanks to those solutions, the effects of significant non-dimensional parameters, such as Deborah and Prandtl numbers, on both momentum and thermal boundary layers are examined throughout the figures. The Nusselt number's variation with non-dimensional numbers is also questioned for the study's heat transfer part.

Keywords: Non-newtonian fluids, Carreau fluid, Carreau-Yasuda fluid, Boundary layer flow, Similarity transformations.

1 Introduction

Many fluids commonly possess a varying viscosity with shear rate and dissociate from Newtonian fluids of constant viscosity. Various mathematical models have been proposed to predict their flow for almost a century. Rather than more general non-Newtonian fluids, several fluids, such as ketchup, toothpaste, and blood that may obey these constitutive equations, are generalized Newtonian fluids [1]. Accordingly, unlike Newtonian fluid's constant viscosity, a generalized Newtonian fluid, briefly GNF, shall exhibit its viscosity, namely apparent viscosity, to either rise or decies under varying shear rate conditions. When the viscosity reduces with increasing shear rate, the fluid is called shear thinning, whereas shear-thickening for growing viscosity. Before getting started in mathematical aspects, we further remark that while increasing shear rate, the apparent viscosity ranges from an initial to a limit value, and between

Özet

Bu çalışmada, akışkana göre farklı bir sıcaklıkta ve yatay olarak yerleştirilmiş düz bir plaka üzerinde Newtonyan olmayan bir akış göz önüne alınmıştır. Sıkıştırılamaz, kararlı ve düzgün hıza sahip viskoz olmayan bir serbest akım plaka üzerinde viskoz bir sınır tabakası akışına neden olmaktadır. Newtonyen olmayan akışın Carreau-Yasuda akışkan modeline uyması öngörülmüştür. Analitik yaklaşım, momentum ve enerji denklemlerinin türetilmesi ve ardından sınır tabakası basitleştirmeleri ile başlar. Denklemlerin ölçekleme simetrisi kullanılarak hesaplanan benzerlik değişkenleri vasıtası ile kısmi diferansiyel denklem formunda olan sınır tabakası denklemleri adi forma indirgenmiştir. Daha sonra, Söz konusu denklemlerin sayısal çözümleri sonlu farklar algoritmasına dayanan sayısal bir çözümleyici ile bulunmuştur. Bu çözümler sayesinde, Deborah ve Prandtl sayıları gibi önemli boyutsuz parametrelerin hem momentum hem de termal sınır tabakası kalınlıkları üzerindeki etkileri grafikler üzerinden incelenmiştir. Ayrıca Nusselt sayısının boyutsuz sayılara göre değişimi de çalışmanın ısı transferi kısmı için araştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Newtonyen olmayan akışkan, Carreau akışkanı, Carreau-Yasuda akışkanı, Sınır tabakası akışı, Benzerlik dönüşümleri.

these values, each apparent viscosity has a unique curve. Excluding shear rates where initial viscosity is exceeded and limit viscosity values are reached, the fluid can exhibit Newtonian behavior, which indicates constant viscosity. However, the apparent viscosity solely alters in the transition zone, namely, the power-law zone, where the fluid exposes non-Newtonian behavior. A convenient mathematical model that can anticipate the zones in an optimum manner requires the least parameter to fit the viscosity data with a minimal deviation. In practice, however, only focusing on the power-law zone, the Oswalt-de-Waele model [2], i.e., power-law fluid, is frequently used due to its simple mathematical form as below:

$$\mu(|\dot{\gamma}|) = \eta |\dot{\gamma}|^{n-1} \quad (1)$$

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: yigit.aksoy@cbu.edu.tr (Y. Aksoy)

Geliş / Recieved: 14.12.2020 Kabul / Accepted: 30.03.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.840284

where μ is the apparent viscosity, $|\dot{\gamma}|$ is the rate of deformation tensor, η is the consistency index and n is the power-law index. Since the apparent viscosity in the preceding formula is proportional to $n - 1$ power of the shear rate, the fluid gets thinner as shear rate increases for $n < 1$. Such fluids are called “shear thinning” as mentioned before, otherwise “shear thickening” for $n > 1$. Although a viscous fluid must have a non-zero and finite viscosity at any shear rate, the power-law formula yields zero and infinite values for the apparent viscosity at very low and at very high shear rates, respectively. To overcome the shortcoming in question, numerous mathematical models, for instance, Cross [3], Sisko [4], Carreau [5], and Carreau-Yasuda [6], have emerged over the years to ensure the entire viscosity curve. For the rest of the study, we now pay our attention to the Carreau-Yasuda model by the equation:

$$\mu(|\dot{\gamma}|) = \mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty) \left(1 + \lambda |\dot{\gamma}|^m\right)^{\frac{n-1}{m}} \quad (2)$$

In the equation above, μ_0 and μ_∞ are the limit viscosities at the very low and high enough shear rates, respectively, and n is power-law index as the former. Unlike the Oswald-de-Waele model, Carreau-Yasuda requires secondary power-law exponent m that characterizes the curvature connecting the Newtonian plateau with the power-law region. λ the time constant, namely material relaxation time defines specific shear rates corresponding to boundaries of the power-law region in a viscosity-shear rate curve. GNF models lack molecular insight due to their strong empirical base but can roughly describe molecular weight dependence of viscosity by correlating the time constant with molecular structure. Note that when $m = 2$, Equation (2) turns out to Carreau fluid model [5] moreover Newtonian fluid for $\lambda = 0$.

Carreau-Yasuda and its predecessor have been extensively used in studies on non-Newtonian flow problems for recent years. For instance, a peristaltic flow of electrically conducting Carreau-Yasuda fluid induced by the peristaltic motion of a curved channel is examined under the influence of a magnetic field by Abbasi et al. [7]. Boyd and Buick [8] studied a blood-flow inside arteries and treated the blood as Carreau-Yasuda and Casson model compared to analogous Newtonian flows. Raju [9] et al. assessed Carreau, Ellis, and Cross models' applicability to polymeric materials' viscosity data. The study reveals that Carreau and Ellis are far ahead of the Cross model regarding the overall error in estimates of the non-Newtonian viscosity-shear rate relationship. Due to their ease of calculations, among non-Newtonian fluid models, GNF formulas, especially Carreau, Cross, and power-law models [10], are widely used in commercial software products such as Moldflow, Comsol, and Ansys.

Governing equations of a Newtonian fluid require powerful analytical or most likely numerical tools to analyze, and so do those of non-Newtonian fluids, of course. Therefore, numerical approaches are conventional for the solutions, albeit the need for supercomputers due to intensive matrix operations. In contrast, analytical solutions are more robust and reliable, nevertheless literally rare in the literature. As well as linearization procedures, logical

simplifications on the equations can also be prerequisites for the analytical solutions. Thus, results are possibly approximate and limited; however, they are still necessary for the fundamental understanding and will be. As one of those and a systematic approach for ease of calculation, the boundary layer theory [11] recently draws keen attention, especially in non-Newtonian fluid flows over solid bodies. Boundary layer theory states that if the changes occur only in a narrow area, not all the factors affecting the problem may be necessary, so that some may be negligible. It is, therefore, a general guide that enables us to reach a more straightforward form of governing equations. While considering only conservation of momentum for flow over a flat plate, boundary layer equations of Carreau fluid are derived and solved numerically in [12]. The boundary layer approach yields partial differential equations ultimately, despite being quite simplifying. However, in most studies, unlike [12], transforming boundary layer equations into ordinary differential equation forms using similarity variables is preferred for ease of numerical calculations. For instance, Khan and Hashim [13] presented a stepwise study on Carreau fluid flow over a stretched sheet and obtained similarity solutions for both momentum and thermal boundary layer equations.

Similarity solutions necessitate new variables, namely similarity variables, which can transform boundary layer equations ultimately into relevant ordinary form. Although conventional forms of similarity are used in most studies, Lie group techniques detailed in [14] may unveil further by finding out invariants, i.e., symmetries, of the equations. Applications of Lie groups on non-Newtonian fluids, especially GNF, are given in [15-17] for consideration of readers. We intend to conduct an analytical study on a non-Newtonian fluid flow over a flat plate in light of previous studies. On account of studying the cooling of the cold plate, the heat transfer part of the problem is further considered in terms of non-dimensional parameters, especially the Nusselt number, which is engineering interest to evaluate. As the Carreau-Yasuda model holds for non-Newtonian behavior in the flow, we ignore viscous heating in the energy equation. We divide the study into the following sections, respectively; formulation of the problem, boundary layer analysis, similarity transformations, and finally, numerical solutions followed by comments of the results via figures.

2 Physical configuration and conservation laws

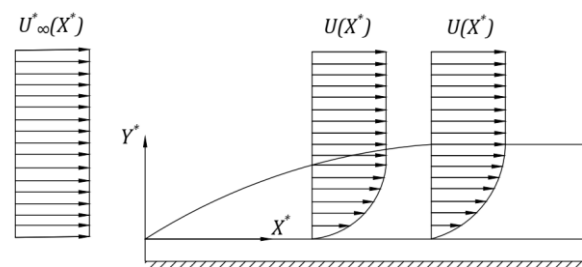


Figure 1. Schematic view of boundary layer flow over a flat plate.

Before embarking on the study's theoretical aspects, let us introduce a schematic description of the problem through Figure 1. As shown in the representation, an incompressible stream is of a uniform velocity profile until it reaches the motionless plate. As soon as the flow is in contact with the plate, the pioneer fluid layer takes its velocity, namely zero, due to the slip law. As ascending perpendicular to the plate, the subsequent layers tend to increase their velocity to the free stream velocity relative to the subjacent layer. Along the plate's length, the spatial distribution of points where fluid layers already acquire the free stream velocity carves out the momentum boundary layer in Figure 1. Note that the thermal part of the sketch is to be described before deriving the energy equation.

2.1 Momentum equations

To determine the velocity profile for an incompressible flow, first, we give the tensorial form of Cauchy momentum equation regardless of the coordinate system and fluid model as below,

$$\rho \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -\nabla P^* - \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (3)$$

where ρ is the density, \mathbf{v} is the vectoral velocity, ∇P^* is the pressure gradient and $\boldsymbol{\tau}$ is the stress tensor specific to the fluid type. Accordingly, continuity equation is:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (4)$$

which holds for compressible flows. In cartesian coordinates, Equation (3) turn out to be,

$$\rho \left(u^* \frac{\partial u^*}{\partial X^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial Y^*} \right) = \frac{\partial P^*}{\partial X^*} + \frac{\partial}{\partial X^*} \tau_{x^*x^*} + \frac{\partial}{\partial Y^*} \tau_{x^*y^*} \quad (5)$$

$$\rho \left(u^* \frac{\partial v^*}{\partial X^*} + v^* \frac{\partial v^*}{\partial Y^*} \right) = \frac{\partial P^*}{\partial Y^*} + \frac{\partial}{\partial X^*} \tau_{x^*y^*} + \frac{\partial}{\partial Y^*} \tau_{y^*y^*} \quad (6)$$

for X^* and Y^* momentum, respectively, and Equation (4) is simply:

$$\frac{\partial u^*}{\partial X^*} + \frac{\partial v^*}{\partial Y^*} = 0 \quad (7)$$

One can obtain stress components in momentum equations from Equation (2), accordingly:

$$\tau_{x^*x^*} = 2 \left[\mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty) \left(1 + \lambda^m \left(2 \left(\frac{\partial u^*}{\partial X^*} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v^*}{\partial Y^*} \right)^2 + \left(\frac{\partial u^*}{\partial Y^*} + \frac{\partial v^*}{\partial X^*} \right)^2 \right)^{\frac{m-1}{2}} \right] \frac{\partial u^*}{\partial X^*} \quad (8)$$

$$\tau_{x^*y^*} = \left[\mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty) \left(1 + \lambda^m \left(2 \left(\frac{\partial u^*}{\partial X^*} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v^*}{\partial Y^*} \right)^2 + \left(\frac{\partial u^*}{\partial Y^*} + \frac{\partial v^*}{\partial X^*} \right)^2 \right)^{\frac{m-1}{2}} \right] \left(\frac{\partial v^*}{\partial X^*} + \frac{\partial u^*}{\partial Y^*} \right) \quad (9)$$

$$\tau_{y^*y^*} = 2 \left[\mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty) \left(1 + \lambda^m \left(2 \left(\frac{\partial u^*}{\partial X^*} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v^*}{\partial Y^*} \right)^2 + \left(\frac{\partial u^*}{\partial Y^*} + \frac{\partial v^*}{\partial X^*} \right)^2 \right)^{\frac{m-1}{2}} \right] \frac{\partial v^*}{\partial Y^*} \quad (10)$$

Notice that since stress tensor is inherently symmetric, it is unnecessary to express $\tau_{x^*y^*}$ above, i.e., $\tau_{x^*y^*} = \tau_{y^*x^*}$. Before boundary layer analysis, complete analytical forms of momentum equations follow in the steps of Equation (5-10) except Equation (6). Alternatively, we apply boundary layer assumptions to Equation (5,6) and Equation (8,10) separately instead of exact momentum equations.

2.2 Energy equations

Predicating the plate and free stream at discrete temperatures of T_w^* and T_∞^* , respectively, the fluid's temperature is likely to vary in the vicinity of the surface, referred to as the thermal boundary layer. However, the conservation of energy also applies to this narrow zone. Right then, the energy equation reads

$$u^* \frac{\partial T^*}{\partial X^*} + v^* \frac{\partial T^*}{\partial Y^*} = \frac{k}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T^*}{\partial X^{*2}} + \frac{\partial^2 T^*}{\partial Y^{*2}} \right) \quad (11)$$

in which k, ρ and c_p are, in turn, thermal conductivity, density, and specific heat of the fluid. Furthermore, known solid surface and free-stream temperature conditions imposed on Equation (11) are;

$$T^*(X^*, 0) = T_w^* \text{ and } T^*(X^*, \infty) = T_\infty^* \quad (12)$$

3 Boundary layer analysis

One can define the thickness of the boundary layer, i.e., $\delta^*(X^*)$, as a distance from the surface of the plate where fluid achieves %99 of the velocity of the free stream. For convenience, let us assume the thickness is minimal, therefore mathematically speaking, $\delta^*(X^*) \ll 1$. Conventional boundary layer assumptions require following order of magnitude estimates.

$$x^* \sim O(1), y^* \sim O(\delta), u^* \sim O(1), v^* \sim O(\delta) \text{ and } \delta^{*2} \ll \delta^* \ll \frac{1}{\delta^*} \ll \frac{1}{\delta^{*2}} \quad (13)$$

Following above relations, retaining the highest order terms, the x-momentum equation then reads:

$$\rho \left(u^* \frac{\partial u^*}{\partial X^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial Y^*} \right) = \frac{\partial P^*}{\partial X^*} + \frac{\partial}{\partial Y^*} \tau_{x^*y^*} \quad (14)$$

Invoking the same estimates, Equation (9) reduces to;

$$\tau_{x^*y^*} = \left[\mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty) \left(1 + \lambda^m \left(\frac{\partial u^*}{\partial Y^*} \right)^m \right)^{\frac{m-1}{2}} \right] \frac{\partial u^*}{\partial Y^*} \quad (15)$$

Since the initial viscosity is greater than limit viscosity for shear thinning fluids, i.e., $\mu_0 \gg \mu_\infty$, we can disregard μ_∞ from above by comparison with μ_0 . Substituting Equation (15) into Equation (14), one can obtain the x-momentum equation in a reduced form as follows:

$$\rho \left(u^* \frac{\partial u^*}{\partial X^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial Y^*} \right) = -\frac{\partial P^*}{\partial X^*} + \mu_0 \left(1 + \lambda^m \left(\frac{\partial u^*}{\partial Y^*} \right)^m \right)^{\frac{n-1}{m}} \frac{\partial^2 u^*}{\partial Y^{*2}} + \mu_0 \lambda^m (n-1) \left(1 + \lambda^m \left(\frac{\partial u^*}{\partial Y^*} \right)^m \right)^{\frac{n-m-1}{m}} \left(\frac{\partial u^*}{\partial Y^*} \right)^m \frac{\partial^2 u^*}{\partial Y^{*2}} \quad (16)$$

Notice that μ_0 and λ have to be of order δ^{*2} and δ^{*m} respectively to retain terms except those of viscous. The dimensionless variables and parameters can be defined as follows.

$$u = \frac{u^*}{V}, v = \frac{v^*}{V}, X = \frac{\rho V}{\mu_0} X^*, Y = \frac{\rho V}{\mu_0} Y^*, P = \frac{P^*}{\rho V^2} \text{ and } U_\infty = \frac{U_\infty^*}{V} \quad (17)$$

where V is the reference velocity related to the free stream velocity U_∞^* . Substituting new variables into Equation (16) and rearranging terms to be dimensionless, the x-momentum equation reads,

$$u \frac{\partial u}{\partial X} + v \frac{\partial u}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \left(1 + \left(De \frac{\partial u}{\partial Y} \right)^m \right)^{\frac{n-1}{m}} \left[1 + (n-1) \frac{\left(De \frac{\partial u}{\partial Y} \right)^m}{1 + \left(De \frac{\partial u}{\partial Y} \right)^m} \right] \frac{\partial^2 u}{\partial Y^2} \quad (18)$$

in which $De = \lambda \rho V^2 / \mu_0$ is referred to the Deborah number that withstands non-Newtonian behavior. Keeping in mind that $\mu_0 \sim O(\delta^{*2})$ and $\lambda \sim O(\delta^{*m})$ as well as considering Equation (13), y-momentum therefore turns out to be:

$$\frac{\partial P}{\partial Y} = 0 \quad (19)$$

which indicates $P = P(X)$. Thus, the pressure distribution outside the boundary layer is calculated by the potential theory for the inviscid free stream as follows:

$$P = -\frac{1}{2} U^2 + \text{constant} \quad (20)$$

We obtain pressure gradient involved in Equation (18) by deriving Equation (20) with respect to X ,

$$\frac{dP}{dX} = -U \frac{dU}{dx} \quad (21)$$

Substituting preceding into Equation (18) yields the final form of the boundary layer equation of Carreau-Yasuda fluid as below:

$$u \frac{\partial u}{\partial X} + v \frac{\partial u}{\partial Y} = U \frac{dU}{dx} + \left(1 + \left(De \frac{\partial u}{\partial Y} \right)^m \right)^{\frac{n-1}{m}} \left[1 + (n-1) \frac{\left(De \frac{\partial u}{\partial Y} \right)^m}{1 + \left(De \frac{\partial u}{\partial Y} \right)^m} \right] \frac{\partial^2 u}{\partial Y^2} \quad (22)$$

subjected to following non-dimensional boundary conditions;

$$u(X, 0) = v(X, 0) = 0, u(X, \infty) = U \text{ and } \frac{\partial u}{\partial Y}(X, \infty) = 0 \quad (23)$$

The total drag force exerted by fluid to the plate is attributed to the shear stress experienced by the surface. In non-dimensional form, the appropriate shear stress component given in Equation (15) is accordingly is set to the surface as below.

$$\tau_{xy} = \left(1 + \left(De \frac{\partial u}{\partial Y}(0) \right)^m \right)^{\frac{n-1}{m}} \frac{\partial u}{\partial Y}(0) \quad (24)$$

In a similar fashion, boundary layer assumptions simplify the energy equation in non-dimensional form to,

$$\frac{u}{r(X)} \frac{\partial}{\partial X} (r(X)T) + v \frac{\partial T}{\partial Y} = Pr^{-1} \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} \quad (25)$$

where $Pr = c_p \mu_0 / k$ is the Prandtl number. The dimensionless temperature is defined as;

$$T = \frac{(T^* - T_\infty^*)}{(T_w^* - T_\infty^*)} \frac{1}{r(X)} \quad (26)$$

in which $r(X)$ is deliberately assigned to the denominator to transform boundary conditions with success and to be acquired in an analytical form later. The boundary conditions are written dimensionless as

$$T(X, 0) = \frac{1}{r(X)} \text{ and } T(X, \infty) = 0 \quad (27)$$

By now, we have the momentum and thermal boundary layer equations in partial differential equation forms, about which a thorough search of the relevant literature did not yield any related article on Carreau-Yasuda fluid. Thus, the equations have, to the best of the authors' knowledge, not been presented in literature before.

4 Symmetries of the boundary layer equations

A set of transformations that remains an equation invariant is a type of symmetry in an algebraic manner. The existence of such symmetries may lead us to success in solutions of the differential equation. Using the symmetries, in essence, as a set of transformations belonging to a partial differential equation, a reduction to an ordinary form is quite possible. Lie groups and their algebra overcome the problems associated with finding out fundamental symmetries that a differential equation accepts. For the details of the theory, please refer to Bluman and Kumei [14]. Considering the findings, equations arising from boundary layer flows admit several transformations for the symmetries, such as scaling and translational [18]. As was just pointed out, we only consider scaling symmetries to adopt the equations and, hence, define the following new variables as;

$$\bar{x} = e^{-\alpha} x, \bar{y} = e^{-\alpha} y, \bar{u} = e^{-\alpha} u, \bar{v} = e^{-\alpha} v, \bar{U} = e^{-\alpha} U, \bar{T} = e^{-\alpha} T, \bar{r} = e^{-\alpha} r \quad (28)$$

In terms of the above variables, momentum, continuity, and energy equations, in turn, are

$$\begin{aligned} \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} + e^{-\alpha_3 + \alpha_1 + \alpha_4 - \alpha_2} \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{y}} &= e^{-2\alpha_3 - 2\alpha_1} \bar{U} \frac{\partial \bar{U}}{\partial \bar{x}} + e^{-\alpha_3 - 2\alpha_2 + \alpha_1} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{y}^2} \\ \left(1 + \left(e^{\alpha_3 - \alpha_2} De \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{y}} \right)^m \right)^{\frac{n-1}{m}} &\left(1 + (n-1) \frac{\left(e^{\alpha_3 - \alpha_2} De \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{y}} \right)^m}{1 + \left(e^{\alpha_3 - \alpha_2} De \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{y}} \right)^m} \right) \\ \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} + e^{\alpha_1 - \alpha_3 + \alpha_4 - \alpha_2} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{y}} &= 0, \\ \frac{\bar{u}}{\bar{r}(\bar{x})} \frac{\partial}{\partial \bar{x}} (\bar{r}(\bar{x}) \bar{T}) + e^{-\alpha_3 + \alpha_1 + \alpha_4 - \alpha_2} \bar{v} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{y}} &= Pr^{-1} e^{-2\alpha_2 - \alpha_3 + \alpha_1} \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{y}^2} \end{aligned} \quad (29)$$

$$f(\infty) = 1. \quad (35)$$

Fortunately, the remaining conditions in Equation (23) are not alike the previous, that is,

$$f(0) = 0, g(0) = 0, f'(\infty) = 0. \quad (36)$$

In the following, we treat analogously the first condition in Equation (23)

$$z(0) = \frac{x^{-1/3}}{r(x)} \quad (37)$$

from which we extract the following equations leaving the original equations invariant.

$$\begin{aligned} \alpha_1 - \alpha_3 + \alpha_4 - \alpha_2 &= 0, \\ -2\alpha_3 + 2\alpha_5 &= 0, \\ \alpha_1 - 2\alpha_2 - \alpha_3 &= 0, \\ \alpha_3 - \alpha_2 &= 0. \end{aligned} \quad (30)$$

Notice that all parameters can be found in terms of α_3 , whereas α_6 and α_7 are arbitrary due to lack of equations depending on them. Thus, the invariance holds if and only if,

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 3\alpha_3, \\ \alpha_2 &= \alpha_3, \\ \alpha_4 &= -\alpha_3, \end{aligned} \quad (31)$$

regardless of α_6 and α_7 . Setting $\alpha_6 = 1$ and remaining α_7 as itself, the associated equations which yield similarity variable and functions are;

$$\frac{dx}{3x} = \frac{dy}{y} = \frac{du}{u} = \frac{dv}{-v} = \frac{dU}{U} = \frac{dT}{T} = \frac{dr}{\alpha_7 r}. \quad (32)$$

Stepwise integration of the system leads to the similarity variable and functions,

$$\begin{aligned} \xi &= x^{-1/3} y, f(\xi) = x^{-1/3} u, g(\xi) = x^{1/3} v, h(\xi) = x^{-1/3} U, z(\xi) = x^{-1/3} T, \\ w(\xi) &= x^{-\alpha_7/3} r. \end{aligned} \quad (33)$$

which are expected to transform the governing equations into ordinary form. The transformation is achieved by ultimate equations in which, except similarity variables, originals are anticipated to vanish, and of course, in boundary conditions. Although comparatively tedious calculations emerge from partial differential equations, similarity transformations usually collapse due to boundary conditions. Therefore, before getting into equations, here we unconventionally exploit the reference velocity V and arbitrary constant α_7 to overcome our case. For instance, the third condition in Equation (23) is equivalent to,

$$f(\infty) = x^{-1/3} U \quad (34)$$

in which presenting the term of $x^{-1/3}$ associated with original variables is inconvenient for a complete transformation. To discard it, recalling the dimensionless stream velocity as $U = U^*/V$ and defining $V = x^{-1/3} U^*$ yield

where $r(x) = w(\xi)x^{\alpha_7/3}$ as seen from Equation (33). By the definition of dimensionless temperature given in Equation (27), $r(x)$ must depend only on x , i.e., $r = r(x)$; nevertheless, the dependence of y arises from the similarity function $w = w(\xi)$ and variable $\xi = \xi(x, y)$. There is no objection to assume $w(\xi)$ as an arbitrary constant, so that $r(x) = x^{\alpha_7/3}$ provided by $w(\xi) = 1$, since the preceding assumption that the similarity function $h(\xi)$ is assigned to 1 is fundamentally adequate. Note that it is analogously admissible for similarity function $h = h(\xi)$ to assume $h = 1$. Returning to Equation (37), it now follows that,

$$z(0) = 1 \quad (38)$$

by setting $\alpha_7 = 1$. Enforcing the similarity variables for the latter in Equation (27), we have

$$z(\infty) = 0. \quad (39)$$

In the light of previous results so far, substituting similarity variables and functions into, in turn, continuity, momentum, and thermal boundary layer equations yields

$$\begin{aligned} f - \xi f' + 3g' &= 0, \\ f^2 - \xi f f' + 3g f' &= 1 + 3f'' \left(1 + (De f')^m \right)^{\frac{n-1}{m}} \left(1 + \frac{(n-1)(De f')^m}{1 + (De f')^m} \right), \\ z'' + Pr \left(\frac{\xi f}{3} - g \right) z' &= 0 \end{aligned} \quad (40)$$

which are subjected to six boundary conditions given in Equations (35), (36), (38) and (39). Consequently, equivalence of shear stress in terms of similarity functions is

$$\tau_{xy} = \left(1 + (De f'(0))^m \right)^{\frac{n-1}{m}} f'(0) \quad (41)$$

and similarly, Nusselt number turns out to be;

$$Nu = -Re z'(0). \quad (42)$$

Scaling horizontal velocity and axis with \sqrt{Re} in Equation (17) leads that $\sqrt{Re} De$ arises as a modified Weissenberg number instead of Deborah number in the rest from Equation (18). Therefore, the Nusselt number can also be calculated using $Nu = -\sqrt{Re} z'(0)$ instead of Equation (42). In the

next chapter, we focus on a numerical procedure for the system of differential equations given in Equation (40).

5 Numerical analysis

Since the system of differential equations is highly nonlinear and coupled, exact solutions are presumably not tractable. Exploiting numerical approaches are, therefore, more useful for such systems, despite the need for higher computational labor. In order to handle a system of differential equations numerically, it is common to convert them into a first-order system in advance. Here, we start by introducing following variables;

$$f = f_1, f' = f_2, g = f_3, z = f_4, z' = f_5. \tag{43}$$

Together with solving the highest order terms from Equation (40) in terms of above variables, the first order derivatives constitute the system in question as follows,

$$\begin{aligned} f_1' &= f_2, \\ f_2' &= (f_1^2 - \xi f_1 f_2 + 3f_3 f_2 - 1) \sqrt{3(1 + (De f_2)^m)^{\frac{n-1}{m}} \left(1 + \frac{(n-1)(De f_2)^m}{1 + (De f_2)^m}\right)}, \\ f_3' &= (f_1 - \xi f_2) / -3, \\ f_4' &= f_5, \\ f_5' &= De f_5 (f_3 - \xi f_1 / 3) \end{aligned} \tag{44}$$

subject to,

$$f_1(0)=0, f_1(\infty)=1, f_3(0)=0, f_4(0)=1, f_4(\infty)=0. \tag{45}$$

In general, finite difference schemes in which differential equations are transformed to a system of algebraic equations are employed for boundary value problems, such as boundary layer equations. For the purpose of achieving numerical solutions of the system given in Equation (44), we utilize a MATLAB subroutine, i.e., bcp4c, implementing finite difference technique with adaptive mesh refinement by collocation polynomials. The numerical procedure accomplishes when the relative error tolerance of 10^{-6} is met.

6 Results and discussions

In this chapter, to feature primarily non-Newtonian effects on the boundary layer flow, the results are provided in detail through figures plotted via the numerical data. It should be emphasized here that since the boundary layer originates substantially from the horizontal velocity, we only discuss the alterations over first similarity functions related to that, namely f .

Variations of f the similarity function with increasing Deborah number are shown in Figure 2. The boundary layer undergoes thickening for an increase in Deborah number, which indicates slower fluid velocity. More simply, when a large Deborah number presents, the fluid tends to be solid-like

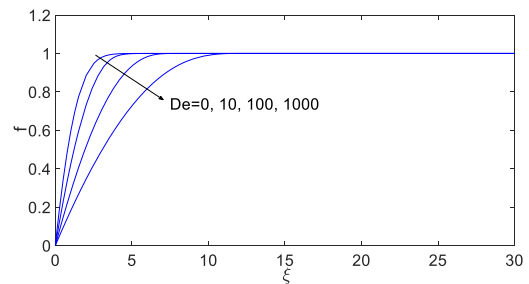


Figure 2. Variations of similarity function f related to horizontal component of the velocity for various Deborah numbers ($n = 1.5$ and $m = 2$).

In Figure 3, the effect of the power-law index n on the same similarity function is depicted. Analogous to Deborah number, giving an increase in n triggers retardation in the overall fluid velocity and consequently leads to a thicker boundary layer. It may be noted from the figure that while descending the Newtonian case, i.e., $n < 1$ related to shear thinning, resistance to flow diminishes as well, thus a thinner boundary layer is manifest.

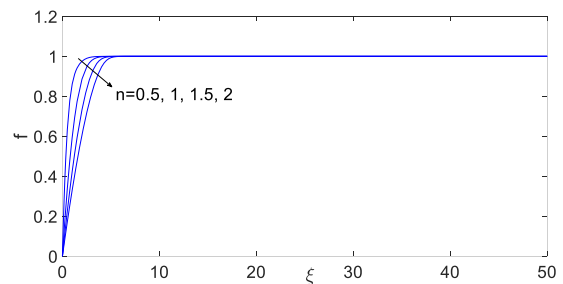


Figure 3. Variations of similarity function f related to the horizontal component of the velocity for various primary power-law index n ($De = 10$ and $m = 2$).

For the last in the debate of the momentum boundary layer, we devote Figure 4 to the alteration of f with the denominator index peculiar to the fluid model, i.e., m . As seen from the figure, m manifestly takes a contrariwise role to n in the alteration; however, as values grow, its effect progressively diminishes. Note that as $m \rightarrow \infty$, the fluid behaves more like a Newton fluid.

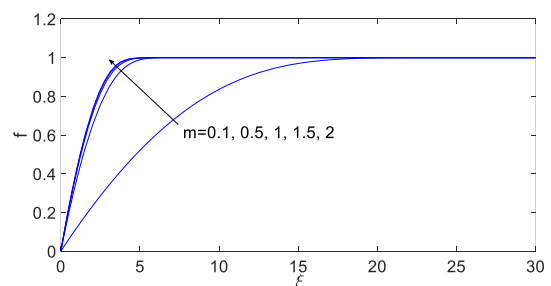


Figure 4. Variations of similarity function f related to the horizontal component of the velocity for various secondary power-law index m ($De = 10$ and $n = 1.5$).

Figure 5 depicts z the similarity function related to the fluid temperature as a function of ξ for various Deborah numbers. Following the figure, a fluid with slower velocity due to an increasing Deborah number has a higher temperature over a warmer flat plate since the convection becomes less forced. In contrast, the heat transfer between the fluid and the warmer plate enhances as the fluid gains speed at lower Deborah numbers.

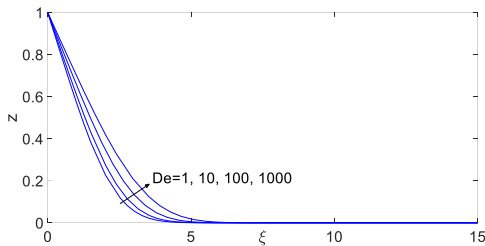


Figure 5. Variations of similarity function z related to the temperature of the fluid for various Deborah numbers ($n = 1.5$, $m = 2$ and $Pr = 1$).

In the same manner, the power-law constants, i.e., n and m , alter fluid temperature implicitly over fluid velocity, as seen from Figure 6 and Figure 7. The fluid thickens and slows down with increasing n or equivalently decreasing m and becomes warmer as a result of less effective forced convection.

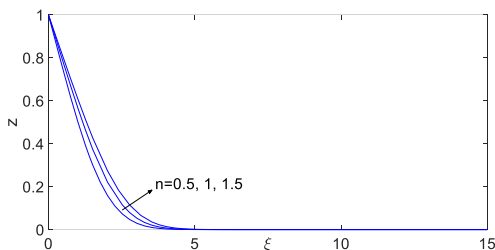


Figure 6. Variations of similarity function z related to the temperature of the fluid for various power-law index n ($De = 10$, $m = 2$, and $Pr = 1$).

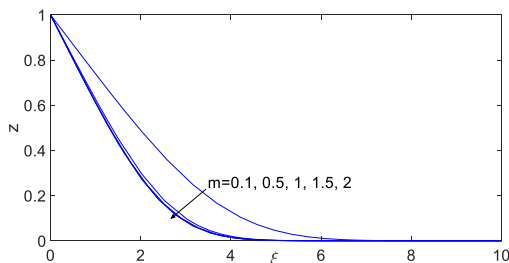


Figure 7. Variations of similarity function z related to the temperature of the fluid for various secondary power-law index m ($De = 10$, $n = 1.5$ and $Pr = 1$).

It is also convenient to employ the Prandtl number to determine whether the heat transfer is dominated by convection or conduction through the fluid motion. For a

boundary layer flow, the Prandtl number, widely regarded as the ratio of momentum diffusivity to thermal diffusivity, compares the thickness of momentum and thermal boundary layers. Thus, for various Prandtl number values, the curves of z versus ξ are plotted in Figure 8. Decreasing Prandtl number indicates that conduction becomes more critical than convection, plus shrinking the thermal boundary layer thickness. Contrarily, momentum diffusivity dominates total heat transfer, which triggers smaller temperature gradients within a thicker thermal boundary layer.

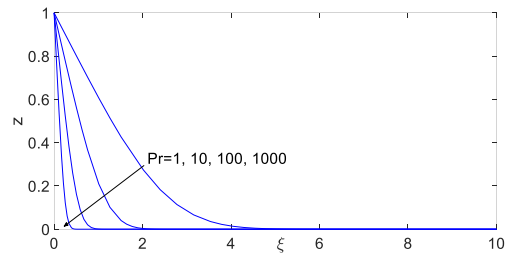


Figure 8. Variations of similarity function z related to the temperature of the fluid for various Prandtl number ($De = 10$, $n = 1.5$ and $Pr = 1$).

In seeking more in-depth insight into the convection and the rate of heat transfer, we plotted the Nusselt number as a function of Deborah number for several values of n in Figure 9. The Nusselt number is, in brief, a measure of the enhancement of heat transfer by convection relative to conduction, and therefore implies the improvement of convective heat transfer for increasing values. From Figure 9, one can observe three distinct characteristics concerning n values of Nusselt versus Deborah curves. For $n = 1$, which extinguishes the Deborah number entirely in the governing equations and corresponds to Newtonian fluid, the Nusselt number becomes constant of a value of 4.5. For $n = 1.5$ associated with a shear thickening fluid, from a value of 4.5 at $De = 0$, the Nusselt number decreases asymptotically to a value of 3.45 for an increasing Deborah number. However, for $n = 0.5$ associated with a shear-thinning fluid, the heat transfer by convection becomes elevated by increasing the Nusselt number, even though Deborah number increases considerably.

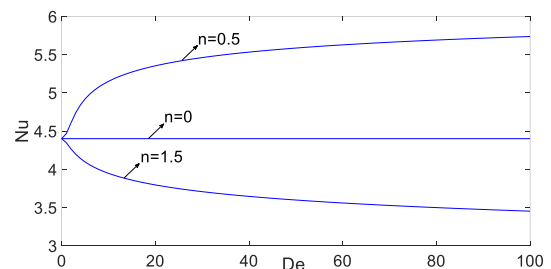


Figure 9. The Nusselt number curves as a function of the Deborah number for various primary power-law index n ($Re = 10$, $m = 2$ and $Pr = 1$).

Since it is also of interest to examine how the Nusselt number can vary with the Prandtl number and m , Figure 10 is plotted. Unlike n , increasing m makes fluid thinner, which leads Nusselt number to increase as would be expected. Furthermore, from the figure, we infer that as the Prandtl number increases, the flow becomes more convective compared to the conduction, which gives the Nusselt number rise.

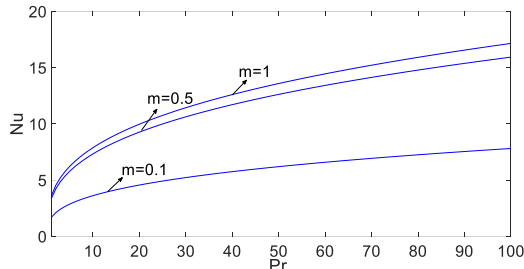


Figure 10. The Nusselt number curves as a function of the Prandtl number for various secondary power-law index m ($Re = 10$, $n = 2$ and $De = 10$).

Relying on Equation (41), Figure 11 depicts the non-dimensional shear stress varying with Deborah number for various n values. As seen from the figure, the friction force that is merely exerted by shear thickening fluids, i.e., n in excess of 1, grows while both De and n increase. For a shear-thinning fluid of $n = 0.5$, conversely, the friction force associated with shear stress on the surface reduces asymptotically as Deborah number increases. Even though fluids considered in the figure are mere shear-thinning, we must state that a shear-thickening fluid responds contrariwise as Deborah number increases. However, the response of shear stress acts reversely for increasing m values which diminish the apparent viscosity, as seen from Figure 12.

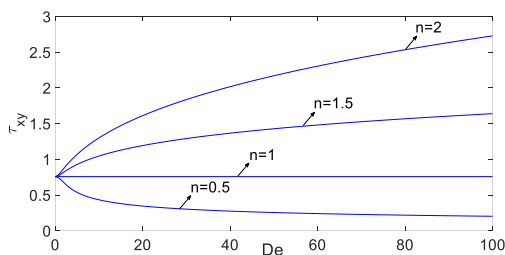


Figure 11. The shear stress curves as a function of the Deborah number for various power-law index n ($Re = 10$, $m = 2$ and $Pr = 1$)

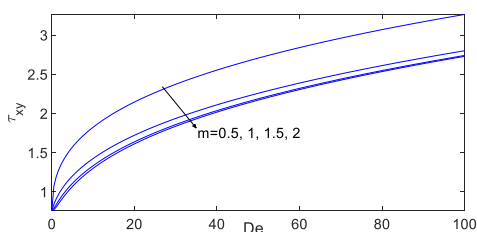


Figure 12. The shear stress curves as a function of the Deborah number for various secondary power-law index m ($Re = 10$, $n = 2$ and $Pr = 1$).

7 Conclusions

The present study rests on the boundary layer theory renowned for its simplifying but realistic assumptions in studies of external viscous flows. The flow concerning a non-Newtonian fluid is accordingly over a flat plate and induced by a free stream and being steady besides. The free stream is regarded as an inviscid flow with uniform velocity, except the flow inside the boundary layer overlies the plate. For the rest of the governing equations, we assigned the Carreau-Yasuda model to non-Newtonian fluid because of its capability to predict varying viscosity decently within the broadest possible range of deformation rates. To examine the fluid's thermal attributes, we also introduced a temperature difference between the motionless plate and the upcoming stream to initiate the heat transfer. Thus, the temperature of the fluid varies solely within the thermal boundary layer analogous to that of momentum, which is coupled with the conservation of energy. Momentum and thermal boundary layer equations were derived in partial differential form; however, later solved numerically in ordinary form thanks to similarity transformations. Therefore, solutions of similarity variables related to velocity and temperature profiles were illustrated for varying convenient nondimensional parameters, such as Deborah and Prandtl numbers. To inquire how effectively convective heat transfer takes place, we carried through an investigation based on the Nusselt number. The force that a fluid exerts a solid body in external flows is of engineering interest; accordingly, the shear stress at the surface was presented in depictions for various dimensionless parameters.

To conclude, we briefly review the key results emphasized throughout the paper as follows.

- Increasing Deborah number gives a decrease to the fluid velocity, consequently resulting in thickening in the momentum boundary layer.
- When $n > 1$ belongs to shear thickening fluids, the fluid behaves more like a solid in a way that the momentum boundary layer thickens.
- Unlike n , increasing the secondary power-law index, i.e. m , that occupies in the denominator peculiar to the Carreau-Yasuda model, accelerates the fluid in a way that the momentum boundary layer gets thinner.
- Fluids at great Deborah numbers are in higher temperatures than those with less, requiring a thicker thermal boundary layer.
- An effect that facilitates the flow, for instance, decreasing n or controversially increasing m , reduces the fluid temperature, and narrows the thermal boundary layer.
- For small Prandtl numbers, especially $Pr < 1$, the heat transfer across the fluid layers is mainly via conduction, resulting in higher fluid temperature and a thicker thermal boundary layer.
- Relying on variations of the Nusselt number, the convection enhances throughout a shear-thinning fluid by increasing Deborah number, whereas an

increase alike counterworks in a shear-thickening fluid.

- When $Pr \gg 1$, heat transfer by momentum diffusivity, i.e., convection, dominates relative to thermal diffusion, i.e., conduction. This fact also exposes the Nusselt number increases as long as the Prandtl number increase in such flows.
- Increasing the Deborah numbers leads to growing shear stress, which a shear thickening fluid exerts on the plate. However, concerning a shear-thinning fluid, shear stress decreases as the Deborah number increase.

We here concluded that the Carreau-Yasuda model is highly capable of mathematically representing a diverse range of non-Newtonian fluids at the expense of intense calculation labor.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity Index (iThenticate): 6%

References

- [1] F. A. Morrison, Understanding Rheology. Oxford University Press, New York ABD, 2001.
- [2] H. Ozoë and Stuart W. Churchill, Hydrodynamic stability and natural convection in Ostwald-de Waele and Ellis fluids: The development of a numerical solution, *AIChE Journal*, 18(6), 1196-1207, 1972. <https://doi.org/10.1002/aic.690180617>
- [3] M. M. Cross, Rheology of non-newtonian fluids: a new flow equation for pseudoplastic systems, *Journal of Colloid Science*, 20(5), 417-437, 1965. [https://doi.org/10.1016/0095-8522\(65\)90022-X](https://doi.org/10.1016/0095-8522(65)90022-X)
- [4] A. M. Siddiqui, M. Ahmed and Q. K. Ghori, Couette and Poiseuille flows for non-Newtonian fluids, *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 7(1), 15-26, 2006. <https://doi.org/10.1515/IJNSNS.2006.7.1.15>
- [5] K. Khellaf and G. Lauriat, Numerical study of heat transfer in a non-Newtonian Carreau-fluid between rotating concentric vertical cylinders, *Journal of non-Newtonian Fluid Mechanics*, 89, 45-61, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0377-020257\(99\)0030-0](https://doi.org/10.1016/S0377-020257(99)0030-0)
- [6] I. Lashgari, J. O. Pralits, F. Giannetti and L. Brandt, First instability of the flow of shear-thinning and shear thickening fluids past a cylinder, *Journal of Fluid Mechanics*, 701, 201-227, 2012. <https://doi.org/10.1017/jfm.2012.151>
- [7] F. M. Abbasi, T. Hayat and A. Alsaedi, Numerical analysis for MHD peristaltic transport of Carreau-Yasuda fluid in a curved channel with Hall effects, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 382, 104-110, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.01.040>
- [8] J. Boyd, M. J. Buick and S. Green, Analysis of the Casson and Carreau-Yasuda non-Newtonian blood models in steady and oscillatory flow using the lattice Boltzmann method, *Physics of Fluids*, 19,093103,2007. <https://doi.org/10.1063/1.2772250>
- [9] K. V. S. N. Raju, D. Krishna, G. Rama Devi, P. J. Reddy and M. Yaseen, Assessment of applicability of Carreau, Ellis, and Cross models to the viscosity data of resin solutions, *Journal of Applied Polymer Science*, 48, 2101-2112, 1993. <https://doi.org/10.1002/app.1993.070481205>
- [10] J. Koszkuł and J. Nabialek, Viscosity models in simulation of the filling stage of the injection molding process, *Journal of Materials Processing Technology*, 157-158, 183-187, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.09.027>
- [11] H. Schlichting, *Boundary Layer Theory* McGraw-Hill. New York, ABD, 1979.
- [12] A. Pantokratoras, Non-similar Blasius and Sakiadis flow of a non-Newtonian Carreau fluid, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 56, 1-5, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2015.03.021>
- [13] M. Khan and A. Hashim, Boundary layer flow and heat transfer to Carreau fluid over a nonlinear stretching sheet, *AIP Advances*, 5(10), 107203, 2015. <https://doi.org/10.1063/1.4932627>
- [14] G. W. Bluman and S. Kumei, *Symmetries and Differential Equations*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [15] Y. Aksoy, T. Hayat and M. Pakdemirli, Boundary layer theory and symmetry analysis of a Williamson fluid, *Zeitschrift für Naturforschung*, 67(6-7), 363-368, 2012. <https://doi.org/10.5560/zna.2012-0028>
- [16] G. Sari, M. Pakdemirli, T. Hayat and Y. Aksoy, Boundary layer equations and Lie group analysis of a Sisko Fluid, *Journal of Applied Mathematics*, 2012, 259608, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/259608>
- [17] T. Hayat, M. Pakdemirli and Y. Aksoy, Similarity solutions for boundary layer equations of a Powell-Eyring fluid, *Mathematical and Computational Applications*, 18(1), 62-70, 2013. <https://doi.org/10.3390/mca18010062>
- [18] M. Yürüsöy and M. Pakdemirli, Group classification of a non-Newtonian fluid model using classical approach and equivalence transformations, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 34(2), 341-346, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0020-7462\(98\)00037-7](https://doi.org/10.1016/S0020-7462(98)00037-7)





Hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerine ve darbe davranışına fonksiyonelleştirilmiş nanokil ilavesinin etkisi

The effect of functional nanoclay addition on the mechanical properties and impact behavior of hybrid composites

Ümran Esendemir^{1,*} , Recep Şimşek² , Mehmet Fahri Saraç³ 

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye

² Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 32260, Isparta, Türkiye

³ Süleyman Demirel Üniversitesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye

Özet

Bu çalışmada, cam elyaf/kevlar-epoksi hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerine ve darbe davranışlarına fonksiyonelleştirilmiş nanokil (silan ve amine grublu) ilavesinin etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Epoksi reçineye üç farklı konsantrasyonda (%0, %1, ve %3) fonksiyonelleştirilmiş nanokil karıştırılmıştır. 12 tabakalı kompozit numuneler el yatırma yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin mekanik dayanımları ve 30J altında yapılan darbe davranışları incelenmiştir. Nanokil ilavesiz ile ilaveli numuneler arasındaki karşılaştırmalar temas kuvveti, çökme, darbe enerjisi, hız ve zaman verileri kullanılarak yapılmıştır. Ağırlıkça %1 nanokilli kompozit malzemenin hem mekanik özellikler açısından hem de darbe direnci açısından daha iyi bir performans sergilediği görülmüştür. %1 nanokil ilaveli numunelerde kilin matris-fiber ara yüzeyinde iyi dağılımı sonucunda çökme değerleri %10 azalmış ve yük taşıma kapasitesini %22 oranında artmasının yanında 23.60 HV sertlik değeri ile saf ve %3 kil katkılı hibrit kompozitlerden ayrılmaktadır.

Anahtar kelimeler: Hibrit kompozit, Nanokil, Darbe davranışı, Hasar, Düşük hızlı darbe

1 Giriş

İnsan ihtiyaçlarının değişmesi ve teknolojinin geldiği nokta itibarıyla günümüzde farklı özelliklere sahip, daha fonksiyonel malzemelere gereksinim de artmıştır. Bu kapsamda son yıllarda kompozit malzemelere olan talebinde hızlıca artması bu tür malzemelerin yapı, özellik ve performansların geliştirilmesine olanak sağlamıştır.

Kompozit malzemeler kullanım alanlarına bağlı olarak darbelerle maruz kalmakta ve kullanım ömürlerini sınırlandırmaktadır. Bu sebep ile Üretimleri yapılan kompozitlerin darbelerle karşı göstermiş oldukları düşük veya yüksek hızda karşılaştıkları dirençlere karşı gösterdikleri davranışlar büyük önem arz etmektedir [1]. Bu kapsamda son yıllarda polimer esaslı elyaflar ile

Abstract

In this study, the effect of functionalized nanoclay (with silane and amine groups) on the mechanical properties and impact behavior of glass fiber / Kevlar-epoxy hybrid composites was experimentally investigated. Nanoclay functionalized at three different concentrations (0%, 1%, and 3%) was mixed into the epoxy resin. Composite samples with layer 12 have been manufactured by handlay-up method. The mechanical properties and impact behaviors under 30J were examined on the prepared composites. The comparisons between the nanoclay and non-nanoclay samples were carried out by using contact force, deflection, impact energy, velocity and time data of the impact tests. Mechanical strength and impact properties of 1% nanoclay added hybrid composites how better performance than that of 0% and 3% nanoclay added hybrid composites. As a result of the good dispersion of clay in the matrix-fiber interface in samples with 1% nanoclay addition, the impact values are reduced by 10% and load bearing capacity is increased to 22%. Furthermore, among bare and 3% nanoclay added hybrid composites, the highest hardness value of 23.60 HV obtained from 1% nanoclay added hybrid composite structures.

Keywords: Hybrid composite, Nanoclay, Impact behavior, Damage, Low velocity impact

güçlendirilmiş yapılar üzerindeki yapılan çalışmalara olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır [2].

Aktaş vd. [3] çalışmalarında farklı darbe enerjilerinde cam/epoksi kompozit plakaların davranışlarını incelemişlerdir. Cam elyafın yoğun olmasından kaynaklı gevrek yapının varlığı düşük darbe enerjilerinde matris çatlağı gösterilen yüksek darbe enerjilerinde fiber kırılmalarına sebebiyet vermiştir. Bir başka çalışma da ise, Valençca vd. [4] cam ve cam/kevlar kompozit yapıların darbe davranışlarını incelenmiş ve kevlar içeren kompozit yapılarda çekme mukavemeti, darbe enerjisi ve eğme mukavemetlerinin %20-30 oranında yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Kaştan vd. [5], 10 farklı kompozisyonda yapmış oldukları çalışmada %1, %3 ve %5 nanokil ilavesi ile elastisite modüllerinde sırasıyla %13, %38,6 ve %63 artış

meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Ferreira vd. [6] ise nanokil katkıli kevlar kompozitlerin nanokil artışı ile statik mukavemetlerinin azalıp, sertliğini arttırdığı görülmüş olup nanokil katkıli kompozitlerin %12'ye varan yorulma mukavemetlerinde iyileşme görülmüştür. Krushnamurty vd. [7] benzer şekilde modifiye montimorilanit nanokil ilavelerinde (%0 ile %5 arasında değişen) sertleşmenin (kürlemenin) daha hızlı olduğu ve epoksi matrisin kırılma tokluğunu iyileştirdiği görülmüştür. Rafiq vd. [8] ise cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlere nanokil ilavesi (%0, %1.5 ve %3) ile numunelerin sertliğinin arttığını ve ağırlıkça %1,5 oranında nanokil ilaveli numunelerde maksimum yükte %23 iyileşme ve sertlikte %11 artış olduğunu gözlemlemişlerdir. Uyaner vd. [9], cam/epoksi tabakalı kompozitlerde plaka boyutlarının darbeye dayanımlarını incelediklerinde kompozit plakanın kalınlığı arttıkça (50mm'den 150mm'ye) malzeme üzerindeki kalıcı çökme miktarının azaldığını belirtmişlerdir. Reis vd. [10], yaptıkları çalışmada ise kevlar esaslı epoksi kompozitlerde tabakalar arası darbe davranışlarını geliştirmek için epoksi içerisine takviye malzeme olarak mantar tozu ve nanokil kullanılmışlardır. Nanokil malzemenin yüzeyindeki silan grupların reçine ile aynı organik yapıda olmalarından ötürü uyumlu olmaları dolgu malzemelerin reçine içerisinde homojen olarak dağılmalarını sağlamıştır. Bu durum, kompozit yapının maksimum darbe yükünü, elastisitesini, çekme dayanımını arttırmasının yanı sıra çökmeyi azalttığı görülmüştür. Öner vd. [11], yaptıkları çalışmada karbon nanotüp (KNT) ilaveli cam elyafli kompozitlerin takviyesiz yapılara göre çekme ve eğilme dayanımını %0.75'e kadar arttırdığı fakat artan KNT ilavesi ile epoksi içerisindeki topaklaşmadan kaynaklı kompozit yapılarda eğilme dayanımlarının düşük olduğu görülmüştür. Son olarak, Mahdi vd. [12], yaptıkları çalışmada KNT'ler ve nanokili aynı anda fiber takviyeli plastik yapılarda KNT'leri ve nanokilin darbe özelliklerinin düşük oranlarda (<%10) eklenmesi durumunda geliştiğini ve darbe hasar alanlarının azaldığını tespit etmişlerdir.

Kompozit malzemeler günümüzde pek çok iş sahasında özellikle inşaat, rüzgâr enerjisi, otomotiv, uzay ve havacılık gibi birçok sektörde çok önemli bir yere sahiptir. Bu sektörlerde malzemelerin mukavemeti, tokluğu ve hafifliği gibi özellikleri çok büyük rekabet ortamı yaratmaktadır. Literatürde cam elyaf/kevlar hibrit kompozitlerin hem mekanik özelliklerinin ve hem de darbe davranışı üzerine nanokilin etkisi üzerine yapılmış çok fazla çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu amaçla bu çalışmada fonksiyonellendirilmiş (silan ve amino gruplu) nanokil ilavesinin (%0, %1 ve %3) kompozit malzemenin mekanik özelliklerine ve darbe davranışına etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

2 Materyal ve metot

2.1 Kompozit malzemenin üretimi

Bu çalışma da fiber malzemesi olarak kullanılan aramid elyaf kumaş Dupont firmasının ürettiği 207 g/m² yoğunluğa sahip Kevlar-49 kodlu ürün kullanılmıştır. Matriks malzemesi olarak Kompozitsan, İzmir firmasından tedarik edilen F-1564 epoksi ve F-3486 reçine sertleştiricisi tedarik

edilmiştir. Takviye elemanı olarak kullanılan (yüzeyi modifiye edilmiş, ağırlıkça %0.5-5 aminopropiltrioksolan, %15-35 oktadesilamin esaslı nanokil ile Sigma-Aldrich'ten alınmış olup karakteristik yapısı Saraç vd. [13] çalışmasında detaylıca bahsedilmiştir.

Kompozit malzeme üretiminde önce kevlar ve cam elyaflar istenilen boyutta kesilerek, tartımı yapılmıştır. Kevlar ve cam elyafın ağırlıkça 1/1 oranında epoksi ve epoksinin de %34 ü oranında sertleştirici ilave edilerek hazırlanan karışıma %0, %1 ve %3 oranında nanokil ilave edilmiş ve Şekil 1'de gösterilen MS 3040D model karıştırıcı ile 1250 devirde 1 dakika boyunca karıştırılmıştır.



Şekil 1. Mekanik karıştırıcı

Nihai karışım, üzerine kalıp ayırıcı PVA sürülmüş ve 12 katman halinde (3 kat kevlar – 1 kat örgü cam elyaf) elle yatırma yöntemi tatbik edilmiştir. Elle yatırma işlemi esnasında katmanlar arasında hava boşluğunun oluşmaması için, hazırlanan numunelere 12 saat vakumlama işlemi uygulanmıştır (Şekil 2).

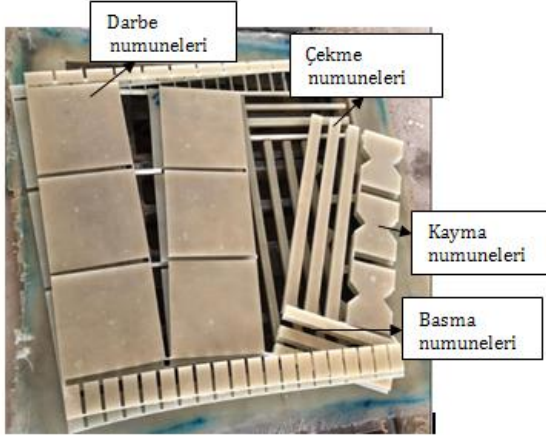


Şekil 2. Vakumlama işlemi

Vakumlama tamamlandıktan sonra kuruyan numuneler su jeli yardımı ile çekme, basma ve kayma numuneleri kesilmiştir. Çekme, basma ve kayma test numuneleri sırası ile ASTM D3039/D3039M-17, ASTM D6641/D6641M-16e1 ve ASTM D7078/D7078M – 12 standartlarına göre belirlenmiştir (Şekil 3). Şekil 4'te ise çekme, basma, kayma ve darbe test numuneleri görülmektedir.



Şekil 3. Su jeti ile kesim



Şekil 4. Test numuneleri

Kesilmiş hibrit kompozit numunelere çekme, basma ve kayma deneyleri Dokuz Eylül Üniversitesi'nde yapılmıştır. Shimadzu AG-X çekme test cihazı kullanılmıştır (Şekil 5). Test cihazı ± 100 kN yük kapasitesine sahip olup, -70 °C ila $+350$ °C sıcaklık aralıklarında test yapılmasını sağlayabilen bir kabine sahiptir. Her bir deney için 3'er adet numune kullanılmış ve elde edilen sonuçların ortalaması alınmıştır.

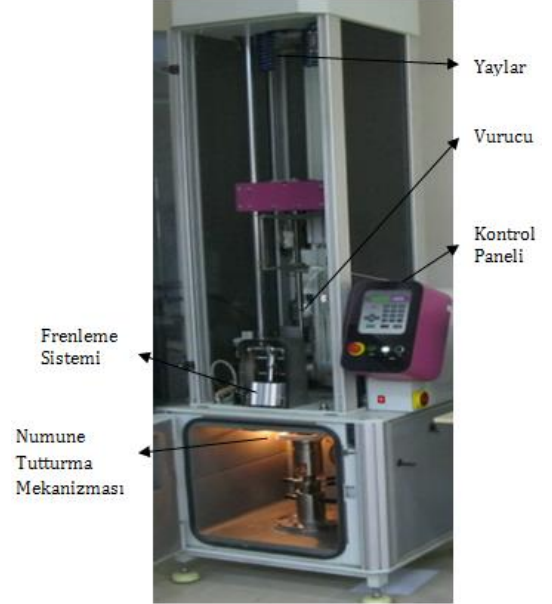


Şekil 5. Çekme test cihazı

2.2 Darbe testleri

Hibrit kompozitin darbe davranışının belirlenmesinde serbest ağırlık düşürme prensibine göre çalışan yer tipi

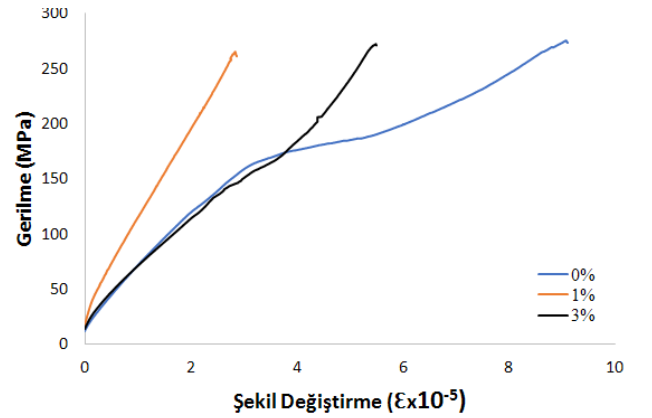
sistem kontrollü ve yüksek hızlı çalışan Fractovis Plus marka darbe test cihazı kullanılmıştır (Şekil 6). Testler sırasında kullanılan ucu yarım küre şeklinde ve 12,7 mm çaplı vurucu kütle 4.926 kg'dır. Kevlar elyaf-cam elyaf/epoksi kompozit plakaların darbe davranışı 30J darbe enerjisi altında ve oda sıcaklığında (20 °C) gerçekleştirilmiştir. Vurma anında vurucunun hızı 3.49 m/s'dir.



Şekil 6. Darbe test cihazı

3 Bulgular ve tartışma

Şekil 7'de %0, %1 ve %3 nanokilli kompozit numunelerin çekme deneyi grafikleri verilmiştir.

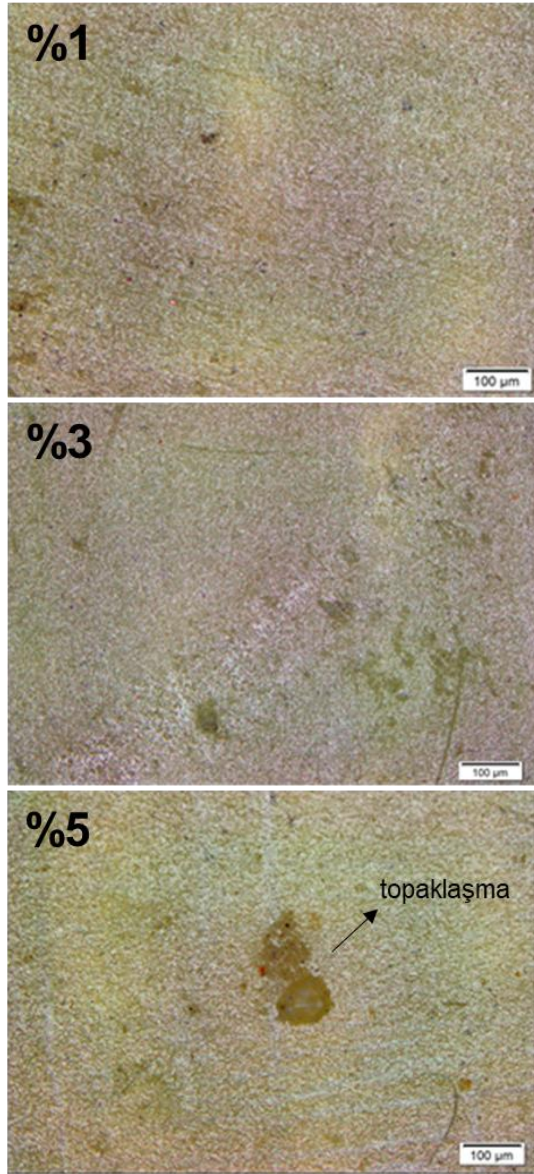


Şekil 7. Farklı nanokil oranlarına göre gerilme-şekil değiştirme diyagramı

Şekil 7' de ki σ - ϵ görüleceği üzere en büyük eğim %1 nanokilli numuneye aittir. Tablo 1'de kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için yaptığımız çekme ve kayma testlerinden elde edilen elastisite modülü, kayma modülü ve poisson oranı ile beraber yoğunluk değerleri verilmiştir.

Tablo 1. Farklı nanokil oranlarına sahip hibrit kompozitin mekanik özellikleri

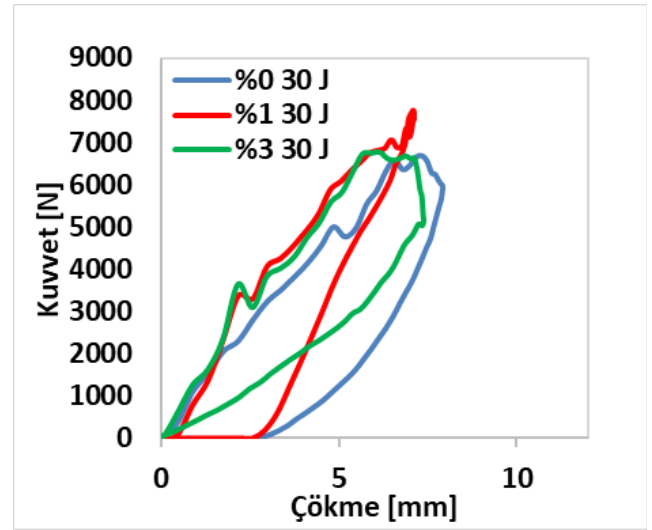
Özellikler	Sembol	Büyüklikler		
		%0	%1	%3
Lif doğrultusunda Elastisite Modülü	E_1 (GPa)	6.97	10.8	6.74
Lif doğrultusunda dik doğrultuda Elastisite Modülü	E_2 (GPa)	6.97	10.8	6.74
Kayma Modülü	G_{12} (GPa)	0.26	0.2	0.25
Poission Oranı	ν_{12}	0.27	0.45	0.60
Yoğunluk	ρ (g/cm ³)	1.208	1.312	1.458
Lif doğrultusunda Çekme dayanımı	X_t (MPa)	264	271	268
Lif doğrultusunda dik doğrultuda Çekme dayanımı	Y_t (MPa)	264	271	268
Kayma dayanımı	S (MPa)	10.4	9.63	17.5



Şekil 8. %0, %1 ve %3 nanokil ilaveli numunelerin optik mikroskop görüntüleri

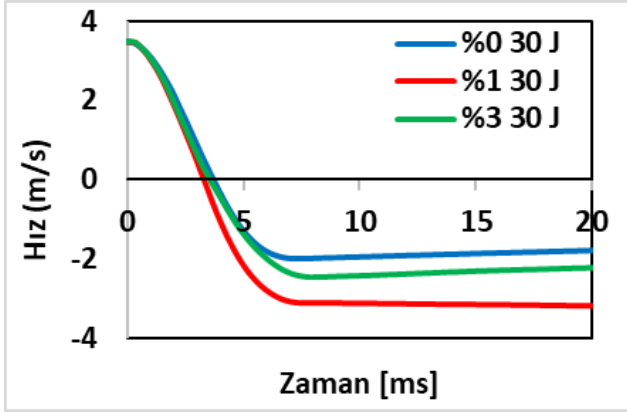
Tablo 1’de görüleceği üzere %1 nanokil ilavesi ile malzemenin elastisite modülünde yaklaşık %55 artış gözlenirken; %3 nanokil ilavesinde ise %3 azalma görülmüştür. Nanokil oranı artması malzemede topaklaşmanın artmasına sebep olduğundan mekanik özelliklerin düşüş olabileceği kanısına varılmıştır (Şekil 8). Nanokil lokal olarak epoksiyi içine çekerek epoksinin yapısını bozmaktadır. Bu da istenilmeyen bir durumdur. Düşük oranda nanokilin epoksi içerisinde iyi absorbe olması matriks-fiber ara yüzeyini güçlendirmesini sağlayarak mekanik dayanımının iyileşmesine katkıda bulunmaktadır [14].

Kuvvet-çökme eğrileri açık ve kapalı olmak üzere iki farklı karakteristik davranış sergilemektedir. Vurucu uçun kompozit plakaya temasından sonra geri sekmesi durumunda kapalı tip eğri grafiği vermektedir. Bu durum kompozit plakaya uygulanan enerjinin büyük kısmının numunede absorbe edildiğini absorbe olmayan kısmının da geri sektirdiği şeklinde yorumlanmaktadır. Açık eğri tipi ise kapalı tip eğriden farklı olarak vurucunun kompozit plakaya saplandığı veya delindiği durumlarda görülmektedir. Vurucu uçun numuneye temasından sonra geri sekmenin olmadığı ve kompozit tabaka boyunca hareket ederek delinme olayının gerçekleştiği bir süreçtir [15].



Şekil 9. 30J darbe enerjisi uygulanan %0, %1, %3 nanokil ilaveli numunelerin kuvvet-çökme eğrileri

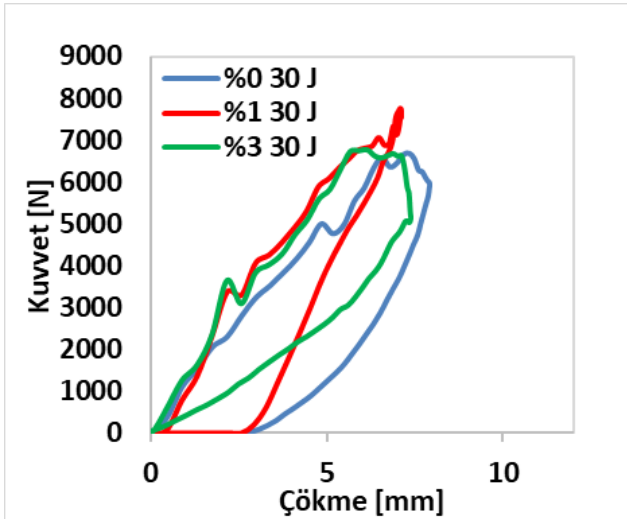
Kuvvet-çökme eğrilerinin (Şekil 9) tamamının kapalı eğri oluşturduğu görülmektedir. Kapalı eğri vurucu uçun numune üzerine çarpıp geri sekmesi ile oluşan eğridir. Kapalı eğri de delinme hasarı oluşmaz ve numune daha az hasara uğrar. Ayrıca artan oranda nanokil ilavesinin kapalı tip eğri modelini değiştirmedeği gözlemlenmiştir. Diğer taraftan %1 nanokil ilave kompozit yapıların yük taşıma kapasitesi diğer nanokil ilaveli yapılara göre daha iyi olduğu tespiti yapılabilir. Ayrıca %1 nanokil ilaveli numune de kapalı tip eğrinin daha dar olduğu görülmektedir. Bu durum numunede oluşan deformasyonun daha az olduğunun göstergesidir.



Şekil 10. 30J darbe enerjisi uygulanan ağırlıkça farklı nanokil oranlarına sahip numunelerin hız-zaman eğrileri

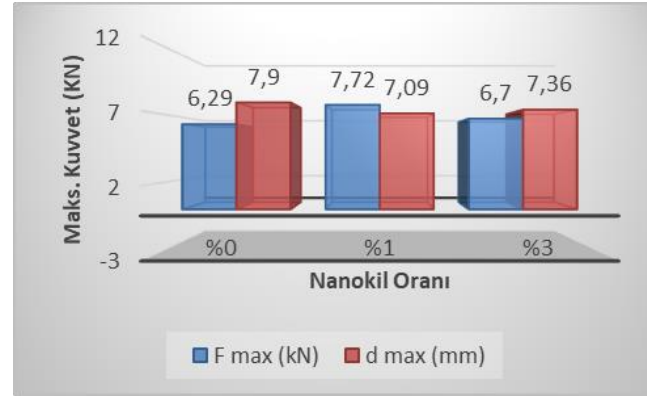
Şekil 10'da her bir nanokil ilaveli cam/kevlar kompozit yapıları hız-zaman grafiklerinde eğrilerin negatif bölgede olduğu görülmüştür. Bu durum belli bir hızdaki vurucunun kompozit yapıya temasından sonra hızında azalma oluştuğu ve vurucunun ters yönde hızlanması ile geri sekme meydana geldiğini ve numunede delinme hasarının oluşturmadığını söyleyebiliriz.

Hız-zaman grafiklerinde darbe enerjisinin artması durumunda belli bir hıza sahip vurucu ucun kompozit yapı ile ilk teması sonrası hızı azalır bu durumda eğer vurucu kompozit yapıdan geri seker ise yukarı doğru hareket eden vurucu uç hızı negatif bölgede gösterecektir. Aksi durumda vurucunun kompozit yapıya saplanması durumunda belli bir hız ile kompozit yapıya temas eden vurucu numuneye saplanacak ve hızı sıfır olacaktır. Bir diğer durumda ise, vurucunun numuneyi delmesi durumunda vurucunun hızı vurucu-kompozit yapı arasındaki sürtünmeden hızı yavaşlayacak fakat geri sekme oluşmadığından dolayı eğri pozitif bölgede bulunacaktır [15].



Şekil 11. 30J darbe enerjisi uygulanan %0, %1, %3 nanokil ilaveli numunelerin enerji-zaman eğrileri

Şekil 11'de parabolik eğriler incelendiğinde vurucunun sahip olduğu enerjinin tüm numunelerde absorbe edilmediği görülmektedir. Absorbe edilmeyen enerjinin geri sekme oluşturduğu ve kompozit yapıda herhangi bir saplanma ve/veya delinme hasarı olmadığı görülmektedir. Bu çıkarım nanokil ilavesinin delaminasyonu minimize ederek enerji emilimini sağladığını ortaya çıkarmaktadır ve bu Alomari vd. [16] nanokilin tabakalar arası kayma dayanımını artırarak delaminasyonu azalttığı hipotezini doğrulamaktadır. Şekil 11'de %1 ağırlıkça nanokil ilaveli numunenin %0 ve %3 nanokil ilaveli numunelere oranla daha az enerji absorbe ve nanokil ilaveli tabakalar arası kayma mukavemetinin artışından dolayı laminatların enerji emme kapasitesini azaldığı görülmüştür.

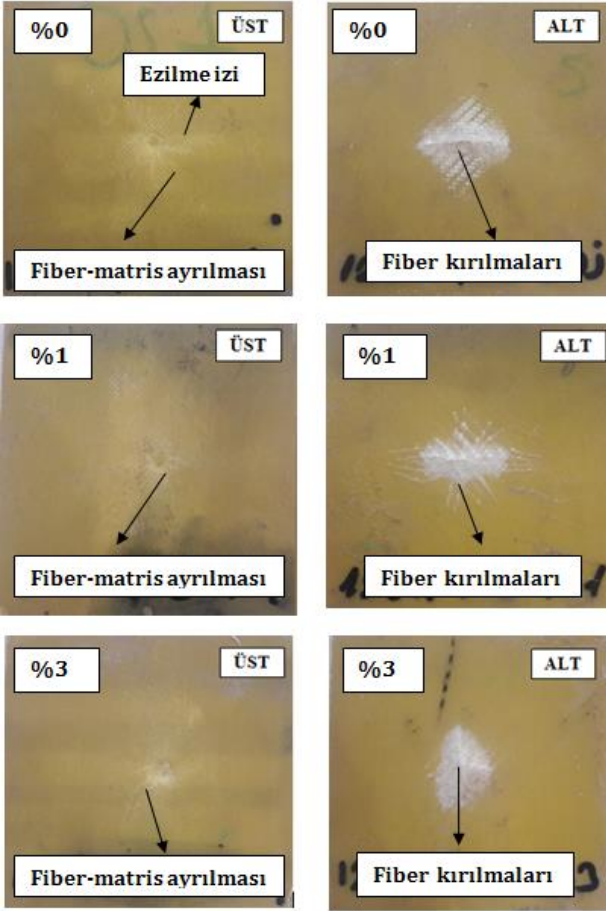


Şekil 12. 30J darbe enerjisi uygulanan farklı nanokil oranlarına sahip numunelerin maksimum kuvvet-maksimum çökme grafikleri

Şekil 12'den %1 nanokil ilaveli numunelerin diğer nanokil oranlı (%0 ve %3) numunelere göre daha fazla yük taşıma kapasitesini sağladığı görülmektedir. Ayrıca %1 ağırlıkça nanokil ilaveli kompozit yapıların sertliği artırarak çökmede azalmaya sebep olmuştur. Tablo 2'de %0, %1, %3 nanokil ilaveli kompozit numunelerin vickers sertlik değerleri verilmiştir. Rafiq vd. [8] nanokil ilaveli (%1,5- %3) cam hibrit kompozitlerde düşük nanokil ilaveli yapılarda sertliğinin %11, mekanik dayanımının da %23 oranında iyileştirdiği görülmüştür. %3 nanokil ilavesindeki mekanik dayanımında yaşanan düşüşün kil topaklanmasının matriks-fiber arayüzeyinde düzensiz yapısal bağlanmalara neden olduğunu tespit etmişlerdir. Reçine ve lifler arasındaki mikro boşluğun yapışmayı azalttığı gibi sertliğinde azalmasına sebep olduğunu belirtmişlerdir.

Tablo 2. Farklı nanokil oranlarına göre Vickers sertlik değerleri

	Numuneler		
Vickers Sertlik değerleri	%0 nanokil ilaveli numuneler	%1 nanokil ilaveli numuneler	%3 nanokil ilaveli numuneler
	21.75	23.60	19.30



Şekil 23. Numunelerin 30 Joule darbe enerjisi uygulanması sonrası üst ve alt yüzey hasar fotoğrafları

Şekil 13’de nanokil ilavesinin üst hasar bölgesinde diğer nanokil ilaveli yapılara göre en fazla %1 ağırlıkça nanokil ilaveli cam/kevlar kompozitlerde çatlak alanını azalttığı görülmüştür. Alomari vd. [16] yaptıkları çalışmada kevlar esaslı hibrit kompozit yapılarda nanokil ilaveli numunelerde (%4.3 ve %9.4 ağırlıkça) düşük katkı olan yapılarda fiber-matriks ayrılmasının daha az olduğunu belirtmişlerdir. Bunun da epoksi içerisine emdirilmiş nanokilin penetrasyonunun ne kadar iyi olursa hasar bölgesinin daha da darbe direncine etkili olabileceğini göstermişlerdir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, fonksiyonelleştirilmiş nanokil ilavesinin (%0, %1 ve %3 ağırlıkça) değişimleri hibrit kompozit plakaların mekanik özelliklerine darbe davranışına etkisi incelenmiştir. Farklı nanokil oranlarına sahip kompozit numunelere 30J darbe enerjisi altında yapılan darbe testleri sonucundaki darbe davranışları için aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

• Hasar modları matris çatlağı, fiber kırılması ve fiber-matris ayrılması ve fiber kırılmaları şeklindedir.

• Tüm nanokil oranları (%0, %1 ve %3) için numunenin darbe uygulanmayan alt yüzeydeki deformasyon alanının darbe uygulanan üst yüzeye göre daha büyük olduğu görülmüştür.

• Kompozit numuneler hazırlanırken ilave edilen ağırlıkça %1 oranında nanokilin kompozit numunenin

elastisite modülünü %55 oranında arttırdığı; %3 nanokil ilavesinin %3 oranında azalttığı tespit edilmiştir.

• %1 ağırlıkça nanokil ilavesinde elde edilen hibrit kompozit yapılardaki sertlik nanokil ilavesiz numunelere göre %9 oranında artırdığı gözlemlenirken, %3 oranındaki nanokil ilavesinin sertliği %11 oranında azalttığı gözlemlenmiştir.

• 30J darbe enerjisinde yapılan deneylerde, ağırlıkça %1 nanokil ilaveli numunelerin çökme değerleri %10 civarında azalırken, %3 nanokil ilaveli numunelerde çökme değerinin %6 oranında azaldığı görülmüştür.

• Yine 30J darbe enerjisinde yapılan deneylerde, ağırlıkça %1 oranında nanokil ilavesinin yük taşıma kapasitesini %22 oranında artırdığı görülürken, %3 nanokil ilavesinin yük taşıma kapasitesini %6 oranında arttırmıştır

• Nanokilin tabakalar arası kayma dayanımını artırarak çökme ve fiber-matriks ayrılmasını azalttığı görülmüştür. Bu azalma en belirgin ağırlıkça %1 nanokil eklenmesiyle elde edilen hibrit kompozit numunelerde görülmüştür.

• Hibrit kompozit malzemeler hazırlanırken, %1 ağırlıkça nanokil ilavesinin diğer nanokil oranlarına göre (%0, %3 ağırlıkça) mekanik ve darbe dayanımını arttırdığı görülmüştür.

Topaklaşma oluşumunu daha da azaltacağından yola çıkarak numune hazırlama aşamasında mekanik karıştırıcı yerine ultrasonik karıştırıcı kullanımının daha yüksek kil oranlarında daha iyi mekanik özelliklerin elde edilebileceği düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (SDÜ-BAP) 5056-YL1-17 no’lu proje kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %17

Kaynaklar

- [1] S. T. Jenq and J. J. Mo, Ballistic impact response for two-step braided three dimensional textile composites. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 34 (2), 375-384, 1996. <https://doi.org/10.2514/3.13074>
- [2] A. K. Kaw, Mechanics of Composite Materials. Taylor and Francis, Florida, 2005.
- [3] M. Aktaş, C. Ataş, B. M. İçten and R. Karakuzu, An experimental investigation of the impact response of composite laminates. Composite Structures, 87 (4), 307-313, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.02.003>
- [4] S. L. Valençã, S. Griza, V. G. Oliveira, E. M. Sussuchi and F. G. C. Cunha, Evaluation of the mechanical behavior of epoxy composite reinforced with kevlar plain fabric and glass/kevlar hybrid fabric. Composites Part B: Engineering, 70, 1-8, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.09.040>
- [5] A. Kaştan, Y. Yalçın, H. Ünal and Ş. Talaş, PA 6/YYPE / Nanokil kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 15 (1), 9-20, 2015. <https://doi.org/10.5578/fmbd.8851>

- [6] J. A. M. Ferreira, P. Reis, J. D. M. Costa and M. O. W. Richardson, Fatigue behaviour of kevlar composites with nanoclay-filled epoxy resin. *Journal of Composite Materials*, 47 (15), 1885-1895, 2012.
- [7] K. Krushnamurty, I. Srikanth, B. Rangababu, S. K. Majee, R. Bauri and C. Subrahmanyam, Effect of nanoclay on the toughness of epoxy and mechanical, impact properties of E-glass-epoxy composites. *Advanced Materials Letters*, 6 (8), 684-689, 2015. <https://doi.org/10.1177/0021998312452024>
- [8] A. Rafiq, N. Merah, R. Boukhili and M. Al-Qadhi, Impact resistance of hybrid glass fiber reinforced epoxy/nanoclay. *Polymer Testing*, 57, 1-11, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.11.005>
- [9] M. Uyaner, M. Kara ve N. Ataberk, E Camı/epoksi tabakalı kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışına numune boyutlarının etkisi. 8. Uluslararası Kırılma Konferansı, sayfa 361-368, İstanbul, Türkiye, 7-9 Kasım 2007.
- [10] P. N. B. Reis, J. A. M. Ferreira, P. Santos, M. O. W. Richardson and J. B. Santos, Impact response of kevlar composites with filled epoxy matrix. *Composite Structures*, 94 (12), 3520-3528, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.05.025>
- [11] G. Öner, H. Y. Ünal ve Y. Pekbey, Karbon nanotüp katkılı cam lifi-epoksi kompozitlerin termal ve eğilme özelliklerinin araştırılması. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 8 (4), 805-816, 2017.
- [12] T. H. Mahdi, M. E. Islam, M. V. Hosur and S. Jeelani, Low-velocity impact performance of carbon fiber-reinforced plastics modified with carbon nanotube, nanoclay and hybrid nanoparticles. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 36 (9), 696-713, 2017. <https://doi.org/10.1177/0731684417693429>
- [13] R. Şimşek, Cam-kevlar elyaf/epoksi hibrit kompozitlerin darbe davranışları üzerine fonksiyonellendirilmiş nanokil ilavesinin etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2019.
- [14] M. F. Saraç, M. Mert, İ. Bülbül, İ. Aktitiz, B. S. Yalçın ve R. Varol, Stereolitrografi ile 3B basılabilir nanokil takviyeli polimer yapıların mekanik karakterizasyonu. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 9(3), 1584-1593, 2019. <https://doi.org/10.21597/jist.555398>
- [15] M. Sayer, Hibrit kompozitlerin darbe davranışlarının incelenmesi. Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2009.
- [16] A. Alomari, S. Aldajah, S. Hayek, K. Moustafa and Y. Haik, Experimental investigation of the low speed impact characteristics of nanocomposites. *Materials Design*, 47, 836-841, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.12.079>





Modeling of heat transfer around a square and a circle: A novel ANN-based approach

Kare ve yuvarlak silindir etrafındaki ısı transferinin modellenmesi: Yeni YSA temelli bir yaklaşım

Özge Yetik^{1,*} 

¹ Eskisehir Osmangazi University, Mechanical Engineering Department, 26480, Eskisehir, Turkey

Abstract

Artificial neural network (ANN) is a modelling of the human brain. The aim of this study is to estimate the heat distribution with ANN around different cylinders. Within the scope of the study, square and circular cylinders were discussed. In this study, the temperature analysis of the cylinders was carried out with a program written in Fortran, not using a package program whose exact background is unknown. The results obtained from a writing code are more reliable. The study is discussed in two dimensions. The 3 most commonly used algorithms (Levenberg – Marguardt (LM), Pola-Ribiere Conjugate Gradient (CGP) and Scaled Conjugate Gradient (SCG)) were used to train with ANN. Cylinder type, x-coordinate and y-coordinate were the input variables; and temperature was the output variable. The most suitable algorithm was found to be LM-18 algorithm. The proximity of artificial neural networks and real values was evaluated statistically. These were R^2 , CoV and RMSE. R^2 , CoV and RMSE values in the training phase of Levenberg – Marguardt -18 neuron were determined to be 0.9939, 0.0044, 0.0107 while their values in the test phase were 0.9850, 0.0043 and 0.0190 respectively. The fact that the R^2 value is so close to 1 is an indication that ANN is working very well.

Keywords: Levenberg-Marquardt, Heat transfer, Numerical simulation, Artificial neural network

1 Introduction

Heat transfer around the cylinders forms the basis of many engineering problems including, for example, heat exchangers, heat losses of high-rise buildings, turbines, chimneys and pipes. Unwanted heat losses can trigger structural failure and cause undesirable situations. Therefore, heat losses around the cylinders are the main problems of engineering. Franke et al. [1] numerically monitored the flow around the square and round cylinders between the numbers Reynolds 5000 and 300. The study was carried out by using two-dimensional, finite volume method and Quadratic upwind difference scheme (QUICK) method together. They compared their studies to previous experimental studies, and they reported that, for Re cases less than 1000, the dependence of the number Re on the Strouhal and drag coefficient provided accurate results. It was observed that

Özet

Yapay sinir ağları (ANN) insan beyninin bir modellemesidir. Bu çalışmanın amacı da ANN ile farklı silindirlere etrafındaki ısı dağılımını tahmin etmektir. Çalışma kapsamında kare ve daire silindirlere ele alınmıştır. Bu çalışmada, silindirlerin sıcaklık analizi, tam arka planda ne yaptığı bilinmeyen bir paket program kullanılmadan, fortran dili kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kod yazarak elde edilen sonuçlar daha güvenilir sonuçlardır. Çalışma iki boyutlu olarak ele alınmıştır. ANN ile verilerin eğitilmesinde en yaygın kullanılan 3 farklı algoritma (Levenberg–Marguardt (LM), Pola-Ribiere Conjugate Gradient (CGP) ve Scaled Conjugate Gradient (SCG)) kullanılmıştır. Silindir tipi, x-koordinatı ve y koordinatı girdi verileri, sıcaklık ise çıktı verisidir. En uygun algoritma LM-18 algoritması olarak bulunmuştur. Yapay sinir ağları ile gerçek değerlerin birbirine yakınlığı istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Bunlar R^2 , CoV ve RMSE'dir. LM-18 algoritmasının eğitim aşamasındaki R^2 , CoV ve RMSE değerleri sırasıyla 0.9939, 0.0044, 0.0107; test aşamasındaki değerleri sırasıyla 0.9850, 0.0043, 0.0190'dir. R^2 değerinin 1'e bu kadar yakın olması ANN'nin çok iyi çalıştığının da göstergesidir.

Anahtar kelimeler: Levenberg-Marquardt, Isı transferi, Sayısal benzetim, Yapay sinir ağları

there were deviations in larger Re numbers, and the reason was said to be due to fluctuations. Sharma and Eswaran [2] studied the flow and heat transfer around a single square cylinder. They discussed their work under laminar flow. They took the Reynolds number between 1 and 160, and the Prandtl number was 0.7. The heat transfer on the cylinder was examined for uniform heat flux and constant cylinder temperature conditions. The relationship between Nusselt and Reynolds was studied. Sohankar et al. [3] studied the flow and heat transfer around a square cylinder under laminar flow. They used Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations-Consistent (SIMPLEC), Quadratic upwind difference scheme and Crank – Nicolson method in their studies. Sommerfeld conditions and Neumann conditions were compared. Traditional conditions were shown to yield more effective results. The study was

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: oyetik@ogu.edu.tr (Ö. Yetik)

Geliş / Received: 20.07.2020 Kabul / Accepted: 22.04.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.771650

conducted by using Stuart-Landau equations. Strouhal number, drag, lift and moment coefficients were calculated. Chatterjee et al. [4] took the Re number 150 and placed 5 identical cylinders side by side to examine the heat transfer in the cylinders. Cylinders have identical temperatures. Calculations were made using the finite volume method based on the PISO algorithm. The effect of the space was examined by changing the space between the cylinders between 0.2 and 10. Average and instantaneous drag and lift coefficient, average Nusselt number and Strouhal numbers were determined and interpreted. Malavasi and Guadagnini [5] examined the flow around a single rectangular cylinder in a flow open to the atmosphere. They carried out experiments by placing cylinders at different heights from the bottom of the channel and using different flow conditions. Bai et al. [6] studied the interaction between a single cylinder placed near the free surface and the surface empirically and numerically. The experiments were carried out in a water channel with cylinders of variable axial depth. Scardovelli and Zaleski [7] studied the flow around the cylinder numerically. They stated that the method they used was very simple and that the results could not be obtained correctly for three-dimensional studies. As a result, it was stated that it was difficult to obtain the linear theory for some flows due to simulation and cut-off current instabilities. Liu et al. [8] used Fluent to examine the flow in two dimensions in their studies. They modelled the flow by the k-turbulence model and the free surface by the volume of fluid method Arslan and Yetik [9] made the estimation and optimization of the data of power cycles such as ORC-Binary. They used the Levenberg Marguardt (LM), Pola-Ribiere Conjugate Gradient (CGP), Scaled Conjugate Gradient (SCG) and Gradient descent with momentum and adaptive learning rate back propagation (GDX) algorithms from artificial neural networks. Levenberg – Marguardt -16 neuron algorithm for s1 type cycle and Levenberg – Marguardt -14 neuron algorithm for s2 type cycle were found to be the most appropriate algorithm. Arslan and Yetik [10] used ANN to estimate the electricity production from the binary cycle, which is a kind of organic rankine cycle. Conducting these studies is a complex work that requires time and more competence. Levenberg – Marguardt -20 neuron was the best algorithm for o2 and o3 type cycles while Levenberg – Marguardt -22 neuron algorithm was the best algorithm for b3 type cycles. Sochinskii et al. [11] examined numerically the heat transfer and hydrodynamics around the diamond type cylinder. Reynolds number was between 1 and 70 whereas Pr number was taken as 0.7. The results were compared with a circle cylinder. Dash and Dash [12] examined the flow and heat transfer around the hollow cylinder. By changing the length ratio of the cylinder diameter, the change in the Nusselt number was examined. A correlation was obtained for the cooling curve and Nusselt number. Hina et al. [13] examined mathematically the flow and heat transfer around the cylinder. Equations related to the Cross model were used in the mathematical formulation. Numerical calculations were made with Matlab. They said that their work was compatible with the literature. An important outcome of this study is that increased strength

leads to a reduction in resistant wall cutting and helps axial flow significantly. ANN has been used in various fields such as internal combustion engines applications, thermal power plants, solar thermal power plant, thermal stratification of solar storage, the temperature of internal combustion engines, the performance of geothermal systems, waste heat in High-Velocity Oxygen Fuel coating process [14-19]. Robichaux et al. and Shimizu and Tanida [20, 21], studied 2-D and 3-D flow constructs. Sohankar and Ertinan [22] studied numerical simulation on the flow attribute and heat transfer over isothermal tandem square cylinders.

In packet programs, not knowing the steps behind the program exactly increases insecurity. The differences that distinguish this study from the studies in the literature are that the program used is written in a problem-specific way using Fortran language and predictions are made with ANN. There are scientific and technological benefits of working in the design of pipelines placed in seas and oceans, the design of structures to be built in seas, the design of power generating equipment using tidal events, and electronic equipment development. The heat transfers over a cylinder were previously solved by different package programs. At the same time, in this study, the aim is to obtain an ANN modelling of heat transfer over a cylinder. This paper presents the results of a numerical study on the heat transfer over a square and a circle cylinder. Also the numerical data were carried out by the Fortran code. No such study has been conducted previously with ANN. Previously, there was no study examining the heat transfer around the cylinder and only writing a special code for this problem, and also this study did not estimate it with ANN. Therefore, it will make an important contribution to the literature.

2 Problem statement and analysis

2.1 Numerical solution

The energy equation is solved with a finite volume method in two dimensional geometries. The 2-D Navier-Stokes and the dimensionless form of the governing energy equations is given as [23]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{1}{RePr} + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

u and v are the dimensionless velocity components, T and p is the dimensionless temperature and pressure, respectively. t represents the dimensionless time. Prandtl number is defined as $Pr = \nu/\alpha$, where ν is kinematic viscosity and α is

thermal diffusivity. Re is defined with respect to cylinder length D. Nondimensional form of the variables defined as

$$u = \frac{u^*}{U} \quad (5)$$

$$v = \frac{v^*}{U} \quad (6)$$

$$p = \frac{p^*}{\rho U^2} \quad (7)$$

$$t = \frac{t^* U}{D} \quad (8)$$

$$x = \frac{x^*}{D} \quad (9)$$

$$y = \frac{y^*}{U} \quad (10)$$

where U is the average velocity.

Industrial aspects of the problem: it is like electronic device design, power equipment design and natural gas pipe design. The configuration of the square and circle cylinders are illustrated in Figure 1 and Figure 2. The boundary conditions can be stated as:

For the inlet, $T=10^\circ\text{C}$

For the outlet, $T=10^\circ\text{C}$

For the top, $T=10^\circ\text{C}$

For the bottom, $T=10^\circ\text{C}$

For the cylinders walls, $T=50^\circ\text{C}$

In order to prevent the flow around the cylinders from being affected by the walls, the distance to the walls was taken 10 times the cylinder dimensions. All of the data should be normalized in order to estimate the values correctly in artificial neural networks. Both square and circle cylinders were chosen as a simplified form of structures such as pipes and power teams in the sea.

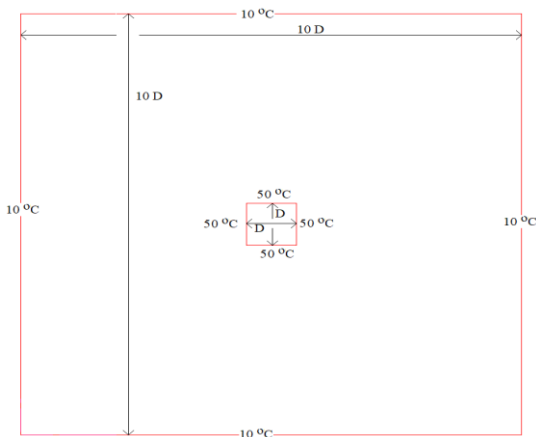


Figure 1. Square cylinder configuration

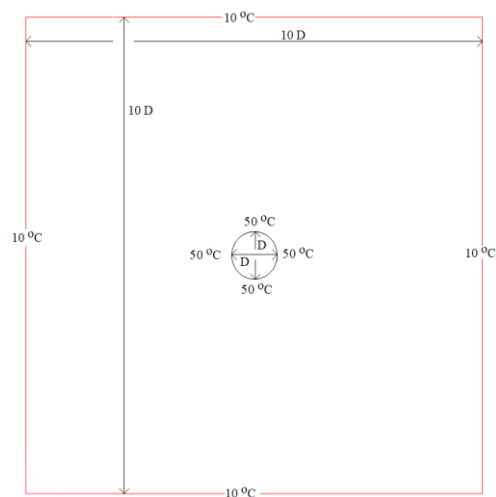


Figure 2. Circle cylinder configuration

Equations were solved using a staggered grid. The Equation (11) was used in order to observe the independent behaviour of the temperature on flow area. n is the time step. $T_{i,j}$ is the temperature value in each mesh element. Heat transfer in the 2D regime were performed with a cell-centred finite volume code based and staggered grid were used.

$$\sqrt{\frac{\sum (T_{i,j}^n - T_{i,j}^{n-1})^2}{\sum (T_{i,j}^n)^2}} \leq 10^{-4} \quad (11)$$

The computational area is meshed using non-orthogonal quadrilateral elements (10D x 10D). When the mesh structure is not uniform, both the number of equations increase and equations become more complicated. The trustworthiness control of the mesh number was investigated. While the worth of mesh arised from 1207 to 4786, the distinction in the temperature was 0.9%. The mesh number was 3071 for the ideal value which provided accurate results while keeping computational run time shorter. Figure 3 and Figure 4 showed that mesh structure.

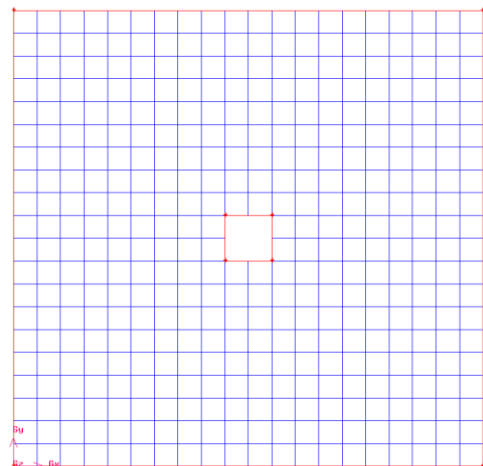


Figure 3. Mesh structure for square cylinder

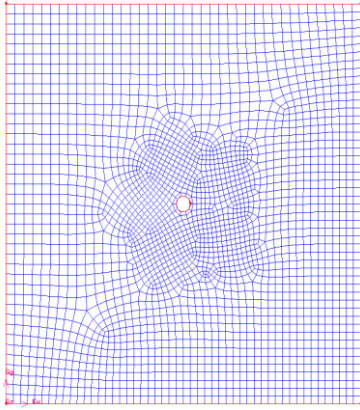


Figure 4. Mesh structure for circle cylinder

2.2 ANN modelling of heat transfer

Artificial neural networks are based on computers learning data. ANN is commonly used to estimate an output from input values. Artificial neural networks collect information about samples, make generalizations, and then make decisions about those samples using the information they acquire compared with the samples they have never seen. Due to these learning and generalization features, artificial neural networks have wide application possibilities in many science fields and demonstrate the ability to successfully solve complex problems. ANN can be used to predict problems that take a long time to result. The advantages of artificial neural networks are its non-linear structure, its ability to be designed with input and output matching, its ability to adapt, and its fault tolerance. Many algorithms may be preferred when solving problems with ANN, but the most commonly used and best results algorithms are Levenberg-Marguardt (LM), Pola-Ribiere Conjugate Gradient (CGP), Scaled Conjugate Gradient (SCG) and Gradient descent with momentum and adaptive learning rate back propagation (GDX). It is seen in the literature that the LM algorithm gives the fastest and best results [9, 10, 24].

To use the data in ANN, the data must be normalized to the range of [0,1] and the normalization method is given by Equation (12). The logarithmic sigmoid (logsig) transfer function was defined Equation (12) [25].

$$y' = \frac{y_i - y_{min}}{y_{max} - y_{min}} \quad (12)$$

y' is normalized data, y_i is input value, y_{min} is the smallest number in the input set, y_{max} is the largest number in the input set.

$$f(ze) = \frac{1}{1 + e^{-ze}} \quad (13)$$

ze is the weighted sum. Equation (14) is given in ze . w is weight, y is output and b is bias.

$$ze_j = \sum_{i=1}^n w_{ij}y_i + b_j \quad (14)$$

The data obtained were evaluated with some statistical methods. Equation is given between (15) and (17). y_{output} is the output value, \bar{y}_{output} is the average of the output, y_{real} is the actual value, \bar{y}_{real} is the average of the actual value and n is the pattern number in the calculations as follows:

$$R^2 = \frac{\sum_{m=1}^n (y_{output} - \bar{y}_{output})(y_{real} - \bar{y}_{real})}{\sqrt{\sum_{m=1}^n (y_{output} - \bar{y}_{output})^2 \sum_{m=1}^n (y_{real} - \bar{y}_{real})^2}} \quad (15)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^n \left(\frac{y_{output} - \bar{y}_{real}}{y_{output}} \right)^2}{n}} \quad (16)$$

$$CoV = \frac{\sum_{m=1}^n (y_{output} - \bar{y}_{output})(y_{real} - \bar{y}_{real})}{n} \quad (17)$$

Parameters affecting the power of statistical analysis such as R^2 , $RMSE$, CoV are the pattern number and the effect size. Effect size is the measure of the strength of the statistical relationship between two variables (output and real). Solution steps with flow chart are given in Figure 5.

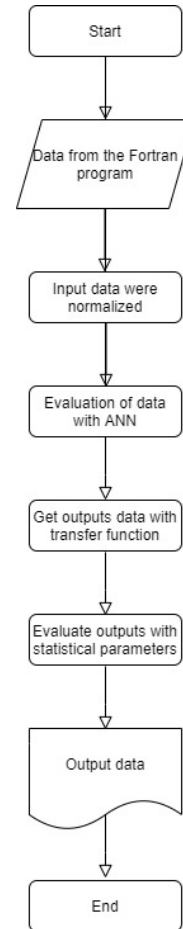


Figure 5. Solution steps with flow chart

3 Results and discussion

In this study, the heat distribution around the square and circle cylinders was studied with the Fortran code that was written by the author. The mesh in the flow area was selected smoothly and complexly. Cylinders were selected to be 50 °C and walls in the flow area were selected to be 10 °C. The temperature distribution of a cylinder warmer than the walls was investigated. It is important that we work for the design of pipelines placed in the seas and oceans, the design of structures to be built in the seas, the design of power generating equipment using tidal events, and the design of electronic equipment. Figures 6 to 8 show the temperature distributions of computational area. We see that as the temperature around the cylinder approaches 50 °C, the temperature decreases approaching edges. Figure 8 shows the 3D temperature distribution. Tanweer et al. [26] studied heat transfer around a single square cylinder. Khanafer and Vafai [27] studied heat transfer around a single circular cylinder. In both studies, it was shown that flows spread around the cylinders in waves, and the package program was used in both studies. Tanweer et al. used OpenFOAM and Khanafer and Vafai used Adina v.9.2.

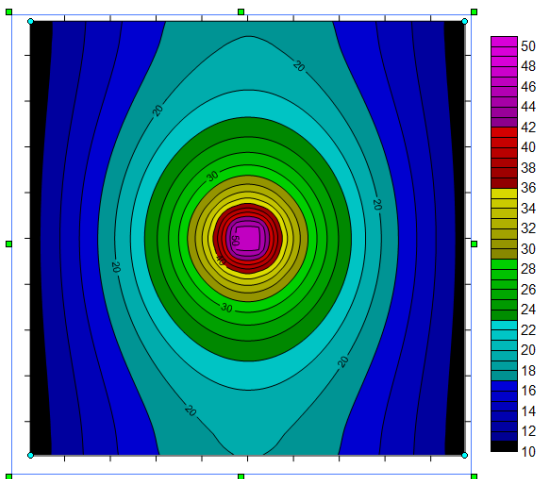


Figure 6. Temperature distribution for square cylinder

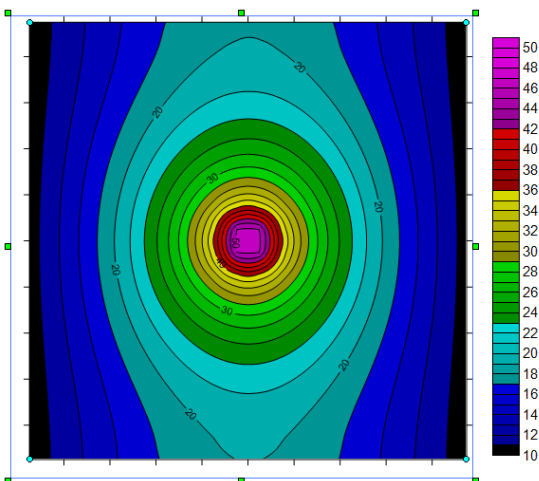


Figure 7. Temperature distribution for circle cylinder

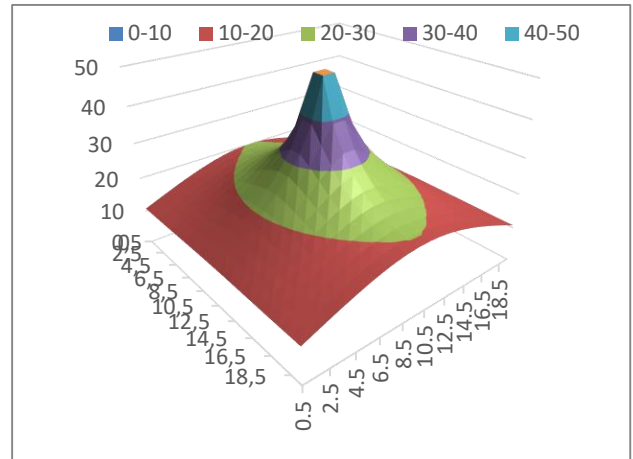


Figure 8. 3D Temperature distribution for square cylinder

When the cylinder was hot and the walls of the environment housing the cylinder were colder; it could be seen that the temperature spread in waves around the cylinder. Even if the shape of the cylinder was square or round, the temperature distribution was similar. At the same time, the independence of the result from the mesh was tested using different mesh structures.

Writing code takes a long time and requires more competence. Therefore, the results are estimated with ANN. The number of inputs for ANN modelling of heat transfer around the square and circle cylinder is 3: cylinder type, x-coordinate, y-coordinate. Temperature was obtained as the output. The total number of data used is 3071. 80% (2456) of them were used for training and 20% (613) for testing. The ANN was trained for 1000 iterations in a single hidden layer. The data to be used for testing and training were randomly selected. It was attempted to find the most suitable algorithm by increasing the number of neurons of the LM algorithm. Statistical formulas were used in this study. The best-found LM algorithm were compared with CGP and SCG algorithms. The summarized results according to the statistical performance evaluation are given in Table 1 and Table 2.

Looking at Table 1 and Table 2, the reliable estimates of the temperature of the cylinders are given with ANN. LM 18 was found to be the best ANN algorithm with its representation given in Figure 9. The comparison of the data obtained as a result of ANN with the actual data is given in Figure 10.

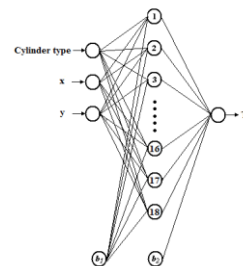


Figure 9. Architecture of the best ANN Topology

Table 1. Comparison of error values of LM Algorithms in the ANN

Algorithm	Train			Test			All		
	CoV	RMSE	R ²	CoV	RMSE	R ²	CoV	RMSE	R ²
LM 6	0.0042	0.0351	0.9410	0.0041	0.0375	0.9381	0.0042	0.0356	0.9404
LM 8	0.0042	0.0263	0.9645	0.0041	0.0280	0.9633	0.0042	0.0267	0.9642
LM 10	0.0043	0.0254	0.9692	0.0042	0.0285	0.9664	0.0042	0.0261	0.9687
LM 12	0.0043	0.0186	0.9823	0.0043	0.0228	0.9772	0.0043	0.0196	0.9813
LM 14	0.0044	0.0169	0.9853	0.0043	0.0222	0.9789	0.0043	0.0181	0.9840
LM 16	0.0044	0.0157	0.9880	0.0043	0.0218	0.9797	0.0044	0.0170	0.9864
LM 18	0.0044	0.0107	0.9939	0.0043	0.0190	0.9850	0.0044	0.0128	0.9922
LM 20	0.0044	0.0136	0.9914	0.0043	0.0217	0.9814	0.0044	0.0156	0.9894
LM 22	0.0044	0.0140	0.9904	0.0043	0.0205	0.9819	0.0044	0.0155	0.9887
LM 24	0.0043	0.0200	0.9805	0.0042	0.0238	0.9748	0.0043	0.0208	0.9793

Table 2. Comparison of error values of LM, SCG and CGP algorithms in the ANN

Algorithm	Train			Test			All		
	CoV	RMSE	R ²	CoV	RMSE	R ²	CoV	RMSE	R ²
CGP 18	0.0043	0.0224	0.9742	0.0042	0.0245	0.9720	0.0043	0.0228	0.9737
LM 18	0.0044	0.0107	0.9939	0.0043	0.0190	0.9850	0.0044	0.0128	0.9922
SCG 18	0.0043	0.0208	0.9771	0.0042	0.0240	0.9736	0.0043	0.0215	0.9764

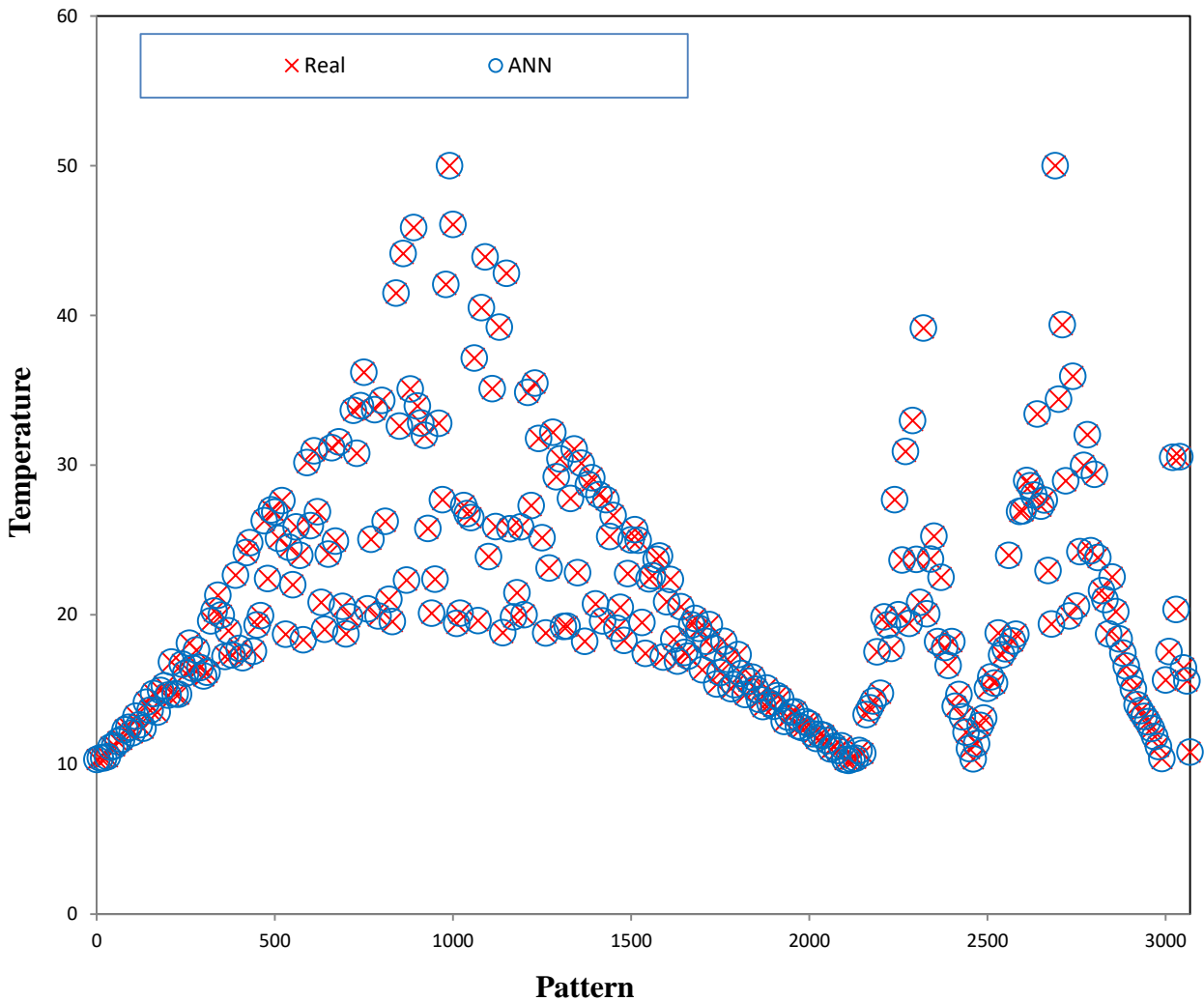


Figure 10. The comparison of ANN prediction and analytic design results

4 Results and discussion

The heat transfer around the cylinders is the basis of the engineering problems. It is not reliable because we do not know exactly what the program does in solving heat transfer with packaged programs. For this reason, the code was encoded with Fortran coding language to model the heat transfer around the cylinder. The data obtained requires a long time and more competence. ANN was used to estimate the results of this study. In this study, heat transfer over a square and circle cylinder was modelled. In the study, the walls of the cylinder 50 °C, flow area were taken at 10 °C. The most common ANN algorithms including LM, CGP and SCG were used. The best result was obtained with LM 18. The R2 value of the LM 18 algorithm in the test step was 0.9850, the CoV value was 0.0043 and the RMSE value was 0.0190. The R2 value of the LM 18 algorithm in the training step was 0.9939, the CoV value was 0.0044 and the RMSE value was 0.0107.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity Index (iThenticate): 14%

References

- [1] R. Franke, W. Rodi and B. Schönung, Numerical calculation of laminar vortex-shedding flow past cylinders. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 35, 237-257, 1990. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(90\)90219-3](https://doi.org/10.1016/0167-6105(90)90219-3).
- [2] A. Sharma and V. Eswaran, Heat and fluid flow across a square cylinder in the two-dimensional laminar flow regime. *Numerical Heat Transfer, Part A*, 45, 247-269, 2004. <https://doi.org/10.1080/10407780490278562>.
- [3] A. Sohankar, C. Norberg and L. Davidson, Low-reynolds number flow around a square cylinder at incidence: study of blockage, onset of vortex shedding and outlet boundary condition. *International Journal for Numerical in Fluids*, 26, 39-56, 1998. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)10970363\(19980115\)26:1<39::AID-FLD623>3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/(SICI)10970363(19980115)26:1<39::AID-FLD623>3.0.CO;2-P).
- [4] D. Chatterjee, G. Biswas and S. Amiroudine, Numerical investigation of forced convection heat transfer in unsteady flow past a row of square cylinders. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 30, 1114-1128, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2009.09.004>
- [5] S. Malavasi and A. Guadagnini, Interactions between a rectangular cylinder and a freesurface flow. *Journal of Fluids and Structures*, 23, 1137-1148, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2007.04.002>.
- [6] J. Bai, N. Ma and X. Gu, Study of interaction between wave-current and the horizontal cylinder located near the free surface. *Applied Ocean Research*, 67, 44-58, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.06.004>.
- [7] R. Scardovelli and S. Zaleski, Direct numerical simulation of free-surface and interfacial flow. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 31, 567-603, 1999. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.31.1.567>.
- [8] I-H. Liu, J. Riglin, WC. Schleicher and A. Oztekin, Flow past a plate in the vicinity of a free surface. *Ocean Engineering*, 111, 323-334, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.11.009>.
- [9] O. Arslan and O. Yetik, ANN based optimization of supercritical ORC-binary geothermal power plant: Simav case study. *Applied Thermal Engineering*, 31, 3922-3928, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.07.041>.
- [10] O. Arslan and O. Yetik. ANN modeling of an ORC-Binary geothermal power plant: Simav case study. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 36, 418-428, 2014. <https://doi.org/10.1080/15567036.2010.542437>.
- [11] A. Sochinskii, D. Colombet, M. Muñoz, F. Ayela and N. Luchier, Flow and heat transfer around a diamond-shaped cylinder at moderate Reynolds number. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 142, 118435, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118435>.
- [12] M. K. Dash and S. K. Dash, Natural convection heat transfer and fluid flow around a thick hollow vertical cylinder suspended in air: a numerical approach. *International Journal of Thermal Sciences*, 152, 106312, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106312>.
- [13] S. Hina, A. Shafique and M. Mustafa, Numerical simulations of heat transfer around a circular cylinder immersed in a shear-thinning fluid obeying cross model. *Physica A*, 540, 123184, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.123184>.
- [14] P. Géczy-Víg and I. Farkas, Influence of the time step in ANN modelling of thermal stratification of solar storage. *Proceedings of the 17th World Congress*, pp. 9575-9578, Seoul, Korea, 6-11 July 2008.
- [15] K. Goudarzi, A. Moosaei and M. Gharaati, Applying artificial neural networks (ANN) to the estimation of thermal contact conductance in the exhaust valve of internal combustion engine. *Applied Thermal Engineering*, 87, 688-697, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.05.060>.
- [16] T.E. Boukelia, O. Arslan and M.S. Mecibah, Potential Assessment of a parabolic trough solar thermal power plant considering hourly analysis: ANN-based approach. *Renewable Energy*, 105, 324-333, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.081>.
- [17] M. Esfe, S. Esfandeh, M. Afrand, M. Rejvani and S. Rostamian, Experimental evaluation, new correlation proposing and ANN modeling of thermal properties of EG based hybrid nanofluid containing znodwnt nanoparticles for internal combustion engines applications. *Applied Thermal Engineering*, 133, 452-463, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.131>.
- [18] R. Shankar, K.R. Balasubramanian, S.P. Sivapirakasam and K. Ravikumar, ANN and RSM models approach for optimization of HVOF coating. *Materials Today*:

- Proceedings, (Article in press) 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.211>.
- [19] J. Wang, Y. Zhaia, P. Yaoa, M. Maa and H. Wang, Established prediction models of thermal conductivity of hybrid nanofluids based on artificial neural network (ANN) models in waste heat system. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 110, 104444, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104444>.
- [20] J. Robichaux, S. Balachandar and S.P. Vanka, Three-dimensional Floquet instability of the wake of square cylinder. *Physics of Fluids*, 11, 560–578, 1999. <https://doi.org/10.1063/1.869930>.
- [21] Y. Shimizu and Y. Tanida, Fluid forces acting on cylinders of rectangular cross section. *Transc JSME B*, 44, 2699–2706, 1978.
- [22] A. Sohankar and A. Etminan, Forced-convection heat transfer from tandem square cylinders in cross flow at low Reynolds numbers. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 60, 733-751, 2009. <https://doi.org/10.1002/flid.1909>.
- [23] D. Chatterjee and B. Mondal, Forced convection heat transfer from tandem square cylinders for various spacing ratios. *Numerical Heat Transfer Part A: Applications*, 61, 381–400, 2012. <https://doi.org/10.1080/10407782.2012.647985>.
- [24] X. Qian, D. Xuan, X. Zhao and Z. Shi, Heat dissipation optimization of lithium-ion battery pack based on neural networks. *Applied Thermal Engineering*, 162, 114289, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114289>.
- [25] A. Yüksek, H. Bircan, M. Zontul ve O. Kaynar, Sivas ilinde yapay sinir ağları ile hava kalitesi modelinin oluşturulması üzerine bir uygulama. *Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 8, 97-112, 2007.
- [26] S. Tanweer, A. Dewan and S. Sanghi, Influence of gap-ratio on flow dynamics and heat transfer for a square cylinder approaching a moving wall in turbulent regime. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 172, 121122, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121122>.
- [27] K. Khanafer and K. Vafai, Effect of a circular cylinder and flexible wall on natural convective heat transfer characteristics in a cavity filled with a porous medium. *Applied Thermal Engineering*, 181, 115989, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115989>.





Prediction of Yoshida Uemori model parameters by the bees algorithm and Genetic Algorithm for 5xxx series aluminium alloys

5xxx serisi alüminyum alaşımları için Yoshida Uemori model parametrelerinin arı algoritması ve genetik algoritma ile tahmini

Habip Gökay Korkmaz^{1,*}, Serkan Toros², Mete Kalyoncu³

^{1,2} Department of Mechanical Engineering, Niğde Ömer Halisdemir University, Niğde, Turkey

^{1,3} Department of Mechanical Engineering Konya Technical University, Konya, Turkey

Abstract

In sheet metal forming processes, springback is a very important issue in the view of the excellent quality design. Several mathematical models have been developed to estimate the springback more accurately, including various material parameters. In this study, the model parameters of Yoshida-Uemori two surface plasticity model, which can well predict the springback for different loading conditions, have been determined using The Bees Algorithm and Genetic Algorithm which are frequently used recently for optimization of nonlinear problems. In addition, the performances of the algorithms have been determined for the different frequency of experimental data, dense-sparse, sparse-dense, dense-dense and sparse-sparse for elastic and plastic regions. According to the results, although the determined material parameters have different values, the fitting performances are found similar for both The Bees Algorithm and Genetic Algorithm. However, in the view of the data frequency, the more appropriate results are obtained from the dense-dense data set (Case 3).

Keywords: Yoshida Uemori model parameters, Optimization, The Bees Algorithm, Genetic Algorithm

1 Introduction

In metal forming processes, springback is an important problem that needed to be overcome. There are many modelling studies in the literature to determine the springback characterization of the sheet materials [1-4]. The models used for the springback prediction include complex mathematical operations including the anisotropic behaviour of the materials and the hardening models. When the sheet metals are stamped, they may exhibit different properties in compression and drawing directions. This is called as the Bauschinger effect [5] which is explained by the dislocation theory. It has been observed that the methods involving different deformation combinations, such as cyclic tensile and compression, used for the determination of mathematical models, have increased their ability to predict springback [6, 7]. One of the models that best simulates the Bauschinger effect is the isotropic-kinematic hardening model combined with two surface plasticity models. The most commonly used

Özet

Sac metal şekillendirme işlemlerinde tasarım kalitesinin mükemmelliği açısından geri esneme çok önemli bir yer teşkil etmektedir. Geri esnemelerin tahmini için birçok matematiksel model geliştirilmiş olup bu matematiksel model parametrelerinin belirlenmesi için birçok yöntem kullanılmaktadır. Bu çalışmada farklı yüklem koşulları için geri esnemeyi çok iyi tahmin edebilen Yoshida-Uemori iki yüzeyli plastisite malzeme model parametreleri, son zamanlarda doğrusal olmayan problemlerin optimizasyonu için sıkça kullanılan "Arı Algoritması" ve "Genetik Algoritma" kullanılarak belirlenmiştir. Aynı zamanda deneysel veriler elastik ve plastik bölgede sırasıyla; sık-seyrek, seyrek-sık, sık-sık ve seyrek-seyrek olacak şekilde ayarlanarak veri yoğunluğunun parametre sonuçlarına etkisinin incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre belirlenen malzeme parametreleri farklı değerlere sahip olmasına rağmen Arı Algoritması ve Genetik Algoritma için uyum performansı yaklaşık olarak benzer çıkmıştır. Ancak sonuçlar data sıklığı açısından incelendiğinde sık-sık (Durum 3) veri kümesi daha iyi sonuçlar vermiştir.

Anahtar kelimeler: Yoshida Uemori model parametreleri, Optimizasyon, Arı Algoritması, Genetik Algoritma

two surface plasticity model is Yoshida Uemori [8]. This model can work with any anisotropic yield criterion, as well as to define the modulus of elasticity as variable with the given deformation.

Although the Yoshida-Uemori model predicts springback with high accuracy due to the complex mathematical operations associated with each other, it is difficult to find the model parameters due to these complex expressions, and special test tools are required to perform tensile and compression tests. There are various experimental and numerical methods in the literature to obtain cyclic loading behaviour. One of the most commonly used cyclic tests is the cyclic tensile test where sheets of special geometry are nipped between lubricated sheets to prevent buckling [9-12]. Different applications have been made for the determination of complex mathematical model parameters which are difficult to solve. For example; Chang et al. [13] using the regression method with a series of procedures they followed, they determined the Yoshida-

Uemori model parameters. Using LS-Dyna finite element analysis program, MAT-125 material card, they used simulations for cyclic and shear tests to verify their model parameters. The data obtained from the analysis indicated that they simulated experimental curves correctly.

Since Yoshida Uemori model and similar models, it is difficult to determine the material model parameters, some authors have tried to determine the material parameters by using optimization method. For example, in two different studies, Eggertsen at al. [14, 15] determined both Yoshida-Uemori parameters using LS-OPT, the optimization tool of the LS-Dyna analysis program, by performing both bending and tensile-compression tests. The authors stated that the results obtained by this method in one of their studies gave much better results than the classical method, and in the other study, the data obtained from both types of experiments were equal in terms of accuracy. However, due to buckling problems experienced in tensile-compression tests, they stated that the bending test was an easier method. Toros [16] obtained the Yoshida Uemori model parameters using LS-OPT, the optimization tool of the LS Dyna analysis program. He determined that this new approach yields better results than those obtained only by cyclic experiments and stated that the results of the numerical analysis and experimental results were very close. Chaboche, a kinematic stiffening model like Mahmoudi at al. [17] Yoshida Uemori, used a multipurpose Genetic Algorithm to determine the material model parameters. They stated that limit values are extremely important when using Genetic Algorithm and model parameters obtained by optimization give better results than those obtained by classical techniques. Li at al. [18] Yoshida Uemori and the homogeneous yield function-based anisotropic hardening (HAH) material models with high springback prediction capability have determined the model parameters by using global optimization approach. They made U-shaped bending analyses with the obtained model parameters and compared them with experimental data. They stated that both material models were similar to experimental results.

In this study, cyclic tensile-compression experimental data will be used to determine Yoshida Uemori model parameters with the help of The Bees Algorithm and Genetic Algorithm, which is one of the optimization techniques that have recently optimized the solution of nonlinear problems. Although there are similar studies in the literature with the Genetic Algorithm, no study has been found about the finding of material parameters with The Bees Algorithm.

2 The Bees Algorithm and Genetic Algorithm

2.1 The Bees Algorithm

The Bees Algorithm is an optimization solution tool that mimics the food finding behaviour of honey bees in nature. Many works [19-28] explains in detail The Bees Algorithm. The Bees Algorithm requires a number of parameters to be set as explained in Table 1. The flowchart of The Bees Algorithm for constrained optimization problems is as shown in Figure 1. In its simplest form, The Bees Algorithm works as follows; The n bee is randomly distributed to the

search space. The suitability of the sites visited by these bees is evaluated. The highest fitnesses m sites are chosen for neighbourhood search. The neighbourhood search is conducted in the selected sites and assigned more bees to the best e sites. The probability of sites being selected is determined according to them fitness values. Searches in the neighbourhood of the best e sites are made more detailed by recruiting more bees. Only the one bee with the highest fitness will be selected to the next bee population. The remaining bees in the population are randomly assigned to space again within the specified constraint conditions for new potential solutions. The iterations are repeated until a stopping criterion is fitted.

Table 1. Required parameters used in The Bees Algorithm

Notation	Explanation
n	Number of scout bees
e	Number of elite selected sites
m	Number of best selected sites
nep	Number of recruited bees around elite selected sites
nsp	Number of recruited bees around best selected sites
ngh	Patch radius for neighbourhood search
itr	Iteration number (Stop criterion)

2.2 Genetic Algorithm

Genetic algorithm (GA) is one of the commonly used optimization techniques that mimic natural selection and genetics. GA scans search areas that contain possible solutions and generates populations from individual points in these search areas many times. Each new generation improves population solutions become better.

In this study, Genetic Algorithm Solver in the Optimization Toolbox [29] in MATLAB software, which is a capable and useful tool, was used to solve optimization problems.

In its simplest form, the Genetic Algorithm includes the following steps;

- Coding of Solutions
- Creating the First Population
- Calculation of Compliance Value
- Application of Replication Process
- Implementation of Cross Transactions
- Application of Mutation Process
- Formation of a New Generation and Stopping the Cycle.

To determine the prediction performance of the models for each iteration, a fitness function which is given in Equation (1) is described. As can be seen from the equation, the minimization process is established on the differences of the calculated and experimental stress values for each point.

$$Err = Min \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \left[\frac{(\sigma_i^{exp} - \sigma_i^{model})^2}{\sigma_i^{exp}} \right] \quad (1)$$

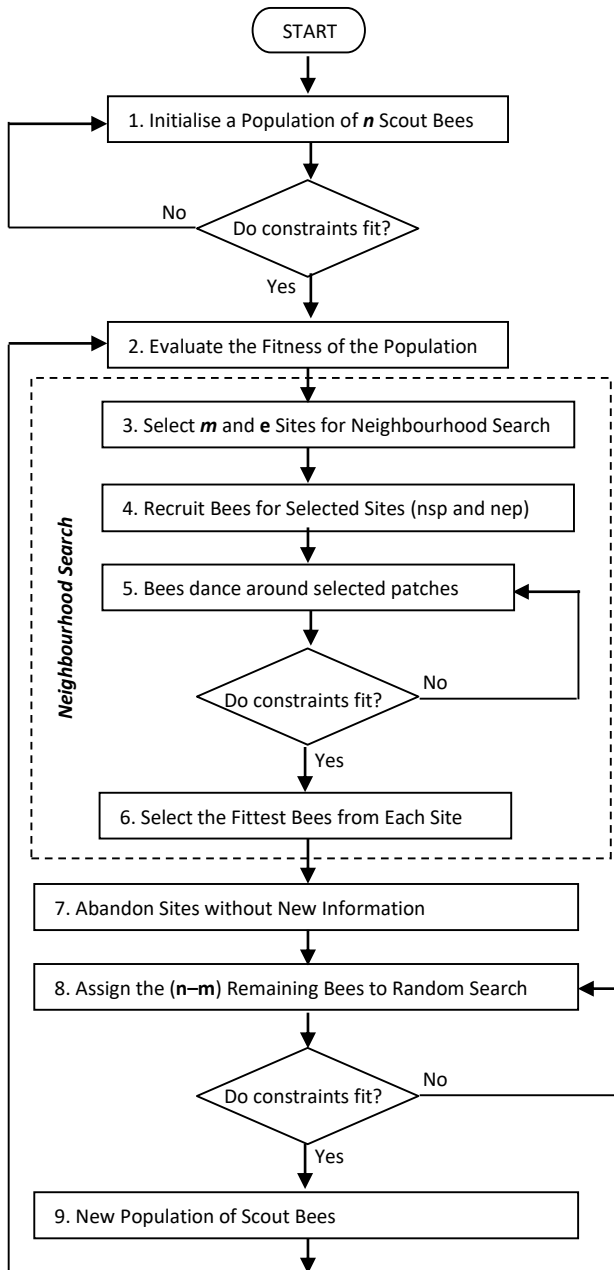


Figure 1. Pseudo code of The Bees Algorithm for constrained optimization problems

3 Isotropic, kinematic hardening rule of Yoshida Uemori

The Yoshida-Uemori two surface plasticity model is established for modelling of the kinematic behaviour of the yield surface within a bounding surface. The prediction capability of the model for the Bauschinger effect and the work hardening stagnation with the given reverse deformations, is the main powerful side. Since it can predict the cyclic stress-strain relation of the materials in a higher accuracy, the model is used in many commercially available finite element simulation software like Ls-Dyna and Pam-Stamp. The high accuracy on the prediction of the springback of materials was proven by many researchers [30, 31]. The two moving yield contour and their kinematic motions are given in Figure 2.

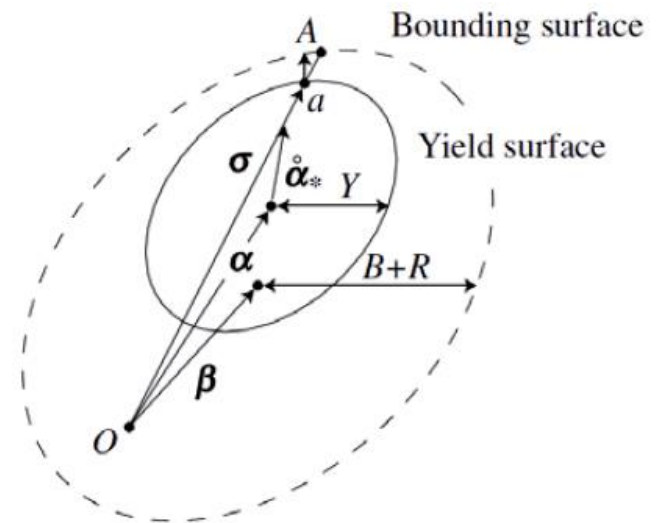


Figure 2. Schematic explanation of the two moving surface Yoshida-Uemori model

In the model, the yield contour's mathematical function can be defined as follow:

$$f_0 = \varphi(\sigma) - Y = 0 \quad (2)$$

Since the model can be used with the anisotropic yield functions, $\varphi(\sigma)$ can be specified as an anisotropic yield criterion where the σ is the Cauchy stress tensor and Y is the initial yield strength of the materials. In the studied Y-U hardening model, as an anisotropic yield criterion the quadratic Hill-48 is chosen. The materials may have early yielding since the dislocation movement can be provided with less shear forces during the reverse loading conditions. Therefore, the yield contour is assumed to be kinematic hardening while the bounding surface is combined hardening behaviour. The kinematic motion of the yield contour can be defined as:

$$f_0 = \varphi(\sigma - \alpha) - Y = 0 \quad (3)$$

In the given equation, α is the back-stress which varies with the applied effective plastic strain rate and the bounding surface F can be expressed with an additional parameter that shows the center of the bounding surface β as:

$$F = \varphi(\sigma - \beta) - (B + R) = 0 \quad (4)$$

Where the B and R are the initial size and isotropic hardening component of the bounding surface and $B+R$ represents the size of the bounding surface. The kinematic motion of the yield contour with respect to the bounding surface is expressed as:

$$\alpha_* = \alpha - \beta \quad (5)$$

Where the α and β can be defined for different orientations:

$$\alpha = \begin{pmatrix} \alpha_{11} \\ \alpha_{22} \\ \alpha_{12} \end{pmatrix}; \beta = \begin{pmatrix} \beta_{11} \\ \beta_{22} \\ \beta_{12} \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\dot{\alpha}_* = C \left[\left(\frac{\alpha}{Y} \right) (\sigma - \alpha) - \sqrt{\frac{\alpha}{\bar{\alpha}_*}} \alpha_* \right] \dot{\epsilon} \quad (7)$$

Where $\bar{\alpha}_*$ is the equivalent form of the kinematic motion of the yield surface with respect to the bounding surface ($\bar{\alpha}_* = \varphi(\alpha_*)$) while α can be found via the following equation:

$$a = B + R - Y \quad (8)$$

In above equation, Y is the size of the yield surface and is constant throughout the deformation process.

The provisional prediction in size and center of the bounding surface can be expressed as:

$$\dot{R} = k(R_{sat} - R)\dot{\epsilon} \quad (9)$$

$$\dot{\beta}_* = m \left[\left(\frac{b}{B + R} \right) (\sigma - \beta) - \beta \right] \dot{\epsilon} \quad (10)$$

Other advantage of the model, it can be used with the variable elasticity modulus. It is almost certain for the most researchers that the elasticity modulus of the materials vary with the given plastic deformations and it is given in Equation (11).

$$E = E_0 - (E_0 - E_A)(1 - \exp(-\xi\epsilon)) \quad (11)$$

As can be seen, the model can reflect the nonlinear behaviour of the elasticity modulus' variation with the given deformation. In the model, the E_0 is the initial elasticity modulus and E_A is the final elasticity modulus value for the given last unloaded deformation level. ξ is the essential parameter that reflect the decreasing rate of the elasticity modulus with the given deformation. The decrease in the elasticity modulus of the materials is generally determined via the loading and unloading tests applied to tensile test specimens, and the model parameters can be determined via the loading and unloading stress strain data. However, it is also possible to determine indirectly this variation with the optimization process. Therefore, the Y-U model can be defined by 9 parameters ($Y, c, B, R_{sat}, b, k, E_a, \text{ksi}, C1$ and $C2$) that reflect the material behaviour.

4 Materials and experiments

Due to their high strength and low density, 5754-H22, 5083-O and 5005-O aluminium alloys, which are frequently used in aviation and automotive sectors, have been identified as target materials. The thickness of the selected materials is 0.97 mm for 5754-H22, 2 mm for 5083 O and 5005 O. The general mechanical properties of these materials were obtained at 25 mm/min (0.0083 s^{-1}) deformation rate for test samples prepared in different rolling directions according to

ASTM E8 standard. The technical drawing of the sample according to ASTM E8 standard is given in Figure 3.

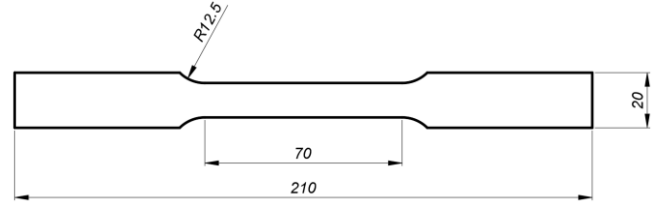


Figure 3. Tensile test specimen for ASTM-E8 standard

In order to prevent buckling during the test, cyclic compression-tensile tests were carried out in SHIMADZU-Autograph 100kN tensile test machine with special apparatus where the test specimen shown in Figure 4 is compressed between the plates. Strain were measured by a video extensometer which synchronized with the tensile test machine. Since the video-extensometer follows two gauge marks drawn on the sample by means of two cameras, the plates are made of transparent plexiglass material. The technical drawing of the cyclic tensile test sample given in Figure 5 was adapted to our system with reference to the work of Tamura et al. [32]. For cyclic tensile-compression tests, the tensile test machine can be programmed for different limit values.



Figure 4. The cyclic experimental setup

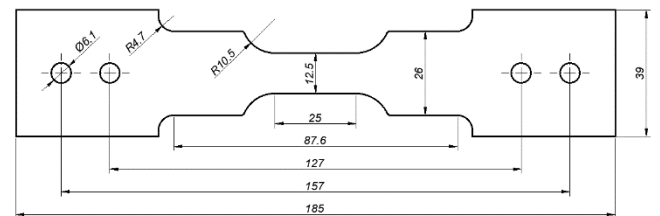


Figure 5. Technical drawing of the cyclic test sample

In this study, as shown in Figure 6 cyclic tensile-compression tests were carried out in three stages. The test specimens were tensile from stressless (0 strain value) to 0.01 strain value, then -0.01 strain value was compressed and then until the stress value on the material was 0 the load on the sample was unloaded. Cyclic tests were performed at a

strain rate of 5mm/min (1.666×10^{-3} 1/s). Although the stress values are not exactly compatible with the tensile curves, they have yielded close results.

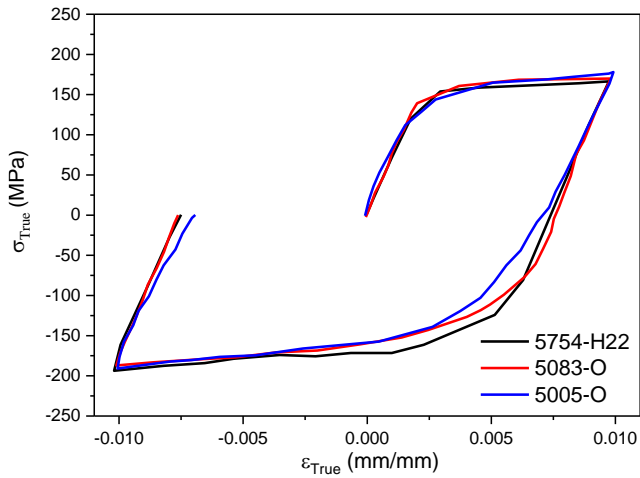


Figure 6. Cyclic tensile-compression test results of aluminium alloys

5 Results and discussions

The general mechanical properties required for forming analysis of the related materials were determined by tensile tests and the true stress unit deformation curves obtained are given in Figure 7. When the stress values obtained from the samples in different rolling directions of the materials were evaluated, no significant difference was obtained, but the differences in total unit deformation values were obtained. Lankford parameters of the materials were determined by tensile tests and their general mechanical properties are given in Table 2.

Material parameters, Yoshida Uemori equations were converted into code in Matlab program and Genetic Algorithm in Matlab / Optimization tool and Bee Algorithm in Pham's study [20, 21] were tried to be determined by adapting to basic code. In order to determine the importance of data frequency when determined material parameters, each data sets were interpolated dense in the elastic region and sparse in the plastic region (Case 1), sparse in the elastic region and dense in the plastic region (Case 2), dense in the elastic region and dense in the plastic region (Case 3) and sparse in the elastic region and sparse in the plastic region (Case 4) (Figure 8).

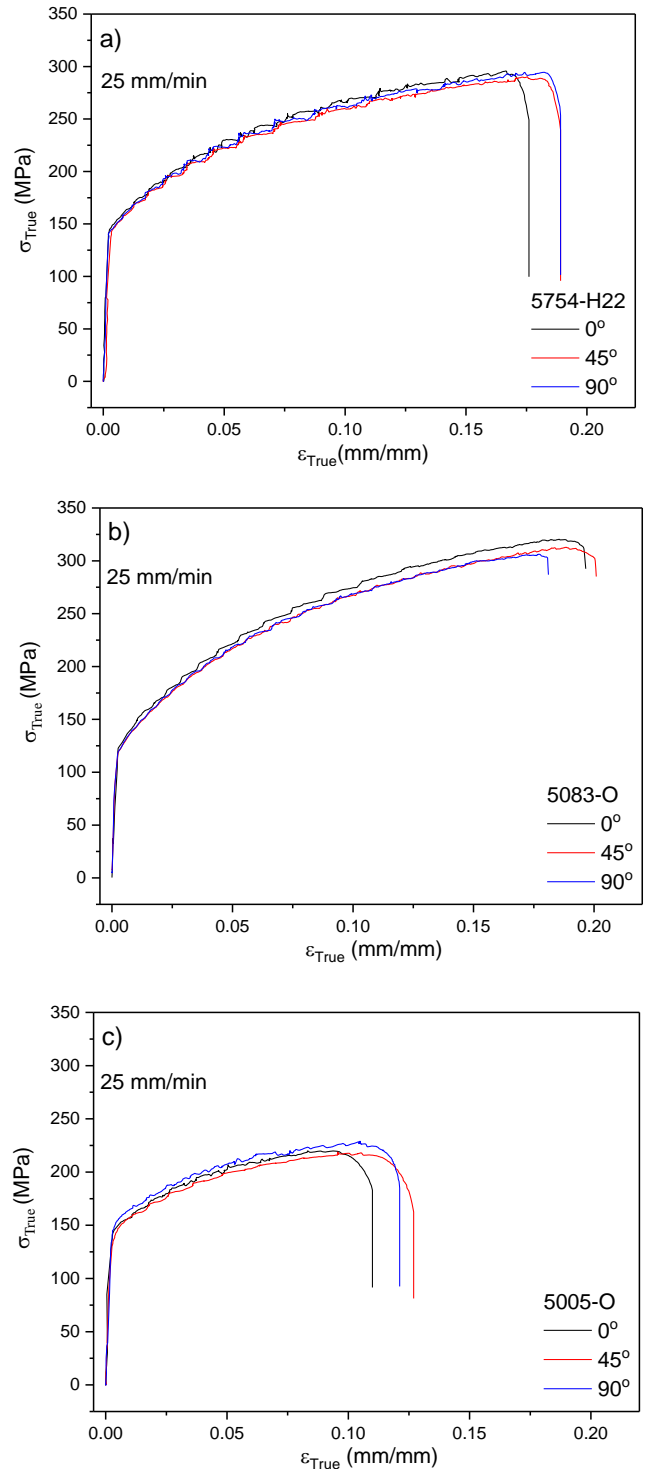


Figure 7. Tensile test results in different rolling directions; (a) 5754-H22, (b) 5083-O, (c) 5005-O

Table 2. Mechanical properties of materials

Materials	σ_0	σ_{45}	σ_{90}	ϵ_0	K	n	r_0	r_{45}	r_{90}
5754-H22	141.25	143.24	141.77	0.0022	425	0.20	0.50	0.66	0.61
5083-O	142.85	139.24	142.84	0.0036	594	0.29	0.53	0.79	0.50
5005-O	141.01	132.73	144.84	0.0028	310	0.14	0.46	0.76	0.69

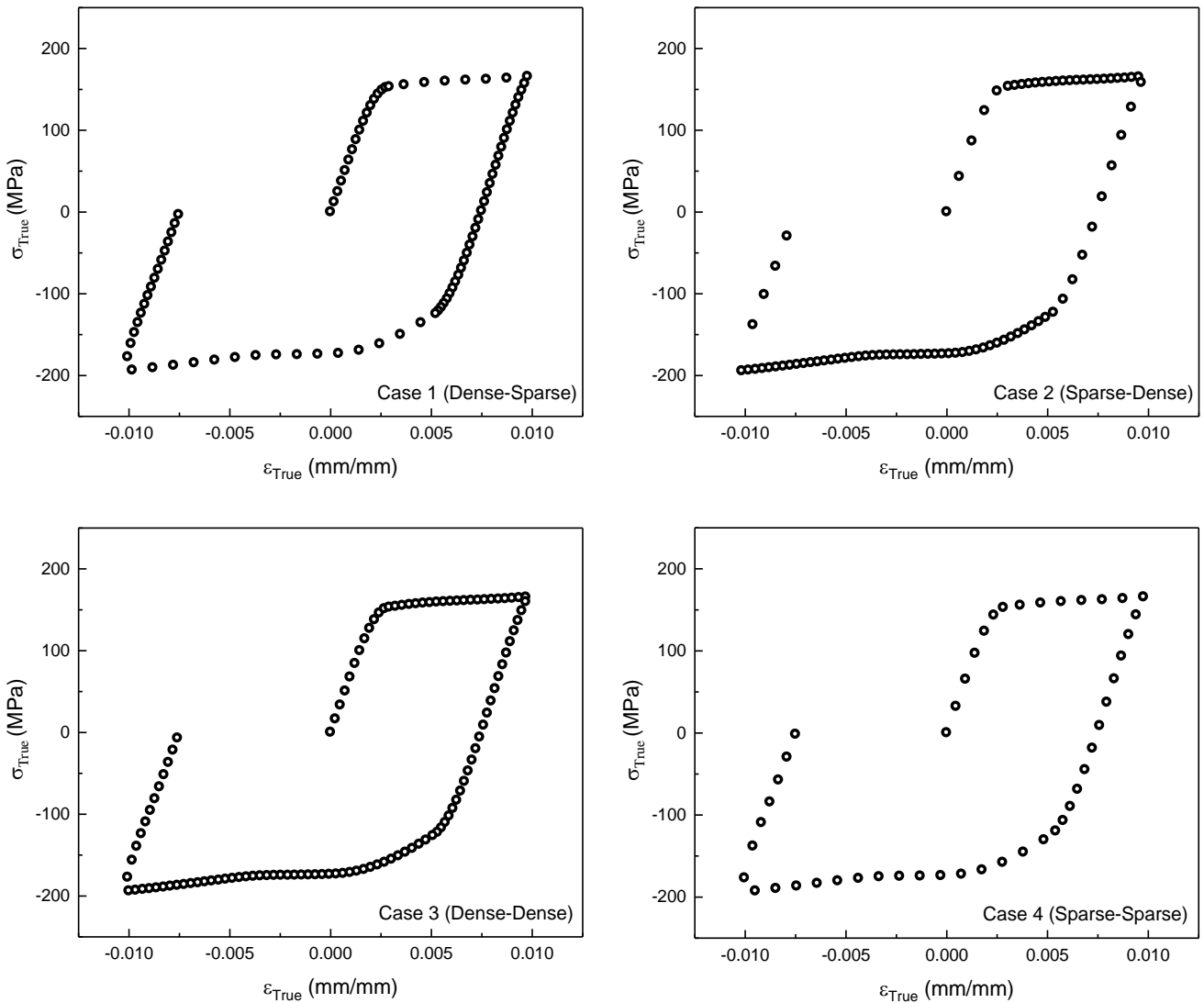


Figure 8. Different data frequency sets for Al 5754-H22 Material

Material parameters determined using The Bees Algorithm and Genetic Algorithm are given in Table 3 and Table 4. True stress-strain data calculated by curve fitting technique were compared with experimental data (R^2) as % error. The error rates for all sets are given in Figure 9. In the analysis, it was observed that Genetic Algorithm and The Bees Algorithm give close values to each other. When Figure 9 is examined; Case 1 gave the best results for the 5083 BA and 5083-GA sets and the worst for the 5754-GA set. Case 2 gave the best results for the 5005-BA and 5005-GA sets, while the 5754-BA gave the worst results for the 5083-BA and 5083-GA sets. Case 4 gave the best results for the 5754 BA and 5754 GA sets, while the worst results for the 5005-BA and 5005-GA sets. However, Case 3 did not give the worst results in any material set. The graph of the comparison of the experimental data with the material parameters obtained by using Case 3 for 50005-O material is shown in Figure 10.

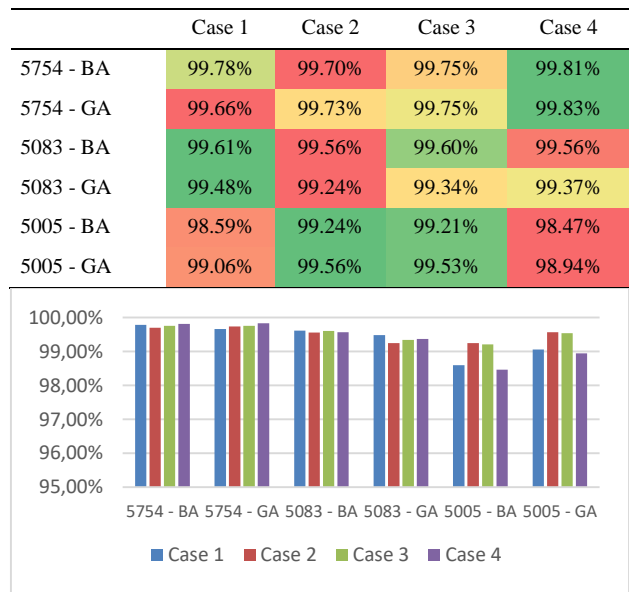


Figure 9. Error rates (R^2) of obtained material parameters

Table 3. Yoshida Uemori model parameters determined by The Bees Algorithm

Materials	Y	c	B	Rsat	b	k	Ea	ksi	C1	C2
5754-H22 BA-Case 1	134.895	483.537	171.741	187.104	69.279	15.392	67351	-15.995	67.062	0.389
5754-H22 BA-Case 2	144.820	114.787	226.169	381.130	96.265	-13.022	68585	-6.789	85.723	0.788
5754-H22 BA-Case 3	141.459	187.602	200.326	399.203	37.105	-12.449	71553	181.740	53.394	0.509
5754-H22 BA-Case 4	145.499	166.575	200.662	277.755	39.315	-13.950	66961	-12.036	91.256	0.731
5083-O BA-Case 1	140.670	208.501	170.958	280.214	52.422	30.158	68121	-26.685	36.124	1.093
5083-O BA-Case 2	138.726	322.635	157.707	208.277	44.145	81.050	70704	152.989	20.325	0.390
5083-O BA-Case 3	142.084	123.938	195.264	225.999	31.756	18.697	70969	136.893	77.718	0.707
5083-O BA-Case 4	127.850	975.712	149.821	147.001	57.319	63.324	66676	-16.491	89.172	0.769
5005-O BA-Case 1	110.450	216.091	129.399	448.590	85.206	123.415	64298	106.388	34.269	1.336
5005-O BA-Case 2	134.116	576.970	140.042	193.781	56.008	136.596	61151	189.097	89.506	0.183
5005-O BA-Case 3	131.244	168.485	134.305	453.347	68.916	129.956	62857	140.216	12.698	0.773
5005-O BA-Case 4	122.364	489.675	123.230	328.247	80.832	147.724	69045	54.920	93.943	0.656

Table 4. Yoshida Uemori model parameters determined by Genetic Algorithm

Materials	Y	c	B	Rsat	b	k	Ea	ksi	C1	C2
5754-H22 GA-Case 1	132.839	256.803	190.732	300.469	1.047	1.000	68961	31.115	99.995	0.015
5754-H22 GA-Case 2	137.530	445.067	187.548	184.030	1.003	59.997	68438	2.631	99.999	0.014
5754-H22 GA-Case 3	138.147	364.698	188.831	150.817	1.119	1.008	69871	184.743	99.948	0.049
5754-H22 GA-Case 4	147.500	282.863	189.194	150.000	1.087	1.000	69937	5.875	45.670	0.077
5083-O GA-Case 1	132.074	283.821	185.032	308.427	1.069	1.134	68871	26.433	72.063	0.116
5083-O GA-Case 2	142.979	271.277	190.310	399.892	1.009	59.992	69842	199.994	42.095	0.9873
5083-O GA-Case 3	139.234	316.680	184.975	205.941	1.006	1.002	69540	199.996	99.997	0.0131
5083-O GA-Case 4	131.880	276.054	189.789	198.987	1.008	1.031	68737	25.455	67.653	0.0208
5005-O GA-Case 1	112.678	491.589	119.119	533.388	88.860	149.998	62174	20.473	81.479	0.896
5005-O GA-Case 2	145.395	234.440	166.823	599.996	32.366	149.999	62306	199.997	1.009	1.000
5005-O GA-Case 3	139.430	284.575	163.937	599.993	35.663	149.999	63285	110.336	1.008	1.000
5005-O GA-Case 4	126.834	647.204	134.031	428.454	74.792	149.990	62889	7.090	99.993	0.016

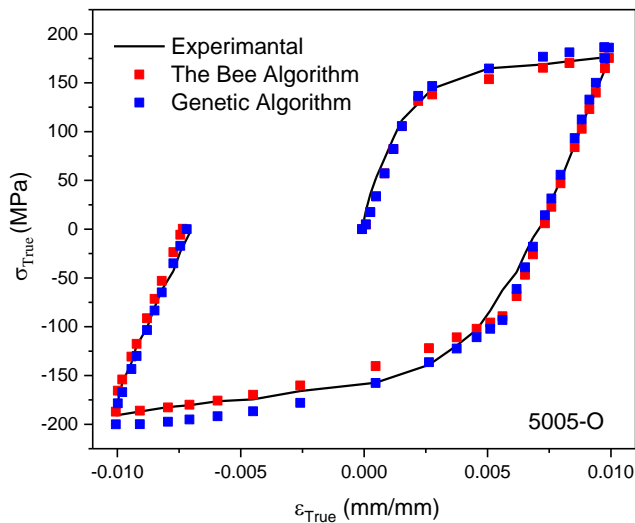


Figure 10. The results of the analysis using material parameters obtained with The Bees and Genetic Algorithms for Al 5005-O material

6 Conclusion

After Yoshida Uemori equations were coded in Matlab. The Bees and Genetic Algorithms were used to determine the material parameters of 5xxx series aluminium. When the results obtained from the analysis using the material model parameter obtained by The Bees Algorithm and the model parameter obtained by Genetic Algorithm were compared with the experimental data, it was observed that the two algorithms gave very close results. However, since The Bees Algorithm scans globally, it is possible to find the right roots even if the initial bound are not very good, but the initial bound for the Genetic Algorithm are of high importance.

In order to determine the importance of data density when determining material parameters, data sets were interpolated for 4 different cases. When the results of the material parameters obtained are examined, it is seen that the most stable result is given by Case 3 (Dense-Dense) data set and the most unstable result is given by State 2 (Sparse-Dense) and Case 4 (Sparse Sparse) data sets.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity Rate (iThenticate): % 16

References

- [1] Y. K. Chen, X. X. Li, and L. H. Lang, Various elastic moduli of AA6016 and their application on accurate prediction of springback. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 42, 319-326, May 19 2019. <https://doi.org/10.1080/02533839.2019.1584765>
- [2] B. Chongthairungruang, V. Uthaisangsuk, S. Suranuntchai, and S. Jirathearanat, Springback prediction in sheet metal forming of high strength steels. *Materials & Design*, 50, 253-266, Sep 2013. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.02.060>
- [3] X. Xue, J. Liao, G. Vincze, A. B. Pereira, and F. Barlat, Experimental assessment of nonlinear elastic behaviour of dual-phase steels and application to springback prediction. *International Journal of Mechanical Sciences*, 117, 1-15, Oct 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.08.003>
- [4] S. Chatti and N. Hermi, The effect of non-linear recovery on springback prediction. *Computers & Structures*, 89, 1367-1377, Jul 2011. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2011.03.010>
- [5] W. Prager, A new method of analyzing stresses and strains in work hardening plastic solids. *ASME J. App. Mech* 23, 493-496, 1956.
- [6] T. Uemori, T. Okada, and F. Yoshida, Simulation of springback in V-bending process by elasto-plastic finite element method with consideration of Bauschinger effect. *Metals and Materials-Korea*, 4, 311-314, 1998. <https://doi.org/10.1007/BF03187783>
- [7] T. Uemori, T. Okada, and F. Yoshida, FE analysis of springback in hat-bending with consideration of initial anisotropy and the Bauschinger effect. *Advances in Engineering Plasticity*, Pts 1-2, 177-1, 497-502, 2000. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.177-180.497>
- [8] F. Yoshida and T. Uemori, A model of large-strain cyclic plasticity describing the Bauschinger effect and workhardening stagnation. *International Journal of Plasticity*, 18, 661-686, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0749-6419\(01\)00050-X](https://doi.org/10.1016/S0749-6419(01)00050-X)
- [9] R. K. Boger, R. H. Wagoner, F. Barlat, M. G. Lee, and K. Chung, Continuous, large strain, tension/compression testing of sheet material. *International Journal of Plasticity*, 21, 2319-2343, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2004.12.002>
- [10] J. H. Kim, D. Kim, Y. S. Lee, M. G. Lee, K. Chung, H. Y. Kim, et al., A temperature-dependent elasto-plastic constitutive model for magnesium alloy AZ31 sheets. *International Journal of Plasticity*, 50, 66-93, Nov 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2013.04.001>
- [11] M. G. Lee, D. Kim, C. M. Kim, M. L. Wenner, R. H. Wagoner, and K. Chung, Spring-back evaluation of automotive sheets based on isotropic-kinematic hardening laws and non-quadratic anisotropic yield functions - Part II: characterization of material properties. *International Journal of Plasticity*, 21, 883-914, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2004.05.015>
- [12] F. Yoshida, T. Uemori, and K. Fujiwara, Elastic-plastic behavior of steel sheets under in-plane cyclic tension-compression at large strain. *International Journal of Plasticity*, 18, 633-659, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0749-6419\(01\)00049-3](https://doi.org/10.1016/S0749-6419(01)00049-3)
- [13] C. Y. Chang, M. H. Ho, and P. C. Shen, Yoshida-Uemori material models in cyclic tension-compression tests and shear tests. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture*, 228, 245-254, Feb 2014. <https://doi.org/10.1177/0954405413499011>

- [14] P. A. Eggertsen and K. Mattiasson, An efficient inverse approach for material hardening parameter identification from a three-point bending test. *Engineering with Computers*, 26, 159-170, Apr 2010. <https://doi.org/10.1007/s00366-009-0149-y>.
- [15] P. A. Eggertsen and K. Mattiasson, On the identification of kinematic hardening material parameters for accurate springback predictions. *International Journal of Material Forming*, 4, 103-120, Jun 2011. <https://doi.org/10.1007/s12289-010-1014-7>
- [16] S. Toros, Parameters determination of Yoshida Uemori model through optimization process of cyclic tension-compression test and V-bending springback. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 13, 1893-1911, 2016. <https://doi.org/10.1590/1679-78252916>
- [17] A. H. Mahmoudi, S. M. Pezeshki-Najafabadi, and H. Badnava, Parameter determination of Chaboche kinematic hardening model using a multi objective Genetic Algorithm. *Computational Materials Science*, 50, 1114-1122, Jan 2011. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2010.11.010>
- [18] J. H. Yongfeng Li, Bin Gu, Shuhui Li, Identification of advanced constitutive model parameters through global optimization approach for DP780 steel sheet. *Procedia Engineering*, 207, 125-130, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.749>
- [19] D. T. Pham and M. Castellani, Benchmarking and comparison of nature-inspired population-based continuous optimisation algorithms. *Soft Computing*, 18, 871-903, May 2014. <https://doi.org/10.1007/s00500-013-1104-9>
- [20] D. T. Pham, A. Ghanbarzadeh, E. Koç, S. Otri, S. Rahim, and M. Zaidi, The Bees Algorithm technical note. *Manufacturing Engineering Centre*, 1-57, 2005.
- [21] D. T. Pham, A. Ghanbarzadeh, E. Koç, S. Otri, S. Rahim, and M. Zaidi, The Bees Algorithm - A novel tool for complex optimisation problems. *Manufacturing Engineering Centre*, 454-458, 2006. <https://doi.org/10.1016/B978-008045157-2/50081-X>
- [22] A. A. Fahmy, M. Kalyoncu, and M. Castellani, Automatic design of control systems for robot manipulators using the bees algorithm. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I-Journal of Systems and Control Engineering*, 226, 497-508, Apr 2012.
- [23] D. T. Pham, E. Koç, M. Kalyoncu, and M. Tinkır, Hierarchical PID controller design for a flexible link robot manipulator using The Bees Algorithm. *Proceedings of Proceedings of 6th International Symposium on Intelligent Manufacturing Systems*, Sakarya, Turkey, 2008.
- [24] D. T. Pham and M. Kalyoncu, Optimisation of a Fuzzy Logic Controller for a flexible single-link robot arm using The Bees Algorithm. *Proceedings of 7th IEEE International Conference on Industrial Informatics*, Cardiff, UK, 2009.
- [25] M. A. Sen, V. Bakırcıoğlu, and M. Kalyoncu, Performances comparison of The Bees Algorithm and Genetic Algorithm for PID controller tuning. *Proceedings of 5th International Mechatronics and Control Engineering*, Venice, Italy, 2016.
- [26] O. Öztürk, M. Kalyoncu, and A. Ünüvar, Multi objective optimization of cutting parameters in a single pass turning operation using The Bees Algorithm. *Proceedings of 1st International Conference on Advances in Mechanical and Mechatronics Engineering*, Ankara/TURKEY, 2018.
- [27] O. Acar, M. Kalyoncu, and A. Hassan, The design optimization of a gripper mechanism using The Bees' Algorithm. *Proceedings of International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'18)*, Konya/TURKEY, 2018.
- [28] O. Acar, M. Kalyoncu, and A. Hassan, Proposal of a harmonic Bees Algorithm for design optimization of a gripper mechanism, *Cham*, 2019, 2829-2839. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_280
- [29] Anonymous. (2019). MATLAB global optimization toolbox user's guide. Available: <https://www.mathworks.com/help/gads/index.html>. (Accessed March 12nd, 2021)
- [30] P. C. B. Abdulaziz Alghtani, D.C. Barton, V.V. Toropov, Springback analysis and optimization in sheet metal forming. *Proceedings of 9th European LS-DYNA Conference*, Manchester, 2013.
- [31] D. E. G. Ali Aryanpour, Evaluation of LS-DYNA material models for the analysis of sidewall curl in advanced high strength steels. *Proceedings of 12th International LS-DYNA Conference*, Detroit, 2012.
- [32] S. Tamura, S. Sumikawa, T. Uemori, H. Hamasaki, and F. Yoshida, Experimental observation of elasto-plasticity behavior of type 5000 and 6000 aluminum alloy sheets, *Materials Transactions*, 52, 868-875, May 2011. <https://doi.org/10.2320/matertrans.L-MZ201101>





Shape modification of Ahmed body to reduce drag coefficient and determination of turbulence model

Ahmed modelinin sürüklenme katsayısını azaltmak için şekil modifikasyonu ve türbülans modelinin belirlenmesi

Ahmet Şumnu^{1,*} 

¹ Department of Aerospace Engineering, Iskenderun Technical University, 31200, Hatay, Turkey,

Abstract

In this study, the aerodynamic analysis of Ahmed body which is generic automobile model is performed to determine convenient turbulence model and reduce drag coefficient by modifying shape of model. For this purpose, Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis is carried out using different turbulence models that are Spalart-Allmaras, (Shear Stress Transport) SST k- ω , Standard k- ϵ , Realizable k- ϵ , (Re-Normalisation Group) RNG k- ϵ turbulence models. The results are compared with experimental data that is available in literature. The results show that RNG k- ϵ turbulence model gives superior performance when compared with other models. In order to reduce drag coefficient, the upper region of sides of model is rounded by applying fixed blend radius with 25 mm. The smooth surface can provide high performance in point of aerodynamics. CFD solution is then repeated for the modified model and the result show that drag coefficient value reduces about 6%. In addition, the second modification is performed by applying fixed blend radius with rounded both upper sides and rear underside of body and chamfer with 50 mm is also applied to rear sides of body. However, drag coefficient reduction level is approximately same with first modified model. The pressure coefficient contours and velocity streamlines are presented to show results for baseline and modified bodies.

Keywords: Ahmed body, Drag coefficient, Shape modification, Turbulence model.

Özet

Bu çalışmada, uygun türbülans modelini belirlemek ve şekil modifikasyonu yaparak sürüklenme katsayısını azaltmak için jenerik otomobil modeli olan Ahmed modelinin aerodinamik analizi yapılmıştır. Bu amaçla, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizi, Spalart-Allmaras, (Shear Stress Transport) SST k- ω , Standard k- ϵ , Realizable k- ϵ , (Re-Normalization Group) RNG k- ϵ türbülans modelleri olmak üzere beş farklı türbülans modelleri kullanılarak gerçekleştirildi. Sonuçlar literatürde bulunan deneysel verilerle karşılaştırıldı. RNG k- ϵ türbülans modelinin diğer modellere göre daha üstün performans gösterdiği gözlemlendi. Sürüklenme katsayısını düşürmek için birinci modifikasyonda modelin üst yan bölgeleri 25 mm sabit yarıçap uygulanarak yuvarlatılmıştır. Pürüzsüz yüzey, aerodinamik açıdan yüksek performans sağlayabilir. HAD çözümü değiştirilen model için tekrarlandı ve sonuç, sürüklenme katsayısı değerinin yaklaşık % 6 oranında azaldığını göstermektedir. Ayrıca gövdenin her iki üst ve arka alt tarafı sabit yarıçap ile yuvarlatılmış ve gövdenin arka taraflarına da 50 mm pah uygulanarak ikinci modifikasyon yapılmıştır. Ancak, sürüklenme katsayısı azalma seviyesi, ilk değiştirilen modelle yaklaşık olarak aynıdır. Basınç katsayısı konturları ve hız akış çizgileri, sonuçları göstermek üzere sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Ahmed modeli, Sürüklenme katsayısı, Şekil modifikasyonu, Türbülans model.

1 Introduction

Automotive industry has an important position in the world and continuously develops day by day. The economy is most crucial issue for all industry. Therefore, the engineers try to design and improve economic vehicles. The reduction of fuel consumption can be considered an important task for designer that should find the optimum design for an automobile. It can be stated that the aerodynamic is the most effective factor for fuel consumption of a vehicle. Therefore, the external shape of vehicle should be analyzed by point of aerodynamic for calculation of drag coefficient or force.

Aerodynamic analysis can be performed experimentally in a wind tunnel. However, experimental studies may be more time consuming and costly than numerical simulation method. CFD method can be used to solve flow physics. The Navier-Stokes equations are used when flow solution is performed. In addition, turbulence models are used to obtain accurate results and simulate the flowfield closer to reality since the flow around a vehicle is generally turbulent. Thus, the numerical simulation provides advantages to the researcher in point of saving time and reducing the cost. The previous studies related with aerodynamics of Ahmed body are presented in the following paragraphs.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ahmet.sumnu@iste.edu.tr (A. Şumnu)

Geliş / Recieved: 13.02.2021 Kabul / Accepted: 09.06.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.879584

Ahmed et al. [1] presented the simplified ground vehicle type of bluff body to analyze the time average wake structure as experimentally. Flow field was observed different slant angle and it was concluded that most of drag force stemmed from rear end of the body. The other similar study that related with wake structure of typical vehicle body was presented by Ahmed [2]. In this paper, different shape of vehicle characteristics that are Estate, Fastback and Notchback were analyzed in point of wake structure in a wind tunnel. Same author also presented another similar paper changing slant angle between 0° and 40° and investigated pressure distribution, correlation of wake structure with drag and vortex motion in wake [3].

Khan and Umale [4] was proposed aerodynamic analysis of Ahmed body using Ansys Fluent. They implemented the study in two separate cases changing front of the body radius (R80 and R120) and ground clearance (20 mm and 40 mm). Numerical noise in CFD based solution was proposed for road vehicle by Gilkeson et al. [5]. This study Moving Least Squares (MLS) metamodels were constructed and it was observed that the metamodels deals with numerical noise. Meile et al. [6] was investigated Ahmed body in point of aerodynamic behavior and performed numerical simulation and experimental study. The aerodynamic investigation was performed using Large Eddy Simulation (LES) method at high Reynolds-number for flow over Ahmed body by Östh et al. [7]. An experimental study related with unsteady wake of Ahmed body was presented by Volpe et al. [8]. Yakkundi and Mantha [9] performed a study to analyze the CFD solution of car model. The experimental and CFD solution results of Ahmed body was used to validate for generated image model car. Thabet and Thabit [10] presented CFD simulation study using Ahmed body model with 40° slant angle. The results were validated by comparing with available experimental result.

Tunay et al. [11] investigated the crosswind sensitivity that affects the ground vehicles driving performance. The study was conducted using Ahmed body vehicle model with specified yaw angles (0°-15° degrees) and rear slant angle at 25° and 35°. The results of the study, the authors concluded that the rear slanted surface and rear vertical surface are crucial in point of flow dynamics since turbulence rate and velocity fluctuations effectively high at upper and lower zone of shear layers. Another crosswind study was presented for heavy ground vehicles since their center of gravity is high and they have high lateral surface area. Therefore, the heavy ground vehicles can be encountered in danger of rolling over. Hence, in this study, aerodynamic and vehicle dynamics were investigated roll and lateral dynamics of heavy ground vehicle under subjected of crosswind [12]. The aerodynamic study related with simplified ground vehicle was also presented using particle image velocimetry (PIV) technique. Flow characteristic was investigated changing the slant angle of Ahmed body [13]. The similar study related with crosswind and headwind of the Ahmed body was presented by Zafer and Haskaraman [14]. In this study, incompressible unsteady aerodynamic analysis was performed and compared with experimental study that is available in the literature. Bello-Millan et al. [15] also conducted

experimental study using Ahmed body to determine yaw angle effects on the drag coefficient. The results of the study it was observed that the drag force was increase when yaw angle was between 0° and 60° and remains constant between 60° and 75° and the drag coefficient was than increase up to 90°.

Chovet et al. [16] presented a paper that aims reduction drag force applying sliding mode control (SCM) using square-back Ahmed body. In this study, continuous blowing and controlled blowing applied at different frequencies were applied back of the body to reduce drag force. Drag force was significantly reduced applying proposed approach. Park et al. [17] proposed to use an active flow control technology for increasing aerodynamic efficiency of Ahmed body. Jet actuator was used placing back of the body and it was concluded that reduction of drag force was provided for Ahmed body with 25° slant angle however, drag force was increase for 35° slant angle. Banga et al. [18] also studied on rear slant angle of Ahmed body to investigate aerodynamic efficiency that can be determined using drag and lift force. The appropriate rear slant angle was found 7.5° since minimum drag coefficient was obtained at this angle.

In this study, CFD simulation of generic Ahmed body is performed using five different turbulence models. The purpose of this study is to show which turbulence model gives accurate results and simulate the flow closer to reality. In addition, the Ahmed body model is modified to reduce drag coefficient by changing some geometric parameter. The upper region of sides of model is rounded by applying fixed blend radius with 25 mm. The results of study show that drag level of Ahmed body model reduce about 6%. The second modification is performed by applying fixed blend radius with rounded both upper sides and rear underside of body and chamfer with 50 mm is also applied to rear sides of body. Pressure coefficient contours and velocity streamlines are presented for all turbulence models and modified models.

2 Flow solver

2.1 Governing equation

The Navier-Stokes equations are used to describe the flow fluids. The continuity and momentum equations are available in the Navier-Stokes equations. The three-dimensional, unsteady, compressible flow can be written following Equations (1) and (2)

$$\text{Continuity Equation: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

The Navier-Stokes equation in x-direction can be written as:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho u V) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (2)$$

Drag coefficient is an important characteristic of aerodynamic of vehicles. It can be calculated using the following Equation (3).

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 S} \quad (3)$$

2.2 Turbulence model

The selection of convenient turbulence model is important issue to simulate accurately flow field for vehicles since the flow of vehicles is generally turbulent. In this study, five different turbulence models are used to simulate the flow physics and consider suitable model for Ahmed body model. The turbulence models used for simulation are presented in the following sub-sections.

2.2.1 Spalart-Allmaras turbulence model

The Spalart-Allmaras turbulence model is a one equation model and it is a transport equation for eddy viscosity. It requires low power and computational time during solution of problem. This turbulence model is suitable to apply transonic flow and the flow with adverse pressure gradient. The transport equation of Spalart-Allmaras turbulence model is written as follow Equation (4) [19].

$$\frac{D\tilde{\nu}}{Dt} = \frac{1}{\sigma} [\nabla((\nu + \tilde{\nu})\nabla\tilde{\nu}) + c_{b2}(\nabla\tilde{\nu})^2] + c_{b1}\tilde{S}\tilde{\nu}(1 - f_{t2}) - [c_{w1}f_w - \frac{c_1}{\kappa^2}f_{t2}] \left[\frac{\tilde{\nu}}{d} \right]^2 + f_{t1}(\Delta q)^2 \quad (4)$$

From Equation $\frac{1}{\sigma} [\nabla((\nu + \tilde{\nu})\nabla\tilde{\nu}) + c_{b2}(\nabla\tilde{\nu})^2]$ is the diffusion term, and $c_{b1}\tilde{S}\tilde{\nu}(1 - f_{t2})$ is the production term and $[c_{w1}f_w - \frac{c_1}{\kappa^2}f_{t2}] \left[\frac{\tilde{\nu}}{d} \right]^2$ is the destruction term of turbulent viscosity and $f_{t1}(\Delta q)^2$ is the trip term which is generally ignored when performing fully turbulent analysis.

2.2.2 SST k- ω turbulence model

The shear stress transport (SST) k- ω turbulence model is two-equation model and it is combination of Standard k- ω model and Standard k- ω model [20]. This turbulence model is suitable to simulate the boundary layer and complex turbulent flow field that includes unsteadiness and separation. The disadvantage of this model is difficult to converge and requires good mesh solution near the wall so; it may need high computational time and power requirement. The SST k- ω turbulence model is defined as following Equations (5) and (6).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\bar{u}_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta \rho \omega k \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\bar{u}_j \omega) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \\ &+ 2(1 - F_1)\bar{\rho}\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \alpha \frac{\omega}{k} P_k \\ &- \beta \bar{\rho} \omega^2 \end{aligned} \quad (6)$$

In Equation (5), P_k (production of turbulence) and τ_{ij} can be defined as following Equations (7) and (8).

$$P_k = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

$$\tau_{ij} = \mu_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (8)$$

The constant F_1 that is available in Equation (6) is equal to 1 for the k- ω model and it is equal to 0 for the k- ε model. Turbulent viscosity is defined as Equation (9) for SST k- ω model.

$$\nu_t = \frac{0.31k}{\max(0.31w, \Omega F_2)} \quad (9)$$

Ω and F_2 are defined by Equations (10) and (11) as follows.

$$\Omega = \left| \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right| \quad (10)$$

$$F_2 = \text{Tanh} \left\{ \left[\max \left(2 \frac{\sqrt{k}}{0.09w}, \frac{500v}{wy^2} \right) \right]^2 \right\} \quad (11)$$

2.2.3 Standard k- ε turbulence model

The Standard k- ε turbulence model (k is kinetic energy and ε is turbulent dissipation) includes two transport equations. They account for diffusion of turbulent energy and convection. The k- ε turbulence contain some immeasurable and unknown terms. Therefore, in order to obtain practical approach, the Standard k- ε model is used to minimize the unknowns and present the equations that can be used for turbulent flow [21, 22]. This model is convenient to use under strong adverse pressure gradient, recirculation and separation [23].

The turbulent kinetic energy k and the turbulent dissipation ε are defined in Equation (12) and Equation (13).

$$k = \frac{1}{2} [\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2] \quad (12)$$

$$\varepsilon = \nu_t \frac{\overline{\partial u_i \partial u_i}}{\partial x_j \partial x_j} \quad (13)$$

The standard k- ε two equations turbulence model is expressed in Equation (14) and Equation (15).

$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (14)$$

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + c_{\varepsilon 1} P_k \frac{\varepsilon}{k} - c_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (15)$$

2.2.4 Realizable k- ε turbulence model

This turbulence model shows superior performance for boundary layer with strong adverse pressure gradient, the

flow includes rotation, separation and recirculation. In addition, Realizable k-ε has an ability to capture mean flow of complex structures. The Realizable k-ε model is expressed as following Equations (16) and (17) [23, 24].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (16)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} P_b + S_\varepsilon \quad (17)$$

Where

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$$

P_k represents the generation of turbulence kinetic energy and P_b is the generation of turbulence kinetic energy.

2.2.5 RNG k-ε turbulence model

The RNG model that is developed by Yakhot et al. [25] is a mathematical technique which is utilized to derive turbulence model. This method is renormalized the Navier-Stokes equations to be able to account the effect of smaller motion. The transport equation of RNG k-ε can be expressed as following Equations (18) and (19).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (18)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k + C_{2\varepsilon}^* \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (19)$$

Where,

$$C_{2\varepsilon}^* = C_{2\varepsilon} + \frac{C_{\mu} \eta^3 (1 - \eta / \eta_0)}{1 + \beta \eta^3}$$

$$\eta = S k / \varepsilon$$

$$S = (2 S_{ij} S_{ij})^{1/2}$$

3 Geometry and mesh generation

The simplified ground body dimensions are presented in Figure 1 adapted from Ahmed et al. [1]. Geometry of the body is formed using Designmodeler in ANSYS. The solid model of Ahmed body is presented in Figure 2. In this study, the slant angle of rear face is 35° for all analysis. The selected

body is modified by applying fixed radius blend with 25 mm for the upper sides of model. In addition, the second modification is implemented by applying chamfer to the sides of rear part with 50 mm and rounded rear underside of model with radius 25 mm. The first and second modifications of model are presented in Figure 3 and Figure 4, respectively.

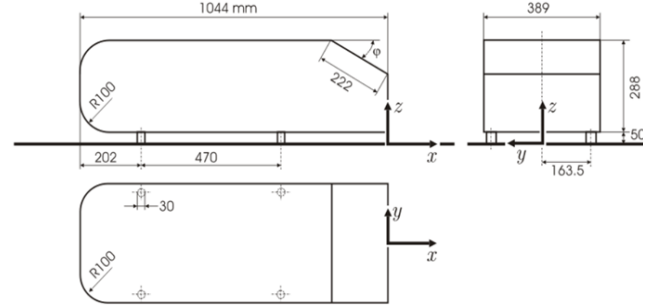
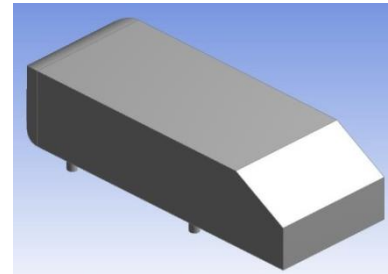
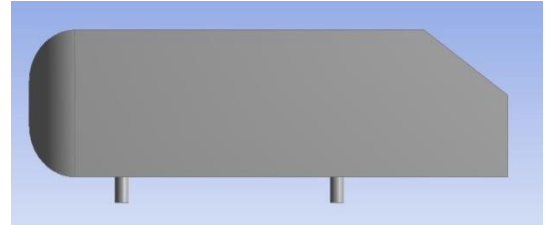


Figure 1. Ahmed body model (Dimensions are in mm) [1, 26].



(a)

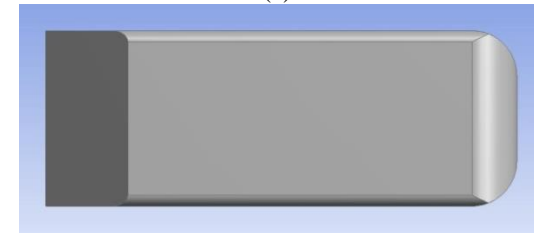


(b)

Figure 2. Solid model of Ahmed body (a: isometric view, b: side view)



(a)



(b)

Figure 3. Solid model of first modification of Ahmed body (a: side view, b: top view)

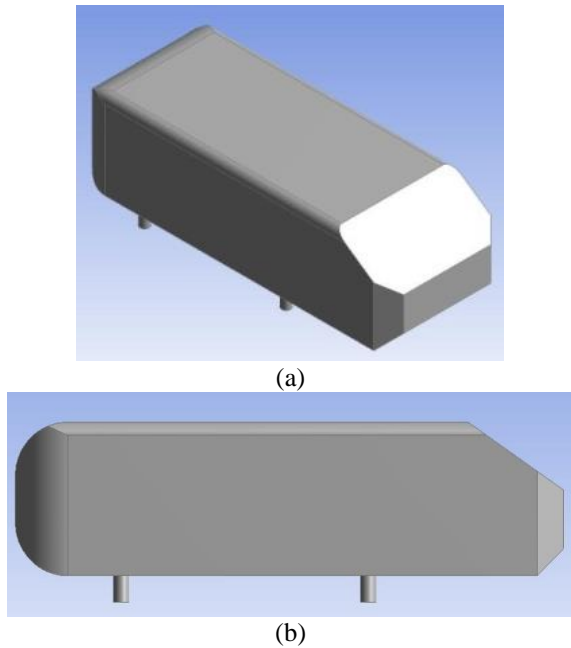


Figure 4. Solid model of second modification of Ahmed body (a: isometric view, b: side view)

Mesh generation is performed using Mesh ANSYS. The mesh process is crucial issue to obtain precision results. Solution gradients are often high in the vicinity of bodies in the external aerodynamic solutions. In order to help capture these gradients, inflation control is applied to obtain finer mesh generation for solution of boundary layer. The structured mesh is formed around the body using 20 prismatic layers and tetrahedral mesh is formed in the remaining part of the computational fluid domain. The mesh generation for body and computational fluid domain are presented in Figure 5 and 6, respectively.

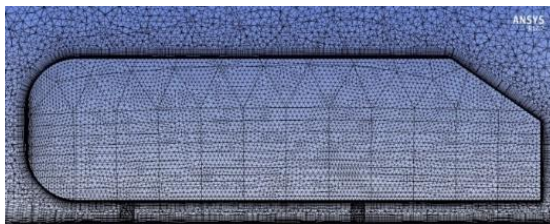


Figure 5. Mesh generation around the Ahmed Body

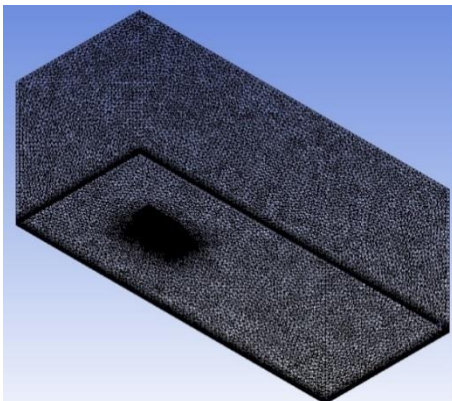


Figure 6. Mesh generation of computational domain

Mesh independency/sensitivity should be considered to find convenient mesh structure and mesh number. This process is also important in point of saving computational time and power requirement. Therefore, mesh generation is repeated eleven times for different mesh numbers that started from about 200000 up to 6 million. The drag coefficient values are investigated and it is concluded that the change of values are negligible small after mesh number is more than 2301000. The mesh independency chart versus drag coefficient is presented in Figure 7.

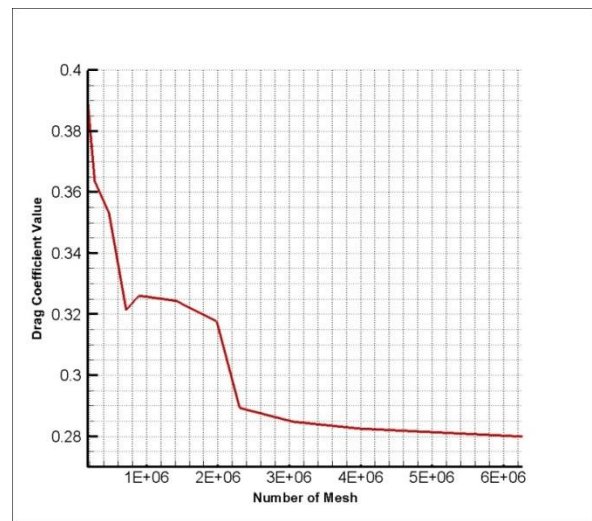


Figure 7. Mesh independency chart

4 Computational setup and boundary conditions

In this study, the CFD solution is performed using Fluent ANSYS which uses finite volume method. The Ahmed body and road is defined as wall type due to no-slip condition. The enclosure surfaces are defined as symmetry during the solution. The inlet and outlet plane are defined velocity-inlet and pressure outlet for boundary conditions, respectively. Computational fluid domain is formed as a rectangular shape and its length is 12 times of body length. The height and wide of the fluid domain are 10 times of the body height and wide, respectively. This boundary condition is more suitable in terms of saving time and power requirement.

The implicit formulation with Roe-FDS flux type is selected for solution method and second order upwind is defined for flow. The solver type is defined as density based and steady-state for computation of flow field. Courant number that is a dimensionless number represents the time a particle stays in cell of mesh and it is determined as 0.7. The wall function is selected as enhancement wall treatment that is a near wall modeling method, for Standard, Realizable and RNG $k-\epsilon$ turbulences model. The wall function is not used Spalart-Allmaras and SST $k-\omega$ turbulence model. The dimensionless wall distance value is about $y^+ \approx 1$ to capture flowfield in boundary layer. This value is greater than 1 in some place. In order to find accurate results, the flow residuals are tracked and when their values reach to 10^{-5} and

the change of aerodynamic coefficient value is smaller than 1%, the computation run is finished.

In this study, the solutions are performed at 40 m/s and Reynolds number which is based on model's length is 2.78×10^6 . Air density is $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ and dynamic viscosity is $\mu = 1.789 \times 10^{-5}$. CFD solutions are carried out using five different turbulence models for specified boundary conditions and computational set up.

5 Result and Discussion

In this study, five different turbulence models that are Spalart-Allmaras, SST k- ω , standard k- ϵ , realizable k- ϵ and RNG k- ϵ are used to simulate the flow around the Ahmed body. For this study, it can be stated that the flow is fully turbulent due to higher Reynolds number. These selected turbulence models are suitable for steady flow and simulate the fully turbulent flow regime well. The solution results show that RNG k- ϵ turbulence model gives better result when compare with experimental data reported in the literature. Drag coefficient values of CFD solutions and their differences between the experimental results and solutions are given in Table 1 for each turbulence model.

Table 1. Drag coefficient values and their differences between experimental results and solutions for each turbulence models

Turbulence Model	C _D Value	Differences (%)
Spalart-Allmaras	0.362	29.74
SST k- ω	0.3401	21.89
Standard k- ϵ	0.3283	17.67
Realizable k- ϵ	0.303	8.60
RNG k- ϵ	0.281	0.71
Experimental result [6]	0.279	-

The modifications are applied to the Ahmed model and CFD solution is repeated using RNG k- ϵ turbulence model. The first modification is rounded the upper sides of model with 25 mm fixed blend radius and the drag coefficient is reduced about 6%. The second modification is performed to apply chamber to rear sides of model and rounded the underside of rear of model. The reduction of drag coefficient level is not significantly observed when compared with first modified model. The representation of drag coefficient levels is given in Figure 8.

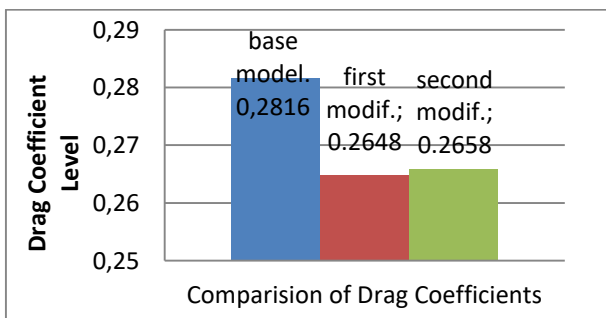


Figure 8. Comparison of drag coefficients level for base and modified models

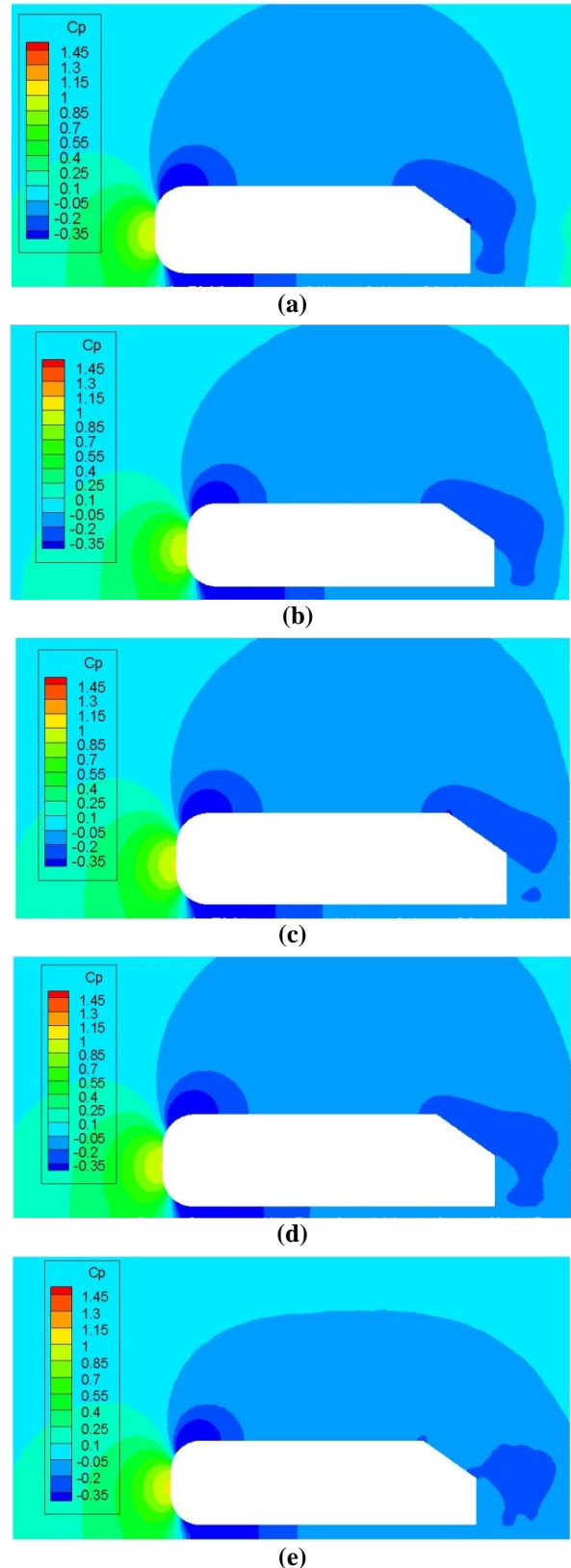


Figure 9. Pressure Coefficient Contour of Ahmed Body (a: Spalart-Allmaras, b: SST k- ω , c: Standard k- ϵ , d: Realizable k- ϵ , e: RNG k- ϵ Turbulence Models)

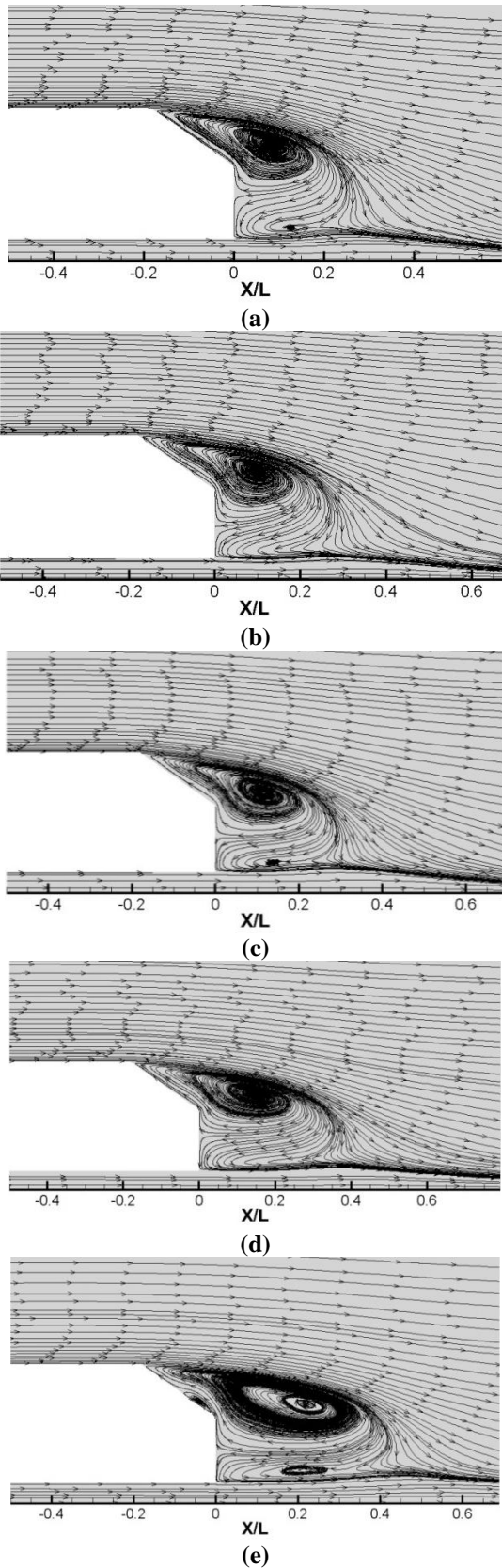


Figure 10. Velocity Streamlines of Ahmed Body (a: Spalart-Allmaras, b: SST $k-\omega$, c: Standard $k-\epsilon$, d: Realizable $k-\epsilon$, e: RNG $k-\epsilon$ Turbulence Models)

Pressure coefficient contours are presented for each turbulence model in Figures 9. When all figures are examined, it can be observed that the pressure coefficient is very low at slanted surface of rear region of model. The smallest pressure value occurs for Spalart-Allmaras turbulence model when compared with others. Therefore, it can be stated that drag coefficient value is high since pressure difference is high between the front part region and rear part region for Spalart-Allmaras model when compared with other models. It is concluded that the RNG $k-\epsilon$ turbulence model is the best simulation of flow around Ahmed body since it can capture flow field and gives the closer results when checked against the experimental data.

Velocity streamlines are also presented to show flow regime at rear region of the Ahmed model in Figures 10. The vortex forms in this region and when compared to each other, it can be observed that the vortex formation occurs further behind for RNG $k-\epsilon$ turbulence model.

The pressure coefficient contours are also presented for modified bodies. The Figure 11 shows the first modification and second modification bodies. There is no significantly difference among these two figures in point of flow characteristic. However, if these are compared with pressure coefficient contours of baseline body, it can be said that the lower pressure area is reduced and this may enable to reduce drag coefficient level. In addition, in order to reduce drag coefficient and prevent the separation of flow in the rear part region of body, it can be rounded upper part of slanted surface and added active or passive device since low pressure area separation of flow occur around the slanted surface of body. In addition, the velocity streamlines are given in a plane perpendicular the flow at the rear region of model in Figure 12. The vortex formation can be seen for the base model but not for the modified model. Hence, it can be stated that the modified model is more efficient than base model in point of aerodynamics.

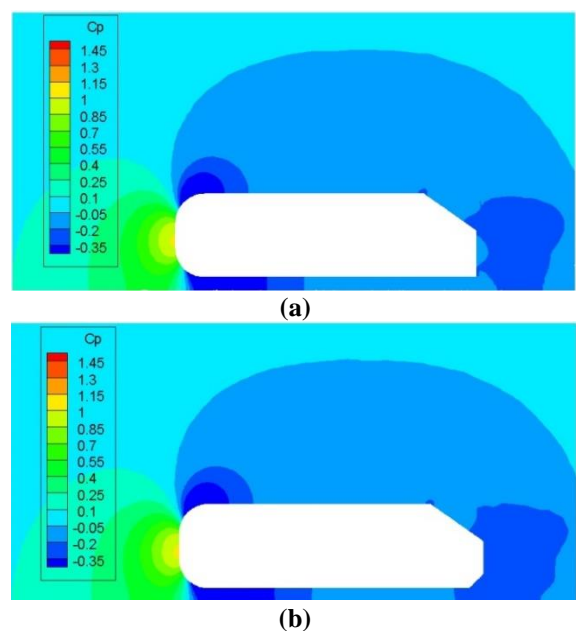


Figure 11. Pressure Coefficient values of Ahmed Body (a: First Modified body b: Second modified body)

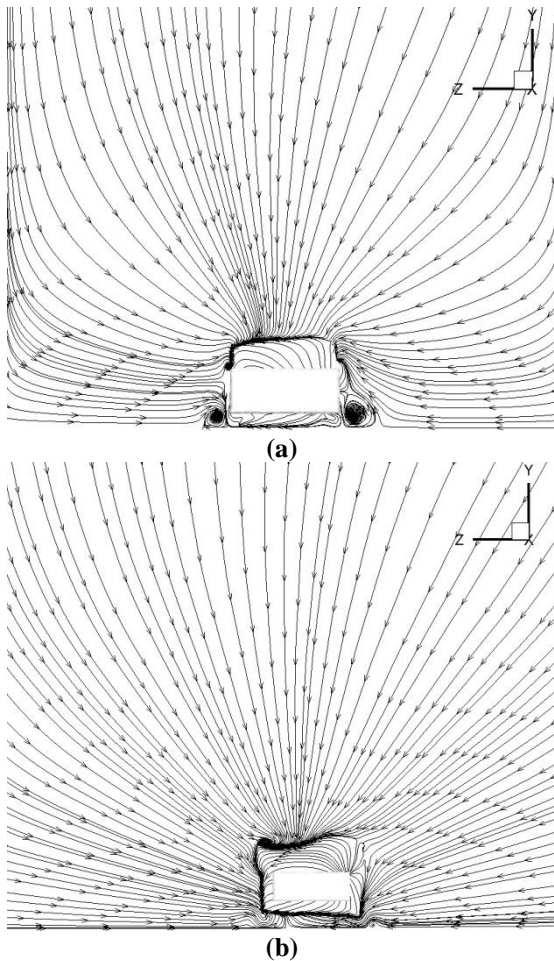


Figure 12. Velocity Streamlines at rear region of Ahmed Body (a: Base Body b: Second Modified Body)

6 Conclusion

In this study, the generic simplified ground vehicle that is called Ahmed body was investigated in terms of aerodynamic. For this, five different turbulence models were used to find which turbulence model is more suitable to simulate flow around the body. The CFD solutions were repeated for each turbulence model and checked against to experimental data. The results were showed that RNG $k-\epsilon$ turbulence model gave closer results to experimental data. In addition, the Ahmed body was modified to reduce drag coefficient. The first modification was implemented to apply fixed blend radius upper sides of body by rounding with 25 mm. The second modification was performed by applying fixed blend radius with rounded both upper sides and rear underside of body and chamfer with 50 mm was applied to rear sides of body. It was concluded that the drag coefficient reduced about 6% for first modified body. However, second modified body was not significantly observed for reduction of drag coefficient level when compared with first modification model. The table and pressure coefficient contours were presented for the turbulence models. Pressure coefficient contours and velocity streamlines were also presented to indicate differences between base and modified bodies. The further study can be performed by using passive

and active flow control devices and rounding upper side of slanted surface.

Conflict of interest

There is no conflict of interest.

Similarity index (iThenticate): %7

References

- [1] S. R. Ahmed, G. Ramm, and G. Faltin, Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake. SAE Transactions, 473-50, 1984. <https://doi.org/10.4271/840300>
- [2] S. R. Ahmed, Wake structure of typical automobile shapes. Transaction of the ASME, 162-169, 1981. <https://doi.org/10.1115/1.3240767>
- [3] S. R. Ahmed, Influence of base slant on the wake structure and drag of road vehicles. Journal of Fluid Engineering, 429-434, 1983. <https://doi.org/10.1115/1.3241024>
- [4] R. S. Khan, and S. Umale, CFD aerodynamic analysis of Ahmed body. International Journal of Engineering Trends and Technology, 18(7), 301-308, 2014. [doi:10.14445/22315381/IJETT-V18P262](https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V18P262)
- [5] C. A. Gilkeson, V. V. Toropov, H. M. Thompson, M. C. T. Wilson, N. A. Foxley, and P. H. Gaskell, Dealing with numerical noise in CFD-based design optimization. Computers and Fluids, 94, 84-97, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2014.02.004>
- [6] W. Meile, G. Brenn, A. Reppenhagen, B. Lechner, and A. Fuchs, Experiments and numerical simulations on the aerodynamics of the Ahmed body. CFD letters, 3(1), 32-39, 2011.
- [7] J. Östh, B. R. Noack, S. Krajnović, D. Barros, and J. Borée, On the need for a nonlinear subscale turbulence term in POD models as exemplified for a high-Reynolds-number flow over an Ahmed body. Journal of Fluid Mechanics, 747, 518-544, 2014. <https://doi.org/10.1017/jfm.2014.168>
- [8] R. Volpe, P. Devinant, and A. Kourta, Experimental characterization of the unsteady natural wake of the full-scale square back Ahmed body: Flow bi-stability and spectral analysis. Experiments in Fluids, 56(5), 99, 2015. <https://doi.org/10.1007/s00348-015-1972-0>
- [9] V. K. Yakkundi, and S. S. Mantha, CFD Analysis of flow over car variants and validation with Ahmed body. CURIE Journal, 3(1), 2010.
- [10] S. Thabet, and T. H. Thabit, CFD simulation of the air flow around a car model (Ahmed body). International Journal of Scientific and Research Publications, 8(7), 517-525, 2018. <http://dx.doi.org/10.29322/IJSRP.8.7.2018.p7979>
- [11] T. Tunay, E. Firat, and B. Sahin, Experimental investigation of the flow around a simplified ground vehicle under effects of the steady crosswind. International Journal of Heat and Fluid Flow, 71, 137-152, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2018.03.020>
- [12] T. Tunay, L. Drugge, and C. J. O'Reilly, On coupling methods used to simulate the dynamic characteristics of heavy ground vehicles subjected to crosswind. Journal

- of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 201, 104194, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104194>
- [13] T. Tunay, B. Sahin, and V. Ozbolat, Effects of rear slant angles on the flow characteristics of Ahmed body. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 57, 165-176, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.04.016>
- [14] B. Zafer, and F. Haskaraman, Önden ve yanal rüzgar şartı altında Ahmed cisminin sayısal incelenmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32(1), 2017. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.300613>
- [15] F. J. Bello-Millan, T. Mäkelä, L. Parras, C. Del Pino, and C. Ferrera, Experimental study on Ahmed's body drag coefficient for different yaw angles. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 157, 140-144, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.08.005>
- [16] C. Chovet, M. Feingesicht, B. Plumjeau, M. Lippert, L. Keirsbulck, F. Kerhervé, and J. M. Foucaut, Sliding mode control applied to a square-back Ahmed body. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 81, 151-164, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2019.07.010>
- [17] H. Park, J. H. Cho, J. Lee, D. H. Lee, and K. H. Kim, Aerodynamic drag reduction of Ahmed model using synthetic jet array. *SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems*, 6(2013-01-0095), 1-6, 2013. <https://doi.org/10.4271/2013-01-0095>
- [18] S. Banga, M. Zunaid, N. A. Ansari, S. Sharma, and R. S. Dungiya, CFD simulation of flow around external vehicle: Ahmed body. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 12(4), 87-94, 2015. <http://dx.doi.org/10.9790/1684-12438794>
- [19] P. R. Spalart, and S. R. Allmaras, A one-equation turbulence model for aerodynamic flows, *AIAA*, 92-0439, 1992. <https://doi.org/10.2514/6.1992-439>
- [20] F. R. Menter, Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, *AIAA journal*, 32, 1598-1605, 1994. <https://doi.org/10.2514/3.12149>
- [21] B. E. Launder, and B. I. Sharma, Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc. *Letters in heat and mass transfer*, 1(2), 131-137, 1974. [https://doi.org/10.1016/0094-4548\(74\)90150-7](https://doi.org/10.1016/0094-4548(74)90150-7)
- [22] B. E. Launder, and D. B. Spalding, The numerical computation of turbulent flows. *Numerical prediction of flow, heat transfer, turbulence and combustion* 96-116, 1983. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-030937-8.50016-7>
- [23] Fluent, A.N.S.Y.S. ANSYS Fluent 12.0 Theory Guide. ANSYS Inc., Canonsburg, PA. 2009.
- [24] D. C. Wilcox, *Turbulence modeling for CFD*. Vol. 2, 103-217, 1998. La Canada, CA: DCW industries.
- [25] V. Yakhot, S. A. Orszag, S. Thangam, T. B. Gatski, and C. G. Speziale, Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 4(7), 1510-1520, 1992. <https://doi.org/10.1063/1.858424>
- [26] C. Hinterberger, M. Garcia-Villalba, and W. Rodi, Large eddy simulation of flow around the Ahmed body. *The aerodynamics of heavy vehicles: trucks, buses, and trains*, 77-87, 2004. Springer, Berlin, Heidelberg.





Effect of attack angle on the flow around adjacent circular and rectangular prisms

Hücum açısının temas halinde dairesel ve dikdörtgen prizma etrafındaki akış üzerine etkisi

Mehmet Seyhan^{1,*} , Mustafa Sarıoğlu² , Yahya Erkan Akansu³ 

^{1,2} Karadeniz Technical University, Mechanical Engineering Department, 61080, Trabzon, Turkey

³ Niğde Ömer Halisdemir University, Mechanical Engineering Department, 51240, Niğde, Turkey

Abstract

An experimental investigation has been carried out to clarify the flow structure around adjacent circular and rectangular prisms. The measurements of hot-wire for $Re = 4.1 \times 10^3$, 9.0×10^3 and 1.5×10^4 , lift and drag force for $Re = 1.0 \times 10^4$, and in addition the flow visualization experiments for $Re = 2.3 \times 10^3$ have been performed in the range of $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$. The adjacent bodies consist of a circular cylinder having 9.5 mm diameter and a rectangular prism having 6 mm x 10 mm cross-section attached to the circular cylinder from its short side in all the cases. The hot wire measurement results showed that the Strouhal number has Reynolds number independence for $Re = 4.1 \times 10^3$, 9.0×10^3 , and 1.5×10^4 . Sudden peaks in St and lift coefficients are obtained for a similar reason that is reattachment of the separated shear layer in the vicinity of $\alpha = 60^\circ$ and 174° . For the adjacent bodies compared with the bare circular cylinder, 40%, and 25% drag reduction is obtained at $\alpha = 0^\circ$ and 174° , respectively. The obtained results show that the variations of lift coefficient, drag coefficient, and Strouhal number are strictly subjected to the attack angle.

Keywords: Adjacent bluff bodies, Circular cylinder, Rectangular prism, Vortex shedding, Drag coefficient

1 Introduction

Flow control around bluff bodies has been taken great attention by researchers due to having vital importance in daily life, industrial and aeronautics areas. Moreover, the collapse of Tacoma Narrows bridge [1] and three of eight cooling towers at the Ferrybridge [2–3] have aroused attention in order to take precaution and/or solve this problem that is resulting in aerodynamic phenomena such as vortex shedding producing periodic lift and drag force. Basic problems of bluff bodies, such as circular [4–7] and square cylinder [8–11], have been extensively studied in the literature. Vortex shedding is well known for these cases, but this type of bluff body is generally not found alone in real life cases. Therefore, in order to better elucidate flow structure around multiple bluff bodies configuration such as two or more side by side [3–12–14], tandem [15–17],

Özet

Temas halindeki dairesel ve dikdörtgen prizmalar etrafındaki akış yapısını aydınlatmak için deneysel bir araştırma yapılmıştır. $Re = 4.1 \times 10^3$, 9.0×10^3 ve 1.5×10^4 için kızgın telle hız, $Re = 1.0 \times 10^4$ için kaldırma ve sürüklenme kuvveti ölçümleri ve ayrıca $Re = 2.3 \times 10^3$ için akış görüntüleme deneyleri $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ aralığında gerçekleştirilmiştir. Temas halindeki cisimler, 6 mm x 10mm kesite sahip dikdörtgen bir prizma ile 9.5mm çapına sahip dairesel bir silindirden oluşmaktadır. Kızgın tel ölçüm sonuçları, Strouhal sayısının $Re = 4.1 \times 10^3$, 9.0×10^3 ve 1.5×10^4 sayıları için Reynolds sayısından bağımsız olduğunu göstermiştir. Kaldırma ve Strouhal sayılarındaki ani pikler akış ayrılma tabakasının $\alpha = 60^\circ$ ve 174° civarında yeniden tutunmasıyla ilgili aynı nedenden kaynaklanmaktadır. Temas halindeki cisimler ile sade silindir karşılaştırıldığında sürüklenme katsayısı $\alpha = 0^\circ$ ve 174° 'de sırasıyla %40 ve %25 azaltılmıştır. Elde edilen sonuçlar, kaldırma, sürüklenme katsayısı ve Strouhal sayısı değişimlerinin hücum açısına bağlı olduğunu göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Temas halindeki cisimler, Dairesel silindir, Dikdörtgen prizma, Sürüklenme katsayısı, Strouhal sayısı

staggered [18–21], and combined [22–23] cylinders, the available literature related to this type of bluff bodies will be summarized.

Bearman and Wadcock [24] clarified the flow structure around two circular cylinders, arranged side by side at $Re = 2.5 \times 10^4$. They also conducted surface pressure measurements to detect the pressure distribution around these cylinders and hot wire measurements to detect the vortex shedding frequency. When the distance between these cylinders is very small, its drag coefficient is less than that of the bare cylinder due to the base bleed. They also showed that the cylinders developed two vortex streets while the gap is bigger than 1d. For side by side circular cylinders, flow measurement experiment was researched by Alam and Zhou [12] at a Reynolds number of 4.7×10^4 . They measured the pressure distribution around these circular cylinders at

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mehmetseyhan@ktu.edu.tr (M. Seyhan)

Geliş / Received: 10.03.2021 Kabul / Accepted: 16.06.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.894558

$T/d=0.1$ and 0.2 . Surface oil flow visualization was implemented to obtain flow structure around these cylinders such as flow separation, reattachment, and stagnation point. Yen and Liu [14] experimentally investigated the flow structure around the square cylinder at $2262 < Re < 28000$ in order to show the pressure distribution and vortex shedding frequency. They also separated the flow structure into three modes that are single, gap-flow, and couple vortex shedding modes to observe it by using the smoke wire flow visualization method. In the couple vortex shedding mode, they obtained two vortex streets as gap spacing between these cylinders (g) is about bigger than 12. In the gap-flow mode, minimum drag coefficient (C_D) is obtained because of base bleeds with a similar reason to that observed at $g=1$ by Bearman and Wadcock [24]. The maximum C_D is observed at $g=0$ for the single-mode. Alam and Zhou [13] researched the wake flow structure behind two side-by-side square cylinders with the help of the dye flow visualization method at $Re=300$. They showed that the wake flow structure, based on the distance between cylinders, can be changed.

Force and hot-wire measurements and flow visualization experiments on two tandem circular cylinders having different diameters had been made by Alam and Zhou [25]. The results showed that the time-averaged drag on the downstream cylinder increased as the diameter ratio of the upstream and downstream cylinders was decreased. Xu and Zhou [26] especially focused on the Strouhal number, which is calculated from vortex shedding frequencies measuring via hot wire anemometer, at the wake of two tandem circular cylinder. They elucidated that the Strouhal number strictly was based on both L/d changing between 1 -15 and Re changing between $800 - 4.2 \times 10^4$. Alam and Sakamoto [20] measured the variation of the Strouhal number of a square and circular cylinder which are different arrangement such as tandem and staggered having a different angle and also analyzed it by using a wavelet transform method. The Flow structure around two circular cylinders arranged staggered was reported by Hu and Zhou [18] with the help of a hot wire anemometer, LIV and PIV methods. They also indicated that four different flow structures were aroused related to L/d and angle of incidence (α). Zhou *et al.* [21] investigated effects of Re (changing between 1.5×10^4 and 2×10^4), L/d (varied between 1.2 and 4) and $\alpha=0^\circ-90^\circ$ on the flow structure around two staggered circular cylinders. They also indicated that four different relationships between $St-Re$ were obtained dependent on L/d and α .

Yavuz *et al.* [23] investigated the effect of both two adjacent circular cylinders, and adjacent square and circular cylinder, rotating between 0° and 180° on vortex shedding frequencies. They indicated that change in St for these cases at the range between $0^\circ-150^\circ$ widely was independent on Reynolds number. In the study of Fleck [22], an experimental investigation of the effect of Re (ranging from 10^4 to 5×10^4) and α (changing between 0° and 180°) on the adjacent circular cylinder and rectangular, attached to the circular cylinder from its long side, was implemented. He also inspired from telephone drop wire to use as a test model.

The results showed that change in St was independent on Re for some specific angle of incidence.

According to the summarized literature above, there have been many studies having different arrangements, such as side by side, tandem, staggered, for two circular/square cylinder or circular and square cylinder configuration. But the available studies in the flow structure around adjacent circular and rectangular cylinders are very limited. This study extends studies related to the flow around the adjacent bodies performed by Yavuz *et al.* [23] and Fleck [22] to provide a different insight into the flow around the adjacent bodies consisting of a circular cylinder and rectangular cylinders. The purpose of the present study is to investigate the flow structure around the adjacent circular and rectangular cylinders capable of rotating between 0° and 180° . For this purpose, the effects of the angle of incidence for three different Reynolds number were investigated by using hot-wire anemometer. Force measurement experiments were also carried out with the help of a load cell for $Re = 1 \times 10^4$.

2 Material and method

For this study, the experiments for the force measurement and the flow visualization are conducted in a suction type wind tunnel having a test section of $570 \text{ mm} \times 570 \text{ mm}$ (WT1) in the Aerodynamics Research Laboratory (ARL) of Ömer Halisdemir University. Hot wire measurement experiments were also carried out in an open type of wind tunnel. This tunnel being in the Mechanical Engineering department at Karadeniz Technical University has a test section of $457 \text{ mm} \times 457 \text{ mm}$ (WT2). For both wind tunnels, the turbulent intensity is less than 1%. The working sections of the tunnels have a divergence angle to obtain a uniform static pressure and compensate growing of the boundary layer along the longitudinal direction.

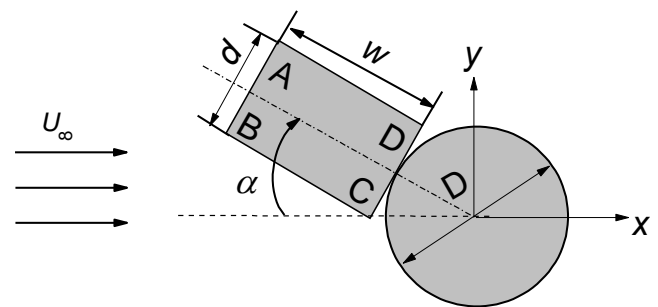


Figure 1. Test model geometries and coordinate system

As shown in Figure 1, the test model composes of two parts: the first one is a main circular cylinder having 9.5 mm diameter and the second one is a rectangular cylinder, having a 6 mm x 10 mm cross-section, attached in all cases to the circular cylinder from its short side. In order to detect the vortex shedding frequency from these bluff bodies, the side of the rectangular cylinder and the diameter of the circular cylinder having been chosen as 6 mm and 9.5 mm, respectively, while the adjacent bodies stand alone in air flow. The length of the test model for each tunnel is equal to the width of the tunnel test section due to the usage of two

different wind tunnels. They also spanned along the entire width of the test section.

The rectangular cylinder was machined with sharp edges. The blockage ratios of the adjacent bodies are 4.3 % for the WP2 at $\alpha = 78^\circ$ and 102° and 3.47 % for the WP1 at $\alpha = 78$ and 102° . For two models having different maximum blockage ratios of 6.3% and 12.6%, Sarioğlu et al. [27] showed that while the solid blockage has a small effect on the Strouhal number, geometric change with the attack angle has an important effect on the flow around a square prism with a plate. In the present study, the maximum blockage ratios of the model for each tunnel are smaller than 4.3 % and therefore it is not necessary to correct the blockage effects. The model has a maximum projection height of D' and a minimum aspect ratio for this case is 23.5. According to the suggestion of Wei and Chang [28], our test model can be accepted as a 2-dimensional model at this ratio.

A 3D schematic view consisting of a force and a hot-wire experimental setup, as shown in Figure 2, includes a test model, a load cell, a rotary unit, the test section, TSI IFA100 CTA, two hot-wire probe, a pitot-static tube, a micromanometer, a traverse control unit, a computer and A/D acquisition board. The test model was centered and mounted vertically in the test section. The test model was attached to a computer controlled rotary unit so as to rotate it clockwise direction between $\alpha = 0^\circ$ and 180° with an increment of 3° . For $Re=1.0 \times 10^4$, the force measurements were implemented by using a six component ATI Gamma DAQ F/T model load cell which is connected to the rotary unit. The data of drag and lift forces were acquired at a sample rate of 1000 Hz by means of NI PCIe-6323 DAQ card. For each measurement, 20000 data were collected, and the measurement duration was obtained during 20s. By averaging the measured data, mean drag and lift coefficients were calculated. For the flow visualization experiment, the test model and the rotary unit were horizontally mounted and rotated clockwise direction between $\alpha = 0^\circ$ and 180° with an increment of 15° in this test section for Reynolds number of 2.3×10^3 . For the hot wire measurement experiments, the adjacent model was centrally placed in the test section and rotated counterclockwise direction between $\alpha = 0^\circ$ and $\alpha = 180^\circ$ with 3-degrees increments. Vortex shedding from the adjacent model is detected by means of a TSI IFA 100 model constant temperature anemometer (CTA) using two hot-wire probes. More information about velocity measurement setup can be found in Yavuz et al. [23] and Sarioğlu et al. [27]. For $Re=4.1 \times 10^3$, 9.0×10^3 and 1.5×10^4 , vortex shedding frequency from velocity measurements were determined by using Fast Fourier Transform (FFT). The probes locations, that are $x/D=5$ and 15 , $y/D = \pm 2.5$ in the downstream of the body, are similar to the study of Yavuz et al. [23]. The velocity measurement data were collected as 4096 at a sampling frequency of 4 kHz.

The uncertainty of velocity measurements was calculated as $\pm 3\%$. Moreover, the uncertainties in calculation of the Strouhal number and the vortex shedding frequency spectra are less than $\pm 3.3\%$ and $\pm 0.5\%$, respectively. The

uncertainties of drag and lift coefficients were calculated as 6.7% and 8.8%, respectively.

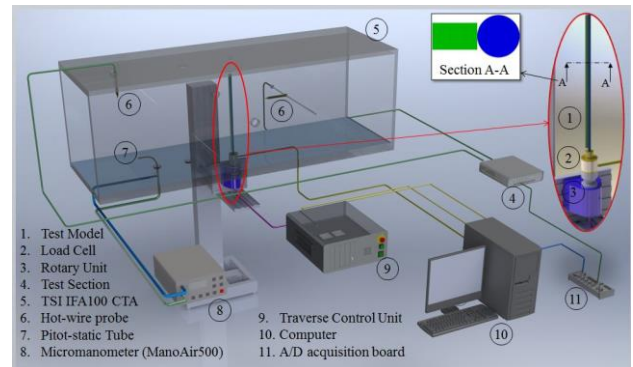


Figure 2. 3D schematic view of force and hot-wire experimental setup

3 Results and discussion

The vortex shedding around the adjacent test model was examined for $Re = 4.1 \times 10^3$, 9.0×10^3 and 1.5×10^4 . Spectral density of velocity fluctuations behind the model is given in Figure 3 for $Re = 9 \times 10^3$ at the angle of 30° . The dominant peak vortex shedding frequency is obtained as $f = 130$ Hz from the test model. The St , based on D , and St' , based on D' , denote the Strouhal numbers. D' is projected height of the adjacent model. D' used to reflect the scaling effect changing with attack angle and show the difference between D and D' that are utilized in calculation of Strouhal number.

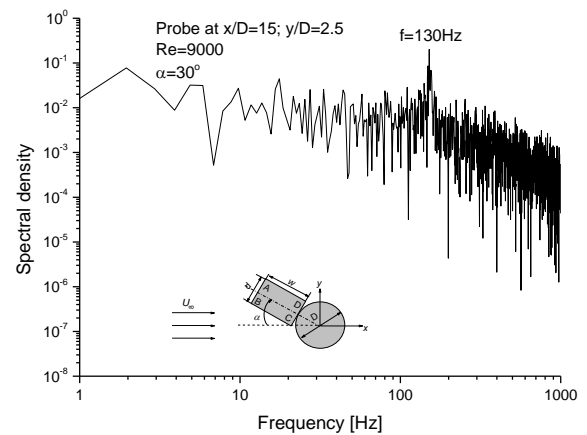


Figure 3. Spectral density of velocity fluctuations behind the model at $\alpha=30^\circ$ for $Re = 9.0 \times 10^3$.

Strouhal numbers, based on D , versus attack angle for $Re = 4.1 \times 10^3$, 9.0×10^3 and 1.5×10^4 are given in Figure 4. This figure showed that the Strouhal number markedly change with the variation of the attack angle. Strouhal number abruptly diminishes in $0^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$ because the separated shear layer from the corner A of the rectangular cylinder shifts over the main cylinder and a wider wake region occurs. Due to the flow separation at sharp corners, Reynolds number has no significant influence on the Strouhal number. But, in the case of flow separation from the main circular cylinder at $\alpha = 171^\circ$, the value of attack angle at maximum

Strouhal number shifts with increasing Reynolds number. Maximum St is obtained as 0.24 at $\alpha = 174^\circ$ for $Re = 1.5 \times 10^4$. According to this figure, the change in St at $\alpha = 0^\circ - 180^\circ$ is widely independent from Reynolds number for $Re = 9.0 \times 10^3$ and 1.5×10^4 . Moreover, independence of $St-Re$ relationship is clearly seen for all Re at $\alpha = 0^\circ - 171^\circ$. This Reynolds independence was indicated that the flow structure around the adjacent circular and rectangular prism was not changed with increasing Reynolds number from 4.1×10^3 to 1.5×10^4 at nearly whole angle of attacks.

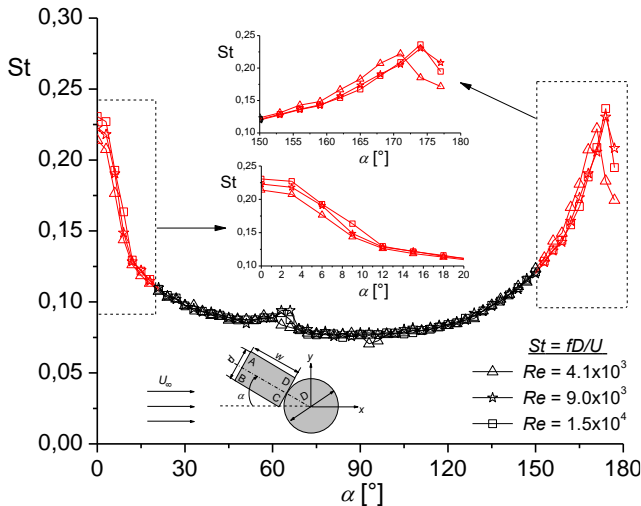


Figure 4. Strouhal number based on D vs attack angle.

Figure 5 shows the variation of St' , based on D' , versus the attack angle. For $\alpha = 0^\circ$, maximum St' is obtained because the separated shear layer from corner A and B reattach again on both the lower and upper side of the main cylinder. As the angle of incidence increases up to $\alpha = 9^\circ$, a sharp decrease in the St' is a cause of change in reattachment point and the separated shear layer from the corner A passes over the adjacent model without reattachment. The St' gradually increases in the range 12° to 60° for all Re . Peak value of the St' is obtained at 60° for $Re = 4.1 \times 10^3$, 63° for $Re = 1.5 \times 10^4$ and 66° for $Re = 9.0 \times 10^3$ because, the shear layers separated from corner B reattach near corner A. In the next angle for aforementioned each case, the reattachment of the separated shear layer finishes and, therefore, a sudden drop in St' is seen. There is a significant peak in St' which is associated with reattachment of the separated shear layer from the main cylinder at 168° for $Re = 4.1 \times 10^3$ and 174° for $Re = 9.0 \times 10^3$ and 1.5×10^4 . After these angles, there is a significant decrease in St' that is related to the disappearance of this reattachment.

Figure 6 shows a comparison of the Strouhal numbers (St') of the present study with together of those of Fleck [22] and Yavuz et al [23]. Fleck [22] used an adjacent model consisting of a circular cylinder and rectangular, attached to the circular cylinder from its long side by acquiring vortex shedding frequency at $0^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$ with an increment of 22.5° . St' results of Fleck [22] is considerably coarse but present study results indicate the similar variation between

90° and 157.5° at $Re = 2 \times 10^4$. Yavuz et al [23] investigated the variation of Strouhal number of an adjacent model consisting of circular and square cylinder. Their results strikingly showed similar variation with the present study.

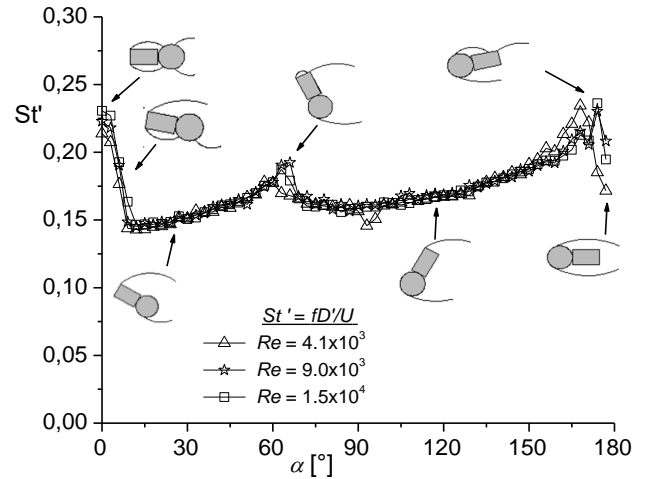


Figure 5. Strouhal number (St') based on D' vs attack angle.

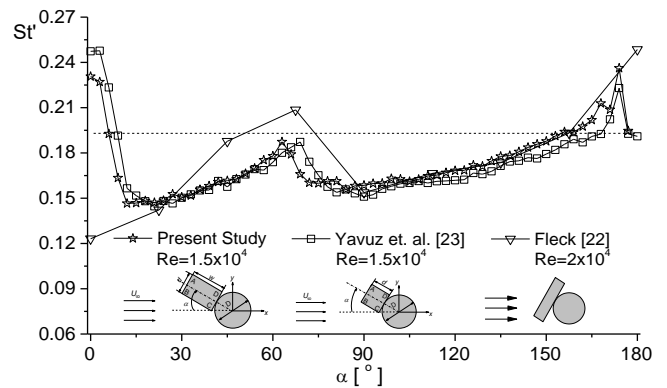


Figure 6. Comparison of Strouhal numbers with the studies of Yavuz et al. [23] and Fleck [22].

C_D based on D and $C_{D'}$ based on D' denote the drag coefficients. Comparison of the drag coefficients is plotted in Figure 7 as a function of the angle of incidence between 0° and 180° . In the range $0^\circ \leq \alpha \leq 9^\circ$ and $171^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$, the drag coefficient for C_D and $C_{D'}$ has the same value due to having the same projected area of the adjacent bodies. For the adjacent bodies compared with the circular cylinder alone, 40% drag reduction is obtained at $\alpha = 0^\circ$. Drag coefficient abruptly goes up with increasing the attack angle up to 51° for C_D and 36° for $C_{D'}$ because of the increase in the wake width. $C_{D'}$ slightly starts to decrease at 36° and continue to decrease until 63° . The value of $C_{D'}$ at 63° is the minimum value due to the reattachment near to the corner A. C_D shows the same trend with $C_{D'}$ in the range $51^\circ \leq \alpha \leq 63^\circ$. After this angle, there is a sudden increase in both C_D and $C_{D'}$ because the reattachment of the separated shear layer disappears and the wake width becomes larger. C_D and $C_{D'}$ slightly increase in the range $69^\circ \leq \alpha \leq 84^\circ$ and $69^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ respectively. The maximum drag coefficient is obtained

as 3.68 for C_D at 84° and 1.78 for $C_{D'}$ at 90° . Drag coefficient abruptly decreases with increasing of the angle of incidence between 90° and 168° associated with a decrease in the wake width behind the model. $C_{D'}$ for the range $0^\circ \leq \alpha \leq 7.5^\circ$ and $153^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$, and C_D for the range $0^\circ \leq \alpha \leq 7.5^\circ$ and $165^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ is smaller than that of the circular cylinder alone. For the adjacent bodies compared with the circular cylinder alone, 25% drag reduction is obtained because of the flow reattachment at $\alpha = 174^\circ$.

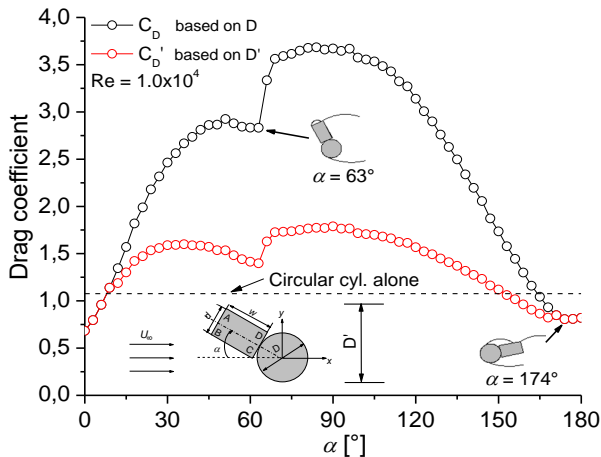


Figure 7. Variation of drag coefficient, based on D and D' , as a function of angle of incidence.

C_L based on D and $C_{L'}$ based on H' denote the lift coefficients. The variation of the lift coefficients is plotted in Figure 8 as a function of the angle of incidence between 0° and 180° . At $\alpha = 0^\circ$, the lift coefficient is nearly obtained as 0 because of having the same flow structure in the upper and lower side of the test model. In the range $3^\circ \leq \alpha \leq 9^\circ$, there is little fluctuation in the lift coefficient that is attributed to the disappearance of reattachment of the separated shear layer. The maximum lift coefficient is obtained as 1.5 for C_L at $\alpha = 24^\circ$ and 0.86 for $C_{L'}$ at $\alpha = 60^\circ$. There is a sudden increase in C_L and $C_{L'}$ between 9° and 24° because pressure differences between lower (high pressure) and upper surfaces (low pressure) of the model increase. At $\alpha = 48^\circ$, the separated shear layer from the corner B slightly starts to approach towards corner A and later reattaches at $\alpha = 60^\circ$ (As seen in Figure 8). After this angle ($\alpha = 60^\circ$), the lift coefficient sharply decreases up to 135° for C_L and 120° for $C_{L'}$ owing to an increasing in surface pressure at the upper side of the model. The minimum lift coefficient is obtained as -2.12 for C_L at $\alpha = 135^\circ$ and -1.25 for $C_{L'}$ at $\alpha = 120^\circ$. After these angles, the lift coefficients start to increase, which is attributed to the decrease in the wake width behind the model and the increase in pressure on the lower side of the model, up to 174° . At $\alpha = 174^\circ$, the lift coefficient reaches again a peak value for C_L and $C_{L'}$ because of a reattachment near the corner B on the BC surface. At $\alpha = 180^\circ$, lift coefficients is obtained nearly as 0 value resulting in pressure balance between the upper and lower side of the test model.

As shown in Figure 9, the flow visualization experiments were conducted at $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ with an increment of 15° for $Re = 2.3 \times 10^3$ to elucidate the flow structure around the adjacent model.

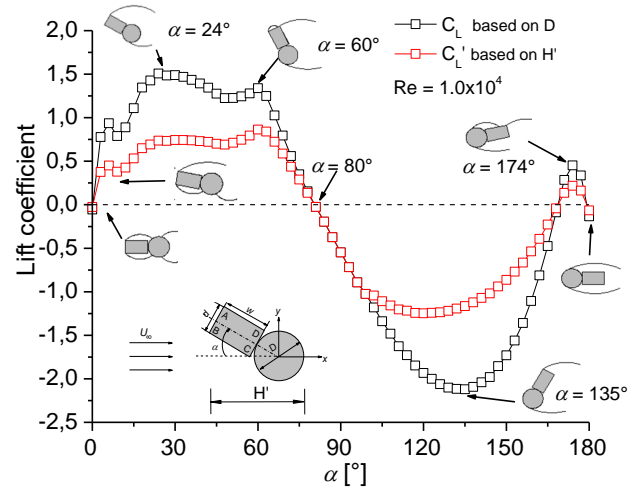


Figure 8. Variation of lift coefficient, based on D and H' , as a function of angle of incidence.

Flow phenomena such as stagnation point, flow separation, flow attachment, and reattachment are clearly shown in this figure. At $\alpha = 0^\circ$, the incoming flow separates into two sides, that is up and down-side of the model, from the stagnation point in the front of the face AB of the rectangular cylinder, and later the flows separate from the corner A and B. These separated shear layers reattach on both sides of the main cylinder. Shear layers separated two times from the rectangular and the main cylinders, respectively, produce both smaller vortices and the narrower wake behind the model. This also explains why the St and the St' have the higher values shown in Figures 4 and 5, respectively. At $\alpha = 15^\circ$, reattachment does not occur, therefore the wake region starts to enlarge. Wake width behind the model increases up to 90° . In the range $0^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$, the stagnation point, where the maximum pressure occurs, is in the middle of the AB surface and later it moves towards the corner B up to 45° . At $\alpha = 60^\circ$, the stagnation point occurs on the BC surface, and the shear layer separated from corner B attaches at corner A. Therefore, in relation to this reattachment, there is a sudden increase in St' for $Re = 1.5 \times 10^4$ at 63° , in C_L and $C_{L'}$ for $Re = 1.0 \times 10^4$ at 60° and also a sudden decrease in C_D and $C_{D'}$ for $Re = 1.0 \times 10^4$ at 63° . The wake width increases while the stagnation point shifts from corner B to corner C in the range $45^\circ < \alpha \leq 90^\circ$. At $\alpha = 90^\circ$, the wake is bigger than that of the other angles, and, therefore, the maximum $C_{D'}$, that can be seen from Figure 7, is obtained 1.78 at this angle. After this angle, the wake width starts to decrease with increasing α that brought about a decrease in C_D and $C_{D'}$ (Figure 7). The stagnation point occurs over the main cylinder at $\alpha = 105^\circ$ and shift towards downside of it up to 180° .

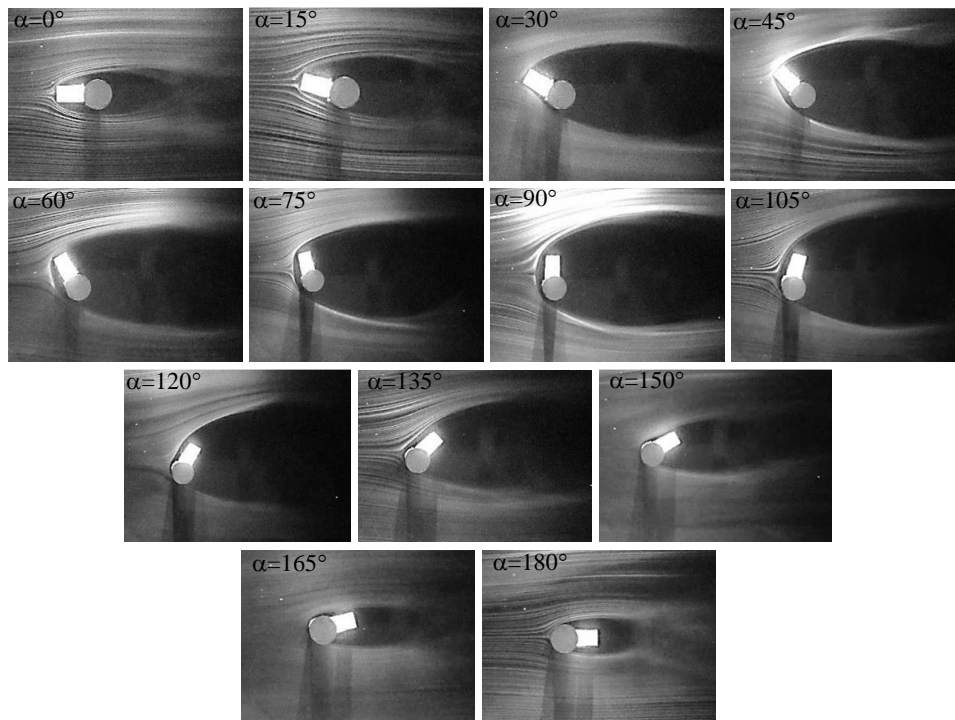


Figure 9. The Smoke-wire flow visualization of the flow around the model at $Re = 2.3 \times 10^3$.

4 Conclusions

An experimental investigation is conducted to investigate flow structure around the adjacent circular and rectangular cylinders. The measurements of the hot wire for $Re = 4.1 \times 10^3$, 9.0×10^3 , and 1.5×10^4 , the lift and drag forces for $Re = 1.0 \times 10^4$, and the flow visualization for $Re = 2.3 \times 10^3$ have performed in the range of $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$. The remarkable findings for the flow around the adjacent circular and rectangular cylinders are summarized as follow:

- The results of the hot wire measurements show that Strouhal number has Reynolds number independence for $Re = 9.0 \times 10^3$ and 1.5×10^4 . Moreover, there is an independence of $St-Re$ relationship for all Reynolds number at $\alpha = 0^\circ - 171^\circ$.
- The St' , based on D' , provides better insight into the effect of flow phenomena such as flow separation, flow reattachment than the St , based on D because St' considers the exact projected height of the adjacent bodies.
- For the adjacent bodies compared with the circular cylinder alone, 40% drag reduction is obtained at $\alpha = 0^\circ$. CD' for the range $0^\circ \leq \alpha \leq 7.5^\circ$ and $153^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$, and C_D for the range $0^\circ \leq \alpha \leq 7.5^\circ$ and $165^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ are smaller than that of the circular cylinder alone.
- The obtained results indicate that the variations of the Strouhal number, lift coefficient, and drag coefficient are strictly based on the attack angle.

Conflicts of interest

No conflict of interest was declared by the authors.

Benzerlik oranı (iThenticate): %14

References

- [1] K. Y. Billah and R. H. Scanlan, Resonance, Tacoma Narrows bridge failure, and undergraduate physics textbooks. *American Journal of Physics*, 59, 118–124, 1991. <https://doi.org/10.1119/1.16590>.
- [2] A. C. Khanduri, T. Stathopoulos and C. Bédard, Wind-induced interference effects on buildings — a review of the state-of-the-art. *Engineering Structures*, 20 617–630, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)00066-7](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00066-7).
- [3] P. Burattini and A. Agrawal, Wake interaction between two side-by-side square cylinders in channel flow. *Computers & Fluids*, 77, 134–142, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2013.02.014>.
- [4] A. Roshko, Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number. *Journal of Fluid Mechanics*, 10, 345–356, 1961. <https://doi.org/10.1017/S0022112061000950>
- [5] Y. Bao and J. Tao, The passive control of wake flow behind a circular cylinder by parallel dual plates. *Journal of Fluids and Structures*, 37, 201–219, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2012.11.002>.
- [6] S. Shukla, R. N. Govardhan and J. H. Arakeri, Flow over a cylinder with a hinged-splitter plate. *Journal of Fluids and Structures*, 25, 713–720, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2008.11.004>.
- [7] E. A. Anderson and A. A. Szewczyk, Effects of a splitter plate on the near wake of a circular cylinder in 2 and 3-dimensional flow configurations. *Experiments in Fluids*, 23, 161–174, 1997. <https://doi.org/10.1007/s003480050098>.

- [8] T. Igarashi, Drag reduction of a square prism by flow control using a small rod. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 69,141–153, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(97\)00150-5](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(97)00150-5)
- [9] M. Sarioğlu, Y. E. Akansu and T. Yavuz, Flow Around Rotatable Square Cylinder-Plate Body. *AIAA Journal*, 44, 1065–1072, 2006. <https://doi.org/10.2514/1.18069>.
- [10] J. M. Chen and C. H. Liu, Vortex shedding and surface pressures on a square cylinder at incidence to a uniform air stream. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 20, 592–597, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0142-727X\(99\)00047-8](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(99)00047-8).
- [11] B. E. Lee, The effect of turbulence on the surface pressure field of a square prism. *Journal of Fluid Mechanics*, 69, 263–282, 1975.
- [12] M. M. Alam and Y. Zhou, Flow around two side-by-side closely spaced circular cylinders. *Journal of Fluids and Structures*, 23, 799–805, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2006.12.002>.
- [13] M. M. Alam and Y. Zhou, Intrinsic features of flow around two side-by-side square cylinders. *Physics of Fluids*, 25, 085106, 2013. <https://doi.org/10.1063/1.4817670>.
- [14] S. C. Yen and J. H. Liu, Wake flow behind two side-by-side square cylinders. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 32, 41–51, 2011. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2010.09.005>.
- [15] D. Chatterjee and S. Amiroudine, Two-dimensional mixed convection heat transfer from confined tandem square cylinders in cross-flow at low Reynolds numbers. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37, 7–16, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.10.007>.
- [16] T. Zheng, S. K. Tang, B. Fei, C. Kung, T.-T. Liao, K.-H. Tseng, K.-Y. Chen, M.-S. Chuang, K. Zarei and A. Y. Goharrizi, On the forces and strouhal numbers in the low reynolds number wakes of two cylinders in tandem. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, 33 349 (2009). <https://doi.org/10.1139/tcsme-2009-0025>.
- [17] A. Sohankar and A. Etminan, Forced-convection heat transfer from tandem square cylinders in cross flow at low Reynolds numbers. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 60, 733–751, 2009. <https://doi.org/10.1002/flid.1909>.
- [18] J. C. Hu and Y. Zhou, Flow structure behind two staggered circular cylinders. Part 1. Downstream evolution and classification. *Journal of Fluid Mechanics*, 607, 51–80, 2008. <https://doi.org/10.1017/S0022112008001808>.
- [19] J. C. Hu and Y. Zhou, Flow structure behind two staggered circular cylinders. Part 2. Heat and momentum transport. *Journal of Fluid Mechanics*, 607, 81–107, 2008. <https://doi.org/10.1017/S0022112008001808>.
- [20] M. M. Alam and H. Sakamoto, Investigation of Strouhal frequencies of two staggered bluff bodies and detection of multistable flow by wavelets. *Journal of Fluids and Structures*, 20, 425–449, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2004.11.003>.
- [21] Y. Zhou, S. X. Feng, M. M. Alam, and H. L. Bai, Reynolds number effect on the wake of two staggered cylinders. *Physics of Fluids*, 21, 125105, 2009. <https://doi.org/10.1063/1.3275846>.
- [22] B. A. Fleck, Strouhal numbers for flow past a combined circular-rectangular prism. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 89, 751–755, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(00\)00087-8](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(00)00087-8).
- [23] T. Yavuz, Y. E. Akansu, M. SARIOĞLU and M. Özmert, Vortex Shedding on Combined Bodies at Incidence to a Uniform Air Stream. *Proceedings of World Academy of Science Engineering and Technology*, 41, 1095–1099, 2009.
- [24] P. W. Bearman and A. J. Wadcock, The interaction between a pair of circular cylinders normal to a stream. *Journal of Fluid Mechanics*, 61 499 (1973). <https://doi.org/10.1017/S0022112073000832>.
- [25] M. M. Alam and Y. Zhou, Strouhal numbers, forces and flow structures around two tandem cylinders of different diameters. *Journal of Fluids and Structures*, 24, 505–526, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2007.10.001>.
- [26] G. Xu and Y. Zhou, Strouhal numbers in the wake of two inline cylinders. *Experiments in Fluids*, 37, 248–256, 2004. <https://doi.org/10.1007/s00348-004-0808-0>.
- [27] M. Sarioğlu, Y. E. Akansu and T. Yavuz, Flow around a rotatable square cylinder-plate body. *AIAA journal*, 44, 1065–1072, 2006. <https://doi.org/10.2514/1.18069>.
- [28] C.-Y. Wei and J.R. Chang, Wake and base-bleed flow downstream of bluff bodies with different geometry. *Experimental thermal and fluid science*, 26, 39–52, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0894-1777\(02\)00111-5](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(02)00111-5)





Electrospun polyvinylpyrrolidone / graphite composite nanofiber mats: Effect of the filler on the morphology and wettability

Elektroçirilmiş polivinilpirolidon / grafit kompozit nanofiber keçeler: Katkının morfoloji ve ıslanabilirlik üzerine etkisi

Şerife Akkoyun^{1,*} 

¹ Ankara Yıldırım Beyazıt University, Department of Metallurgical and Materials Engineering, 06010, Ankara, Turkey

Abstract

The aim of this study is to investigate the effect of graphite (GR) content on the morphology and wettability of polyvinylpyrrolidone (PVP) / GR composite nanofibers. For this purpose, PVP and PVP/GR composite nanofiber mats of various filler contents (0.6%, 1.2%, 1.8%, 2.4%, 3%, 3.6% and 4.2 % of GR (wt.% of PVP)) were fabricated by electrospinning. The morphology and diameters of the nanofibers were characterized by SEM. Average diameters of 218 nm for unfilled PVP nanofibers and between 170 nm and 203 nm for composite nanofibers were observed. The water wettability of the nanofiber mats was also characterized by contact angle measurements. Contrary to expectations, the results reveal an increase in the water wettability of composite PVP nanofiber mats with increasing graphite content. This evolution seems to be based on the mild hydrophilicity of graphite discovered in recent years. The relationship with nanofibers' electrical conductivity was also examined.

Keywords: Electrospinning, Polyvinylpyrrolidone, Graphite, Nanofibers, Wettability

1 Introduction

Due to their high surface area-to-volume ratio and high porosity, polymer nanofibers are attractive materials for a wide range of applications spanning from energy storage to biomedical applications [1]. A straightforward and cost-effective process available for the production of polymer nanofibers is electrospinning. This method allows a large-scale production of continuous nanofibers from different types of polymers [2]. The principle of this technique is quite easy. It requires a high voltage power supply, a syringe pump, a metallic collector and a polymer solution. Basically, the polymer solution is introduced into a syringe equipped with a metallic needle and pumped through a grounded metallic collector. When a high voltage is applied to the needle, a jet is ejected through the collector. The jet follows a short straight trajectory and then evolves by whipping until the collector. As the solvent evaporates during the evolution of the jet, solid continuous polymer nanofibers are deposited on the collector.

Studies on the electrospinning of various polymers exist in the literature. Among those polymers,

Özet

Bu çalışmanın amacı grafit (GR) oranının grafit katkılı polivinilpirolidon (PVP) kompozit nanofiblerin morfolojisi ve ıslanabilirlik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmaktır. Bu bağlamda, elektroçirme yöntemi kullanılarak, PVP nanolif keçeler ile birlikte farklı oranlarda (%0,6, %1,2, %1,8, %2,4, %3, %3,6 ve %4,2 GR oranlarında (% PVP)) katkı içeren PVP/GR kompozit nanolif keçeleri üretilmiştir. Nanoliflerin morfolojileri ve çapları taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile belirlenmiştir. Üretilen katkısız nanoliflerin ortalama çapı 218 nm olarak saptanmış iken, kompozit nanoliflerin çapları 170 nm ile 203 nm arasında değişmektedir. Keçelerin ıslanabilirliğini incelemek amacı ile temas açısı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Beklentilerin aksine, grafit oranı arttıkça ıslanabilirliğin arttığı gözlemlenmiştir. Burada, grafitin son yıllarda keşfedilen hafif düzeyde hidrofilik özelliğinin etkili olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, bu bulguların nanoliflerin elektriksel iletkenlikleri ile ilişkileri de incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Elektroçirme, Polivinilpirolidon, Grafit, Nanolifler, Islanabilirlik

polyvinylpyrrolidone (PVP) catches more and more attention. PVP is a non-toxic, biocompatible material with outstanding physical and chemical properties. Due to its versatility, this polymer is especially used in biomedical applications but also in other fields such as adhesives, coatings or electrical applications [3].

Many studies on the improvement of the properties of polymer nanofibers by the incorporation of fillers exist in the literature. One of the cost-effective and interesting filler for composite nanofibers is graphite. This allotrope of carbon is a natural mineral that seems to present suitability for biomedical applications. Nag et al. [4] fabricated graphite/PDMS sensors for biomedical applications. Hsin et al. [5] investigated the use of PVP-modified graphite nanofibers as catalyst supports in direct methanol fuel cells. Therefore, graphite is a good filler candidate for PVP for biomedical applications.

According to Kuruşu and Demarquette [6], the wettability of PVP nanofibers is an important parameter for tissue engineering and scaffold applications.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: sakkoyun@ybu.edu.tr (Ş. Akkoyun)

Geliş / Received: 05.10.2020 Kabul / Accepted: 06.02.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.805315

Therefore, the aim of this study is to investigate the effect of graphite content on the morphology and wettability of PVP/GR composite nanofibers. For this purpose, PVP and PVP/GR composite nanofiber mats of various filler contents (0.6%, 1.2%, 1.8%, 2.4%, 3%, 3.6% and 4.2 % of GR (wt.% of PVP)) were fabricated by electrospinning. The morphology and diameters of the nanofibers were characterized by scanning electron microscopy (SEM). The thermal properties of the nanofibers were investigated by differential scanning calorimetry (DSC). Then, the water wettability was examined via contact angle measurements. Finally, for a deeper understanding, the relationship of these properties with the electrical conductivity was also questioned.

2 Materials and methods

2.1 Materials

A high molecular weight polyvinylpyrrolidone with an average molecular weight of 1300 kg/mol (K85-95) was supplied from Acros Organics. Ethanol was supplied from Aytaş, Turkey (96% purity). Graphite powder (99 % purity) was supplied from Nanokar (D50 <1µm).

2.2 Preparation of PVP and PVP/GR solutions

The electrospinning solutions were prepared by dissolving PVP powder in ethanol under magnetic stirring for several hours. Solutions of PVP in ethanol of 7% (w/w) were prepared.

For the electrospinning of composite nanofiber mats, solutions of 7 wt. % of PVP in ethanol with various contents of graphite (0.6%, 1.2%, 2.4%, 3%, 3.6%, 4.2% (wt.% of PVP)) were prepared. After its addition to the polymer solution, the graphite powder was dispersed using an ultrasonic homogenizer (MSK-USP-12N).

2.3 Fabrication of nanofiber mats by electrospinning

Nanofiber mats were fabricated by electrospinning of PVP and PVP/GR solutions with an in-house electrospinning device. The optimized processing conditions are given in Table 1. For each case, the polymer solution was first introduced into a 10 mL syringe equipped with a metallic needle having outer and inner diameters of 0.813mm and 0.495mm, respectively. The optimum tip-to-collector distance was fixed. Then, the polymer solution was pumped at a constant feed rate. A high voltage was applied on the metallic needle and the nanofibers were electrospun on a grounded metallic collector wrapped with aluminum foil.

Table 1. Optimal electrospinning conditions

Voltage (kV)	Tip-to-collector distance (cm)	Feed rate (mL/h)
17.5	14	1.25

2.4 Characterization

The morphology of electrospun fiber mats was characterized by Scanning Electron Microscopy (SEM) using a HITACHI Flex1000 microscope at 15 kV. SEM

micrographs were used in order to determine the diameters of the nanofibers from 100 nanofibers using the method described elsewhere [7] with IMAGE J software (v.1.52i, National Institute of Health, USA).

Differential Scanning Calorimetry measurements were performed with DSC 25 (TA Instruments) calorimeter.

In order to characterize the wettability of the mats, contact angle measurements were performed using a Bohlin Scientific – Theta Flex optical tensiometer with water.

To investigate the chemical structure of PVP/GR composite nanofibers, Fourier Transform Infra-Red (FTIR) spectroscopy measurements were realized with a ThermoFisher Nicolet IS50 device equipped with an Attenuated Total Reflection (ATR) element within a range of 4000-400 cm⁻¹.

Electrical resistivity measurements were performed to characterize the electrical conductivity of the nanofiber mats using a Keithley 6517-B multimeter equipped with an 8009 resistivity test fixture. The measurements were repeated on three replicates.

3 Results and discussions

3.1 Effect of graphite content on fiber diameter and fiber morphology

The effect of filler content on fiber diameters is represented in Figure 1.

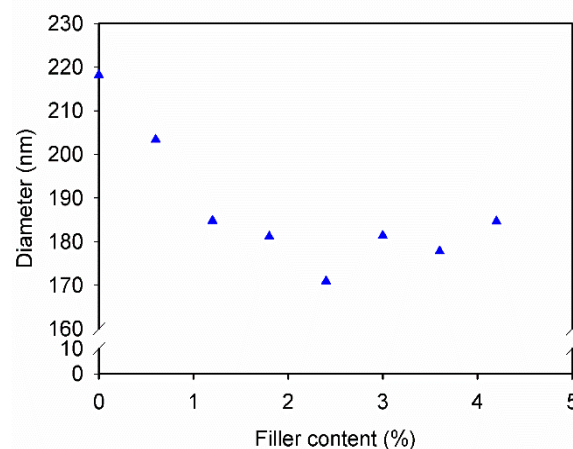


Figure 1. Effect of filler content on mean nanofiber diameter.

The unfilled PVP fibers have an average diameter of approximately 218 nm. A decrease of fiber diameter is observed with increasing GR content until approximately 170 nm for 2.4% of GR content and it stabilizes around 180 nm for higher filler contents. This evolution of the diameter of the nanofibers is in correlation with the literature. Similarly, Huang et al. [8] observed a decrease of PVP/cellulose nanocrystals/silver nanoparticle containing hybrid composite nanofibers with increasing filler content. The authors attributed this evolution to an increase of the

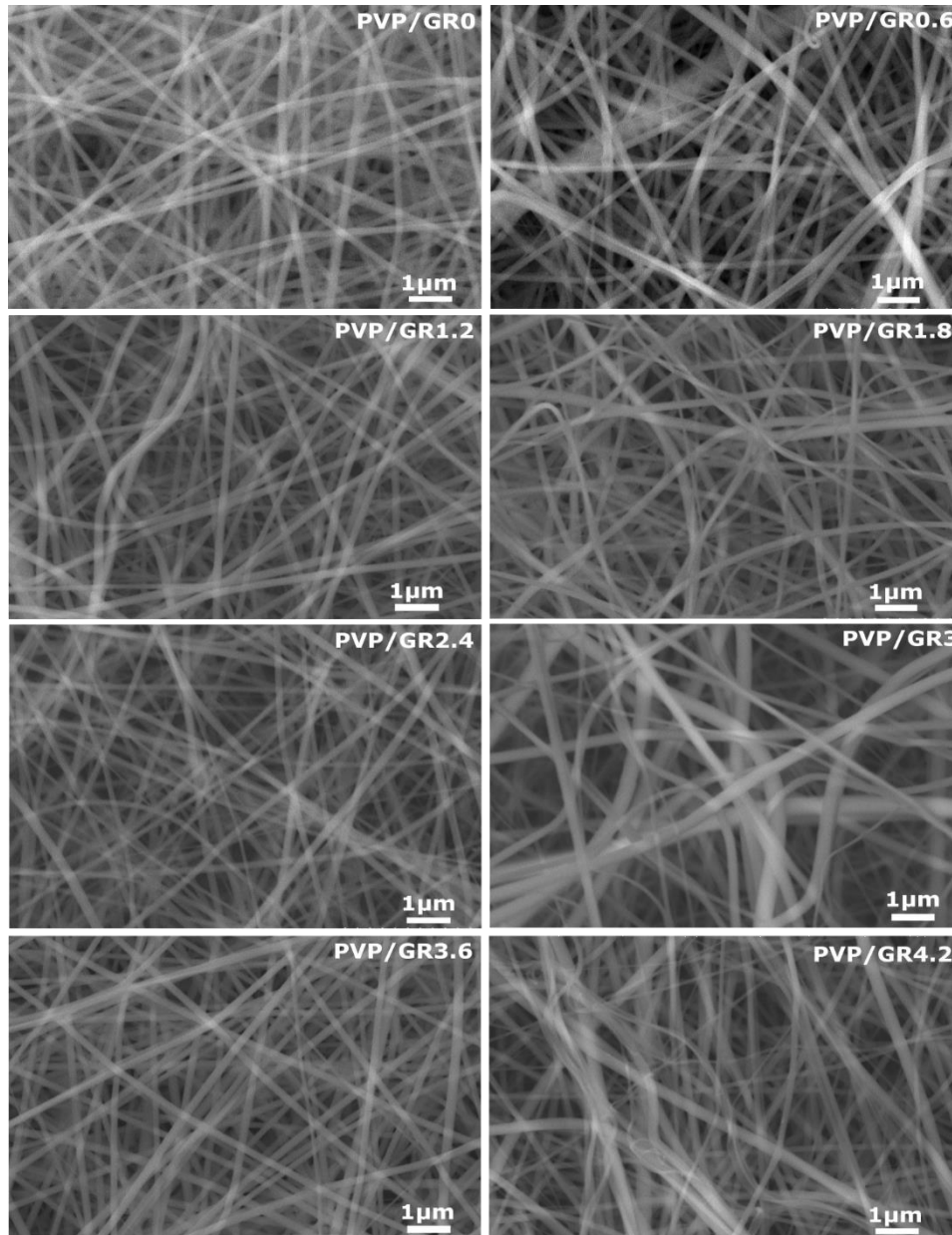


Figure 2. SEM micrographs of PVP nanofiber mat and PVP/GR composite mats with different filler contents.

surface charge of the polymer jet due to the electrical conductivity of silver nanoparticles. Therefore, strong extensional forces are applied on the polymer jet which results in thinner nanofibers when the filler content increases. This interpretation seems also valid for the composite nanofibers produced in this study as graphite increases the electrical conductivity of PVP nanofibers.

The morphology of the electrospun nanofibers was examined by Scanning Electron Microscopy. The SEM micrographs of the PVP nanofiber mat and PVP/GR composite mats with different filler contents are presented in Figure 2. In the case of PVP nanofibers (PVP/GR0), homogeneous and cylindrical nanofibers were obtained.

However, composite nanofibers mats present extra webs of very thin nanofibers with increasing graphite content.

Moreover, a closer look at the PVP/GR4.2 sample shows that above 3.6%, some nanofibers have a flat ribbon morphology.

The nanofibers diameter distributions are given in Figure 3. According to these results, a narrower distribution is observed for unfilled PVP nanofibers. This result is in correlation with the morphology of the nanofibers observed in SEM micrographs presented in Figure 2. Indeed, the PVP/GR0 sample is composed of homogeneous cylindrical nanofibers. A broad distribution is observed for almost all the other samples which can be explained by the presence of extra webs of thinner fibers as shown in Figure 2. However, the fiber diameter distribution is narrower for fibers with 3.6% of GR. This result is in correlation with SEM micrograph of this sample where nanofibers with an approximately homogeneous diameter are observed. Besides, lesser extra webs are present in that case.

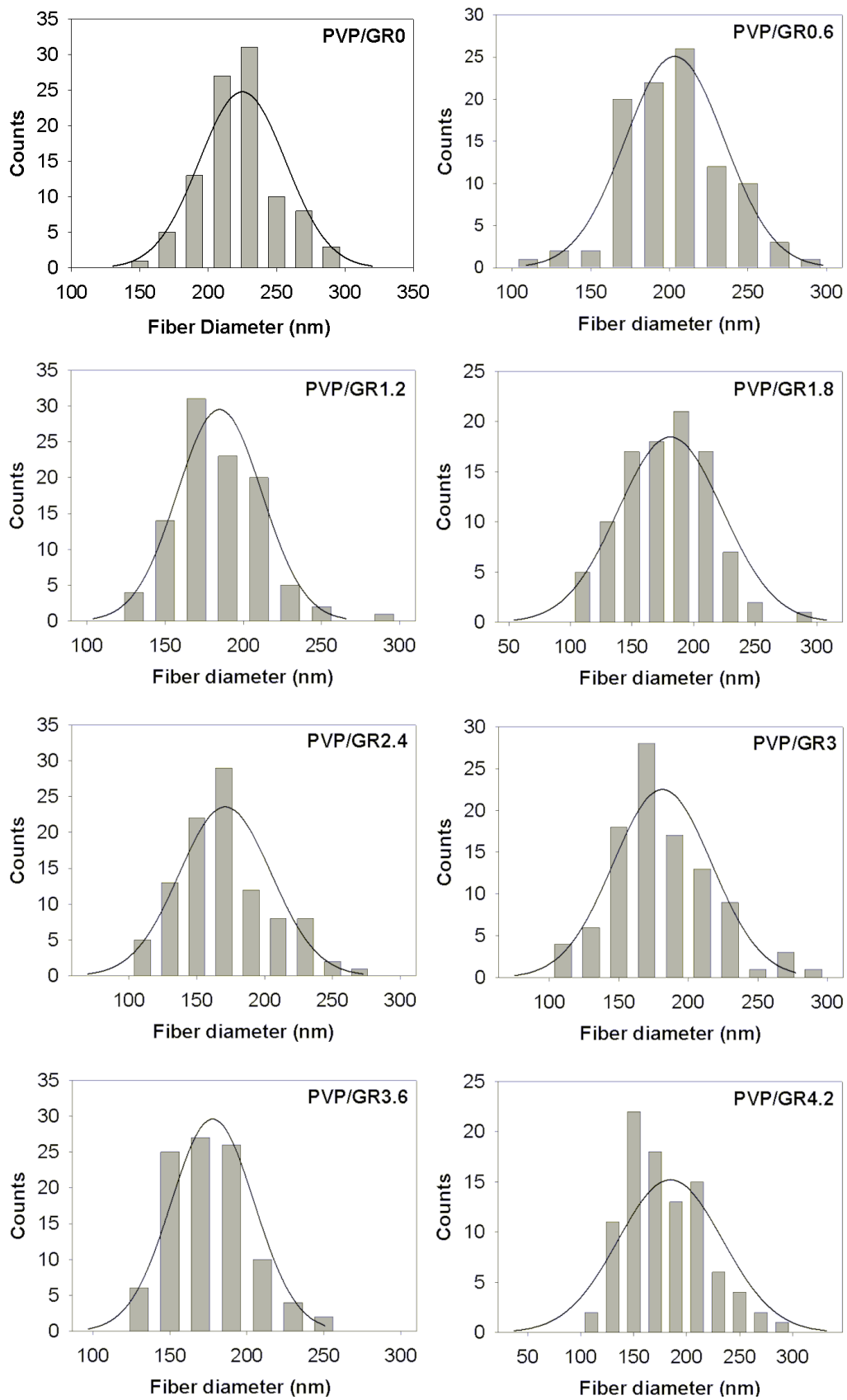


Figure 3. Nanofiber diameter distribution of PVP nanofiber mat and PVP/GR nanofiber mats with different filler contents.

3.2 FTIR analysis of PVP and PVP/GR composite nanofibers

Figure 4 presents the FTIR spectra of PVP nanofibers and PVP/GR composite nanofibers. It can be seen that all the spectra show the characteristic peaks of PVP. As there is no chemical bonding between the filler particles and the polymer, the presence of graphite has no effect on the FTIR spectra of the composite nanofibers. Especially, the characteristic PVP peak observed at 1675 cm^{-1} (carbonyl stretching (C=O)) appears at approximately the same wavenumbers for all samples. This observation is also valid for the broad absorption band around 3450 cm^{-1} corresponding to the hydroxyl stretching (-OH) which are associated with the presence of free hydroxyl group that form hydrogen bonds with residual water [9].

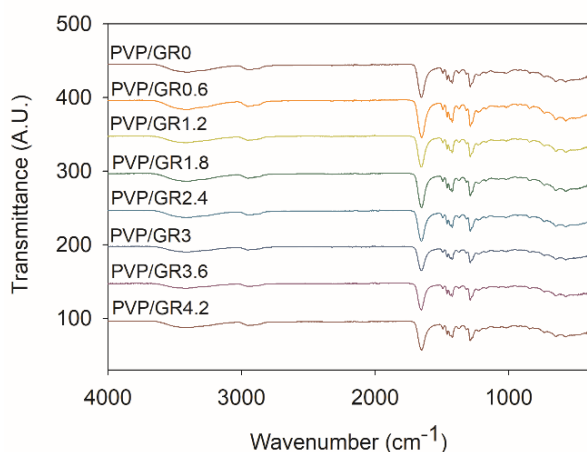


Figure 4. FTIR spectra of the nanofiber mats.

3.3 Effect of graphite content on thermal transitions

The DSC thermographs of PVP nanofiber mat and PVP/GR composite nanofiber mats with different filler contents are presented in Figure 5. For all samples, a broad endothermic peak between 50°C and 150°C is observed. The corresponding peak temperatures of the samples are gathered in Table 2. They vary between 87°C and 101°C . These results are not surprising for hygroscopic materials such as PVP and are in correlation with the literature. Adeli [10] observed the same thermal behavior for PVP (K90). The author attributed the broad endothermic peak to the dehydration of the polymer. According to the literature, it is well known in that graphite derivatives can play the role of catalysts for dehydration reactions [11]. Therefore, in the case of PVP/GR composite nanofibers, due to the presence of graphite, the dehydration of PVP occurs at relatively lower temperatures compared to unfilled PVP nanofibers.

According to La Fontaine et al. [12], PVP K90 presents a glass transition temperature of around 156°C . The authors worked with a PVP (K90 – molecular weight 1 250 000 g/mol) very similar to that one used in this study. Similar transitions are also observed with our samples.

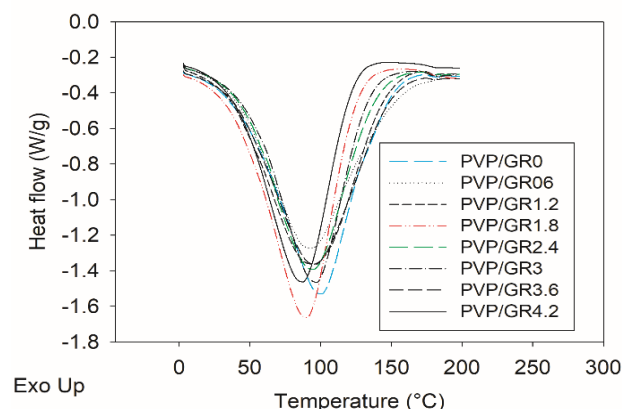


Figure 5. DSC thermographs of nanofiber mat and PVP/GR nanofiber mats with different filler contents.

Table 2. DSC thermographs of the samples.

Sample	Filler content (%)	T _{Peak}
PVP/GR0	0	100.57
PVP/GR0.6	0.6	93.26
PVP/GR1.2	1.2	94.65
PVP/GR1.8	1.8	90.58
PVP/GR2.4	2.4	94.83
PVP/GR3	3	97.17
PVP/GR3.6	3.6	96.20
PVP/GR4.2	4.2	87.50

3.4 Effect of graphite content on the wettability of PVP/graphite composite nanofiber mats

To characterize the wettability properties of the samples, contact angle measurements with water were realized at ambient temperature. The images are presented in Figure 6.

The results show that the presence of graphite filler increases the water wettability of the samples as flatter water droplets are observed for composite nanofiber mats.

The effect of filler content on contact angles is presented in Figure 7. According to this Figure, the contact angle decreases as graphite content increases until 3% and then it increases again. This evolution seems to be due to the mild hydrophilicity of graphite discovered in recent years [13].

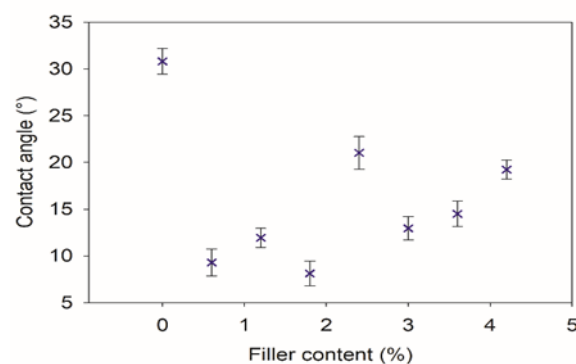


Figure 7. Effect of graphite content on water droplet contact angle on PVP mat and PVP/GR composite mats with different filler contents.

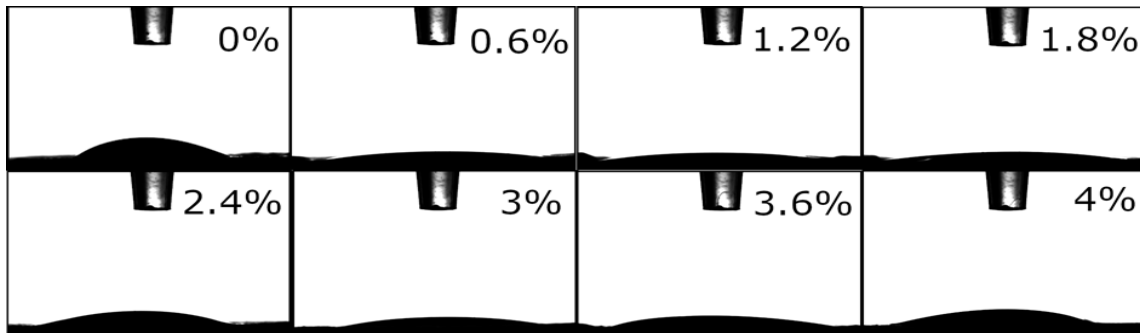


Figure 6. Contact angle images of water droplets on PVP mat and PVP/GR composite mats.

3.5 Effect of graphite content on the electrical conductivity of PVP/graphite composite nanofiber mats

For a better understanding of the wettability of the samples, the electrical conductivity of the nanofiber mats was also characterized. According to Figure 8, contact angles and electrical conductivity of the nanofiber mats have an inverse evolution: the electrical conductivity of the nanofiber mats is high when the contact angle is low. Therefore, it can be concluded that the water wettability increases when the electrical conductivity increases.

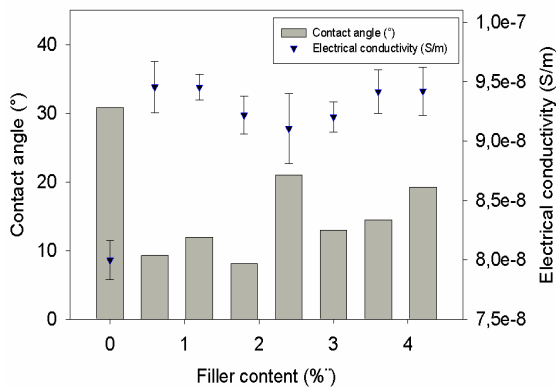


Figure 8. Graphical representation of the relationship between the evolution of the contact angles and the electrical conductivity of nanofibers with increasing GR content.

4 Conclusion

In this study, the effect of graphite content on the morphology and wettability of PVP and PVP/GR composite nanofibers with different graphite contents was investigated. Nanofibers with a PVP concentration of 7% (w/w) and graphite contents of 0.6%, 1.2%, 1.8%, 2.4%, 3%, 3.6% and 4.2 % of GR (% of PVP) were electrospun. Although homogeneous cylindrical nanofibers were obtained in the case of the unfilled PVP nanofibers, the morphology of PVP/GR composite presents extra-webs of thinner fibers or ribbon-like fibers. The water wettability of the composite nanofiber mats was higher compared to unfilled nanofiber mats. This evolution was attributed to the mild hydrophilicity of graphite.

Declaration of interests

The author declares that she has no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Similarity rate (iThenticate): %17

References

- [1] Kenry and C. T. Lim, Nanofiber technology: current status and emerging developments, *Progress in Polymer Science*, 70, 1-17, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2017.03.002>
- [2] Z.-M. Huang, Y.-Z. Zhang, M. Kotaki and S. Ramakrishna, A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites, *Composites Science and Technology*, 63, 2223-2253, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00178-7](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00178-7)
- [3] M. Teodorescu and M. Bercea, Poly(vinylpyrrolidone) – A versatile polymer for biomedical and beyond medical applications, *Polymer Plastics Technology and Engineering*, 54, 923-943, 2015. <https://doi.org/10.1080/03602559.2014.979506>
- [4] A. Nag, N. Afasrimanesh, S. Feng and S. C. Mukhopadhyay, Strain induced graphite/PDMS sensors for biomedical applications, *Sensors and Actuators A: Physical*, 271, 257-269, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.01.044>
- [5] Y. L. Hsin, K. C. Hwang and C.-T. Yeh, Poly(vinylpyrrolidone)-Modified graphite carbon nanofibers as promising supports for ptu catalysts in direct methanol fuel cells, *Jornal of American Chemical Society*, 129, 9999-10010, 2007. <https://doi.org/10.1021/ja072367a>
- [6] R. S. Kurusu and N. R. Demarquette, Surface modification to control the water wettability of electrospun mats, *International Materials Reviews*, 64(5), 249-287, 2019. [10.1080/09506608.2018.1484577](https://doi.org/10.1080/09506608.2018.1484577)
- [7] M. Maleki, A. Natalello, R. Pugliese and F. Gelain, Fabrication of nanofibrous electrospun scaffolds from a heterogenous library of co- and self-assembling

- peptides, *Acta Biomaterialia*, 51, 268-278, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2017.01.038>
- [8] S. Huang, L. Zhou, M.-C. Li, Q. Wu, Y. Kojima and D. Zhou, Preparation and properties of electrospun poly(vinyl pyrrolidone)/cellulose nanocrystal/silver nanoparticle composite fibers, *Materials*, 9, 523, 2016. <https://doi.org/10.3390/ma9070523>
- [9] M. A.-F. Basha, Magnetic and optical studies on polyvinylpyrrolidone thin films doped with rare earth metal salts, *Polymer Journal*, 42, 728-734, 2010. <https://doi.org/10.1038/pj.2010.60>
- [10] E. Adeli, Irbesartan-loaded electrospun nanofibers-based PVP K90 for the drug dissolution improvement: Fabrication, in vitro performance assessment, and in vivo evaluation, *Journal of Applied Polymer Science*, 42212, 2015. <https://doi.org/10.1002/app.42212>
- [11] G. Nie, X. Tong, Y. Zhang and S. Xue, Efficient production of 5-hydroxymethylfurfural (HMF) from D-fructose and inulin with graphite derivatives as catalysts, *Catalysis Letters*, 144, 1759-1765, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10562-014-1320-7>
- [12] J. S. LaFontaine, L. K. Prasad, C. Brough, D. A. Miller, J. W. McGinity and R. O. Williams III, Thermal processing of PVP- and HPMC- based amorphous solid dispersions, *AAPS Pharm SciTech*, 17(1), 120-132, 2016. <https://doi.org/10.1208/s12249-015-0417-7>
- [13] A. Kozbial, F. Zhou, Z. Li, H. Liu and L. Li, Are graphitic surfaces hydrophobic?, *Accounts of Chemical Research*, vol. 49, no. 12, pp. 2765-2773, 2016. <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.6b00447>





Stab and ballistic performances of aramid fabrics impregnated with silica based shear thickening fluids

Silika esaslı kayma ile kalınlaşan sıvı emdirilmiş aramid kumaşların darbe ve balistik performansları

Oylum Çolpankan Güneş¹ , Sema Yıldız² , Mehmet Deniz Güneş³ , Fikret Şenel⁴ ,

Metin Tanoğlu^{5,*} 

¹ Dokuz Eylül University, Metallurgical and Materials Engineering Department, 35390, Izmir Turkey

^{2,3,5} Izmir Institute of Technology, Mechanical Engineering Department, 35437, Urla-Izmir Turkey

⁴ STP LUSAS Defense and Advanced Industry Technologies Inc, 06378 Ankara

Abstract

This study focuses on the production of aramid fabric with improved stab and ballistic resistances treated with shear thickening fluids (STFs). The STFs were prepared by homogenization of various amount of silica particles within the PEG and ethyl alcohol, drying, and grinding steps. The rheological measurements showed that the addition of silica nanoparticles into the PEG, shear thickening behavior was enhanced. As silica concentration increased, the interparticle forces increased and so the friction between particles greatly increased, causing an enhanced shear-thickening property. Quasi-static and dynamic stab resistance tests showed that increasing shear thickening response corresponded to increased stab performance in the STF/aramid targets as compared to untreated aramid fabric. Ballistic test results showed that there was an increment in the ballistic resistance between untreated fabric and STF/aramid composites. It was also found that the flexibility of STF/aramid targets did not decrease significantly compared to the untreated aramid fabric.

Keywords: Aramid fabric, Shear thickening fluids (STFs), Stab resistance, Rheology, Ballistic performance

1 Introduction

Protection of a body from the damages has been always an important issue for mankind. Personal body armors have been designed for this aim to prevent weapons, projectiles, stab threats that come from knives or sharpened equipment such as spike or needle [1-3]. For the body armor production, fabrics made of high-performance fibers which are characterized by low density, high strength, high tenacity and high energy absorption, such as aramid (Kevlar®, Aramid®, Technora®), high-density polyethylene (Spectra®, Dyneema®) and poly benzoxazole (Zylon®) have been widely used [4-5]. In order to satisfy the protection requirements of body armors, fabrics approximately 20-50 layers are laminated together, or ceramic/steel plates are used along with the fabric structure [4, 6]. The laminated fabric

Özet

Bu çalışma, kayma ile kalınlaşan sıvılar (KKSler) ile işlem görmüş gelişmiş bıçak ve balistik dirençlere sahip aramid kumaş üretimine odaklanmaktadır. KKSler, PEG ve etil alkol içinde silika parçacıklarının homojenleştirilmesi, kurutma ve öğütme aşamaları ile hazırlanmıştır. Reolojik ölçümler, silika nanopartiküllerin PEG'e eklenmesinin, kayma ile kalınlaşma davranışını arttırdığını göstermiştir. Silika konsantrasyonu arttıkça, partiküller arası kuvvetler artmakta ve bu da partiküller arasındaki sürtünmeyi büyük ölçüde artırarak KKSlerin gelişmiş bir kayma ile kalınlaştırma özelliğine neden olmaktadır. Yarı statik ve dinamik bıçak direnç testleri, artan kayma ile kalınlaşma tepkisinin, KKS/ aramid hedeflerinde ham aramid kumaşa göre artan bıçak performansına karşılık geldiğini göstermiştir. Balistik test sonuçları, ham aramid kumaş ve STF/aramid hedefler arasındaki balistik dirençte artış olduğunu göstermiştir. Ayrıca, STF/aramid hedeflerin esnekliğinin de ham aramid kumaşa göre önemli bir ölçüde azalmadığı da görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Aramid kumaş, Kayma ile kalınlaşan sıvılar (KKSler), Darbe direnci, Reoloji, Balistik performans

structured body armor is called as soft body armor and armor with a rigid ceramic or steel plates is known as hard body armor. They differ from each other in protection level; hard body armors are used for the protection against high-speed threats and soft body armors are used for the protection of lower speed threats [5]. Besides having a proper protection level against the threats, weight and flexibility are also important and desired design parameters [7]. However, body armors are bulky, heavy, hard to wear, restrictive the mobility of the wearer due to this laminated structure and heavy plates [6]. Therefore, there is always needed to develop soft body armor materials with flexible, lightweight, higher protection levels against ballistic threats. Recently, STFs has attracted great interest and it has been started to use

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: metintanoglu@iyte.edu.tr (M. Tanoğlu)
Geliş / Received: 01.12.2020 Kabul / Accepted: 14.04.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021
doi: 10.28948/ngumuh.786231

within the body armors to meet these requirements and the body armor is called as liquid body armor [8].

Shear thickening is a non-Newtonian flow behavior and defined in the British Standard Rheological Nomenclature as the increase in viscosity with increase in shear rate [9]. In general, the shear thickening fluids consist of two phases; nano-scale particles such as silica [10, 11], calcium carbonate [12], PMMA particles [13] and medium fluid in which the particles are dispersed in a liquid medium such as polypropylene glycol [14] and polyethylene glycol [15]. Medium fluids act as a lubricant between the nanoparticles. The order-disorder transition and hydrodynamic clustering theories have been the accepted ones in to explain the mechanism of shear thickening fluids [16]. Hoffman et al. proposed that shear thickening is related to an order-disorder transition, the layered structure becomes unstable beyond a critical shear rate [17]. In order to investigate the validity of that mechanism Boersma et al. proposed that short-range lubrication forces are responsible for the formation of shear-induced hydro clusters causing shear thickening [18]. At rest, the void is minimum and there is a random distribution of particles in the fluid. This distribution makes the fluid resistant to flow. However, as increasing shear rates, the liquid lubricates the motion of each particle past others, particles become organized in the direction of the flow which reduces the viscosity; this step is called as shear thinning. At high shear rates, the material expands slightly and hydrodynamic interactions between the particles dominate over stochastic ones. so that there is no longer sufficient liquid to fill the increased void space and the difficulty of particles following around each other in a flow requires the higher energy dissipation and increases the viscosity. This region is a shear thickening region [19, 20].

In the literature, Decker et al. proposed a study on the stab resistance of silica based STF-treated fabrics for the first time. The weight percentage of STF was between 20 and 30. They stated that the stab and puncture resistances of STF-treated Kevlar and nylon fabrics significantly increased compared to the untreated fabrics. They also proposed that the added STF reduced the mobility of filaments and yarns, which led to improvement in stab resistance [21]. In the study of Li et al., silica based STFs were prepared and the chemical composition of dispersing medium as PEG in STF was varied. The results demonstrated that the dynamic stab resistance of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) fabric significantly increased with STF by effectively decreasing the yarn mobility and accelerating the transverse response of UHMWPE fabric. The energy dissipated by STF treated fabrics decreased upon increasing the molecular weight of PEG. In addition, the stab resistance of STF/UHMWPE composites improved with the increase of the concentration and the molecular chain length of additive [22]. Feng et al. studied the effects of fumed silica in shear thickening fluids at a weight fraction of 20% and submicron silica particles in shear thickening fluids at a weight fraction of 65% on quasi-static stab resistance properties of fabrics impregnated with shear thickening fluids. They showed that aramid fabrics treated with shear thickening fluid exhibit a significant enhancement in quasi-static stab resistance.

Further, quasi-static stab resistant properties of treated fabrics containing submicron silica particles are better than that of treated fabrics containing fumed silica particles [23]. Kalman et al. studied the role of particle hardness used in STFs. They compared Kevlar fabric treated with STFs consisting silica and PMMA particles in terms of yarn pull-out, quasi-static spike puncture, and ballistic penetration resistance. They found that STF treated fabrics resulted in improvement in fabric properties compared to untreated or PEG treated fabrics. On comparison of treatments with different particle hardness, the silica nanoparticles performed better in all tests than comparable PMMA particles [24].

In this study, silica based STF impregnated aramid fabrics were developed and determined the applicability as an armor material. STFs containing dry fumed silica nanoparticles and PEG with a 300 g/mole molecular weight were prepared after homogenization, drying, and grinding steps. The shear thickening behavior of the STFs at different weight ratios of silica was investigated using a rotational rheometer. The morphological characterization of STFs and STF/aramid fabrics was performed by scanning electron microscopy (SEM). The stab resistance of STF/aramid fabrics were tested based on quasi-static and dynamic stab tests. The ballistic resistance of STF/aramid fabrics were investigated by 9 mm parabellum projectiles and V₅₀ test performed using 1.1 gr. fragment-simulating projectiles (FSPs). The flexibility of the STF/aramid fabrics were also tested by a new self-made test method.

2 Material and methods

2.1. Materials

Fumed silica nanoparticles (CAB-O-SIL® M-5, Cabot Corporation, USA.) (200-300 nm average particle size) were used as a filler in STF synthesis process. Polyethylene glycol (PEG) with a 300 g/mole molecular weight ($\rho=1.12 \text{ g/cm}^3$, $\eta=0.085\text{-}0.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ at 20°C, melting point (T_m) – 15°C) was used as a medium fluid and supplied by Acros Organics, Belgium. In order to obtain stable dispersions, ethyl alcohol was used, and it was purchased from Tekkim Laboratory Chemicals, Turkey. For the fabrication of soft armor materials, aramid fabrics (Twaron™) were used. Twaron™ (CT709) is a plain weave of 930f1000 dtex, 2040 yarns with a yarn count of $10^5 \times 10^5$ yarns per 10 cm and its areal density is 200 g/m².

2.2 Preparation of STFs

STFs were prepared by dispersing fumed silica nanoparticles in PEG and ethyl alcohol by a sonochemical method, drying and grinding. In this regard, initially, different amount of silica nanoparticles was added to ethyl alcohol at a 1:5 weight ratio of nanoparticle:ethyl alcohol and subjected to sonication for 5 hours using Hielscher UP400S ultrasonic processor (Ti-sonotrode with 25 mm diameter, 50 Hz, 28 kWh at 50% amplitude). Then, PEG was added to the prepared solution and sonication was maintained for 3 hours. Next, the solution was held in an air-circulating oven at 79°C overnight in order to evaporate ethyl alcohol in the solution. Finally, it was ground by means of Retsch RM 200 an agate

mortar (250 W, 100 rpm) for 30 minutes and it was placed under vacuum in order to eliminate the bubbles. STFs were coded according to their concentrations in PEG (5-30% (w/v)) and shown in Table 1.

2.3 Preparation of STF Impregnated Fabrics

STF/aramid fabrics were prepared by impregnation of the STFs into the fabric with the soaking method. Initially, the STFs were diluted in ethyl alcohol at a 3:1 volume ratio of ethyl alcohol:STF. Then, ten layers of aramid fabrics having sizes of 20 x 20 cm were impregnated with the diluted STFs individually. Finally, after squeezing process to remove excess fluid on the fabrics, they were held in an air-circulating oven at 79°C. The final concentration of STF in each sample was 15 % by weight. The prepared STF/aramid fabrics were sealed in a 30 cm laminated polyethylene pouch and sealed. The prepared STF/aramid fabrics were coded according to the impregnated STF as shown in Table 1.

Table 1. Sample codes and concentration

Sample code	STF concentration % (w/v)
STF5	5
STF10	10
STF15	15
STF20	20
STF25	25
STF30	30
STF5/aramid	5
STF10/aramid	10
STF15/aramid	15
STF20/aramid	20
STF25/aramid	25
STF30/aramid	30

2.4 Characterization of the STF Impregnated Fabrics

2.4.1 Rheological analysis

Steady-shear rheological properties of all prepared STFs were investigated by using a rotational rheometer TA instruments TM (TA 2000ex). All the experiments were carried out at room temperature and in a continuous ramp mode using a cone plate having a cone angle of 0.1 radians and a diameter of 25 mm. In this mode, viscosity values were obtained as a function of shear rate and shear rate varied between 10^{-2} to 10^3 s⁻¹ during the experiments.

2.4.2 Morphological characterization

In order to determine the dispersibility of silica nanoparticles in the STFs and characterize the impregnation of STF in the aramid fabrics, scanning electron microscope (SEM) (Phillips™ XL-30S FEG) was utilized at an accelerating voltage of 5 kV. All the samples were coated with a thin layer of gold/palladium prior to analysis (Quorum Technologies, SC7620).

2.4.3 Quasi-static stab resistance tests

The quasi-static stab test was performed based on NIJ Standard-0115.00 for stab resistance of body armor [25].

Quasi-static stab tests were conducted on treated as well as untreated aramid fabrics by using Schimadzu AGS-J universal test machine with 5 kN load cell. The STF impregnated fabrics and untreated fabrics were placed on a backing material as presented in Figure 1, as specified by the NIJ test standard which consists of four layers of 5.8 mm-thick neoprene sponge, one layer of 31 mm-thick polyethylene foam, two 6.4-mm-thick layers of rubber. The NIJ specified impactor “engineered spike” was used. The spike rate was adjusted to 500 mm/min and it was pushed into the target until 30 mm displacement was achieved. Load as a function of displacement graphs were obtained.

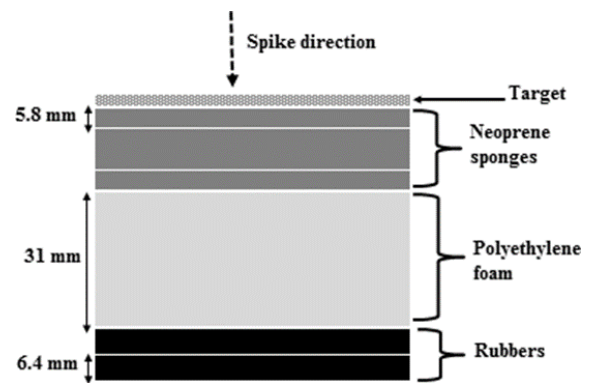


Figure 1. Schematic illustration of quasi-static stab test setup

2.4.4 Dynamic stab resistance tests

In order to obtain stab resistances against higher impact velocities dynamic stab tests of STF impregnated aramid fabrics and untreated aramid fabrics were performed by MATEŞ Electronic stab and impact test machine located in BARIŞ Electrical Industry Inc., Ankara, as seen in Figure 2, according to NIJ Standard-0115.00 for stab resistance of body armor. The drop mass contained a cylinder steel and the spike having 9 mm diameter and the total mass was about 3020 g. The targets were placed on a glass cement having a 55 mm thickness used as witness paper to measure the depth of indentation. It was placed between the target and foam backing, and behind each layer of neoprene sponge. Test was performed from three different heights (0.25, 0.5 and 0.75 m). Theoretical impact velocities were calculated as 2.21, 3.13 and 3.83 m/sec based on the heights according to potential and kinetic energy balance equation. Tests were repeated for three times for all samples and the average values were taken.

2.4.5 Ballistic Tests

Ballistic tests were conducted using 9 mm parabellum FMJ projectile and 1.1 g fragment-simulating projectiles (FSPs) according to ‘NIJ-0101. 04 Ballistic Resistance of Personal Body Armor’ standard. For 9 mm parabellum test, exact impact velocity of projectile was measured with a chronograph immediately before impacting the target. The glass cement was used as a backing material and deformation

of target was measured from this backing material after test was applied. V_{50} ballistic limit test was applied by using 1.1 g FSPs. After each projectile, the target was controlled, noted that the penetration was full or partial. The test was continued until at least three full and three partial penetrations were observed. V_{50} result was obtained by the ratio of minimum velocity of full penetration and maximum velocity of partial penetration.

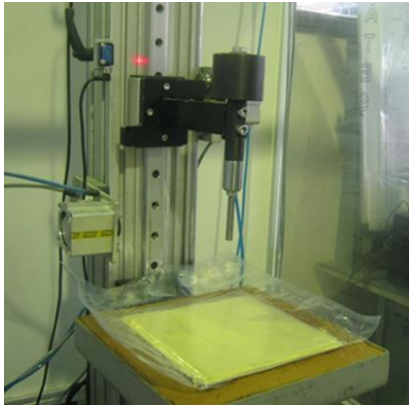


Figure 2. Dynamic stab resistance test setup

2.4.6 Flexibility Tests

The flexibility test was performed to determine the effect of STF addition on the fabric flexibility by using Schimadzu AGS-J universal test machine. Schematic test set up for flexibility testing is shown in Figure 3. The test rate was adjusted as 20 mm/min and test was maintained until the force of 6N was achieved. Bending at the end of the sample is measured, bending angle (α) is calculated by dividing this extension to target edge (10 cm). Bending angle is reported as a measure of target flexibility, with larger angles indicating greater flexibility. Tests were repeated for three times for all prepared composites and the average values were taken.

3 Results and discussion

3.1. Rheological properties

Figure 4 shows the steady-shear rheological behavior of PEG 300 and prepared STFs. As seen from the graph, the viscosity values of the samples increased with increasing silica concentration. Furthermore, PEG 300 exhibits Newtonian fluid behavior with no sudden increment in the viscosity with shear rate. The addition of silica nanoparticles into the PEG resulted in the sudden increment of the viscosity and STFs exhibited shear thickening behavior. However, STF5 sample did not show remarkable viscosity increment with increasing shear rate due to the lower silica content in the fluid. It was also observed from the graph, the STFs were glassy at rest and yielded at low shear rates, known as shear thinning which is a desired feature for the body armor.

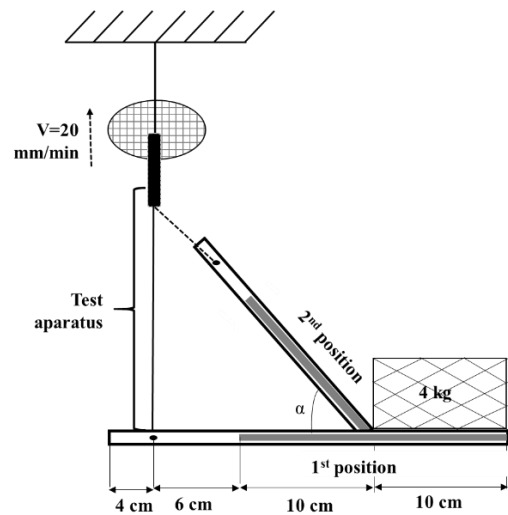


Figure 3. Schematic illustration of flexibility test setup

The viscosities of the STF20, STF25 and STF30 samples decreased with increasing shear rate up to 10 1/s. The shear thinning stage of the samples appeared at similar shear rates. As increasing shear rate the viscosity begins to plateau, followed by a transition to shear thickening behavior at high shear rates. The sudden increase in the viscosity of silica dispersions and the shear thickening transitions are due to microstructural changes in the fluid along with the hydro cluster mechanism. The formation of particle clusters increases the hydrodynamic stress in the shear thickening fluid that leads to the dramatic increase in the viscosity [18, 26, 27]. The shear rate at which shear thickening behavior is observed is known as critical shear rate [28]. It was observed that the critical shear rate values decreased upon increment silica concentration in STFs. In addition, the strength of the shear thickening response increases as particle loading increases with continuous shear thickening behavior.

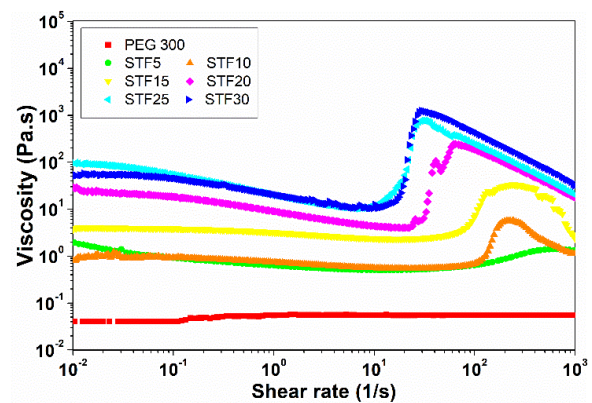


Figure 4. Steady shear viscosity-shear rate graph of PEG 300 and STFs

The range of shear rates at which shear thickening behavior is observed and the viscosity values at these ranges are given in Table 2 for all prepared STFs. The sample containing 30

wt. % silica exhibited the highest thickening effect with sudden and continuous increment in viscosity.

After shear thickening transition, the second shear thinning regime was visible at higher shear rates which is known as reversible shear thickening, and it is an important issue for multi shots of body armors.

Table 2. The range of shear rates and viscosity values of STFs

Sample Code	Range of shear rates (s ⁻¹)	Viscosity values (Pa.s)
STF5	-	-
STF10	5-129	1.2-12.4
STF15	34-43	6.9-204.2
STF20	39-44	2.8-350
STF25	11-30	12-7 73
STF30	20-42	42-1241

3.2 Morphological characterization

The SEM images of STF30 and STF30/aramid fabric are shown in Figures 5a and 5b-d, respectively. As seen from the Figure 5a, silica nanoparticles were well coated with PEG in STF30. SEM images of STF30/aramid fabric show that STF was well impregnated over the entire surface of the aramid fabric. The uniform coating was seen better from the higher magnification image (Figure 5d).

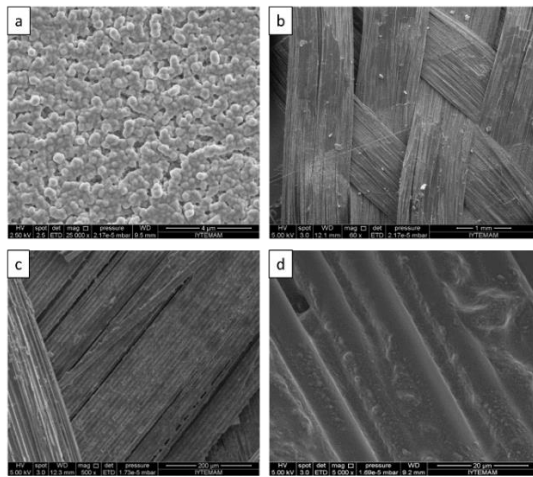


Figure 5. SEM images of (a) STF30 at 25000x magnifications and (b-d) STF30/aramid fabric at 60x, 500x and 2500x magnifications

3.3 Quasi-static stab resistance

The quasi-static stab resistance test results for the untreated aramid and STF/aramid fabrics are illustrated in Figure 6. As seen in the graph, all STF/aramid fabrics exhibited significantly higher penetration load as compared to those for the untreated aramid fabric targets. It was observed that STF30/aramid fabric exhibited the highest load of 127 N at about 30 mm penetration, whereas the aramid

fabric gave 74 N at the same penetration depth. With increasing silica concentration shear thickening behavior was more obvious and stab resistance of this STF/aramid fabric enhanced.

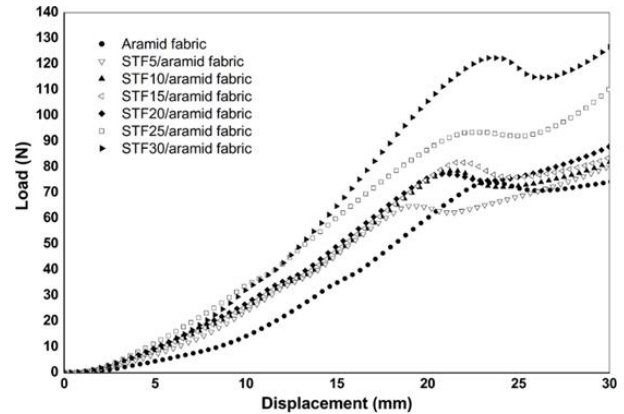


Figure 6. Quasi-static stab resistances of aramid fabric and STF/aramid fabrics

3.4 Dynamic stab resistance

It is important to determine the stab resistance of the armors at higher velocities. Dynamic stab resistance test was performed to obtain the penetration depths of the samples. Penetration depth versus impact velocities graph for the aramid fabric and STF/aramid fabrics is illustrated in Figure 7. The three impact velocities used during the tests are marked on the graph. For all impact velocities, aramid fabric target exhibited the lowest stab resistance with the highest penetration depths. With increasing silica concentration, the resistance to the stab of targets improved. It was observed that targets containing STF30/aramid fabric exhibited the least penetration depth and the highest stab resistance. However, as expected, as the impact velocity increased, a penetration depth of all targets increased. Figure 8 shows the example images of aramid fabric and STF30/aramid fabric during and after dynamic stab test at a 2.21 m/s spike impact velocity. It was clearly seen that untreated aramid fabrics had higher penetration depth as compared to those for STF/aramid systems.

3.5 Ballistic performance

The untreated aramid fabrics and STF30/aramid fabrics which had highest stab resistances were subjected to ballistic impact with 9 mm FMJ parabellum and 1.1 g FSP projectiles. The test results were given in Table 3. For the 9 mm parabellum test, the typical projectile velocity was measured as 454 m/sec. At this velocity, the aramid fabrics punctured whereas, STF30/aramid sample did not puncture and resisted with about 55 mm deformation on the fabrics.

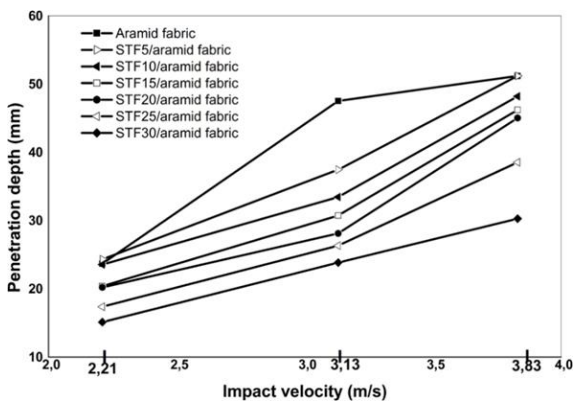


Figure 7. Dynamic stab resistances of aramid fabric and STF/aramid fabrics

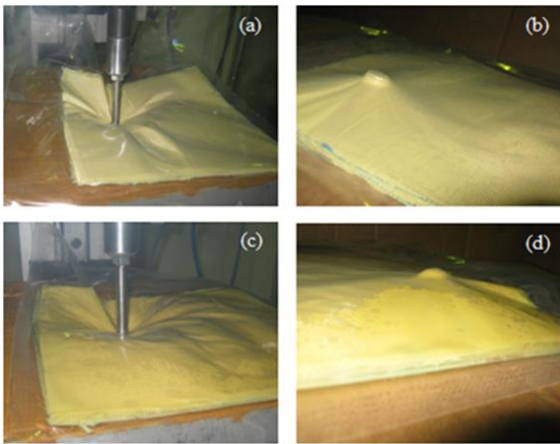


Figure 8. Images for aramid fabric (a) during, (b) after dynamic stab test and STF30/aramid fabric (c) during, (d) after dynamic stab test

In the V_{50} ballistic limit test in which 1.1 g FSPs are used, STF/aramid composites exhibited higher ballistic resistance as compared to those for the untreated fabrics. V_{50} ballistic test limits of aramid fabrics and STF30/aramid sample were measured as 504 and 530 m/sec, respectively. The results show that a relatively less damage, i.e., less penetration (no puncture or partial perforation) occurred within the fabrics impregnated with STFs. This may indicate a relatively higher energy absorbing capability of the composites with STF due to shear thickening effects and increased friction and stickiness.

Table 3. Ballistic test results of the samples

Sample Code	9 mm parabellum test result	V_{50} test result (m/sec)
Aramid fabric	Punctured	504
STF30/aramid fabric	55 mm deformation	530

3.6 Flexibility test

Body armors are bulky, heavy, hard to wear, restrictive the mobility of the wearer due to this laminated structure and heavy plates. There is always needed to develop soft body armor materials with flexible, lightweight, higher protection levels against ballistic threats. Flexibility is a critical feature for body armor not to restrict the mobility of the wearer. Therefore, the flexibility test was performed to determine the effect of STF addition on the fabric flexibility by using Shimadzu AGS-J universal test machine with a 5 kN load cell. Based on our knowledge, the study reported by Lee et. al. [6] is the only one as the flexibility test for this purpose. They used two-dimensional drape tests with 20 g weight which was attached to the target ends and bending angle was reported as a measure of target flexibility, with larger angles indicating greater flexibility. However, this method depends on handicraft. It is inaccurate especially for lower bending angles and time-consuming. Therefore, in our study, a new rapid and simple to implement flexibility test setup was established by modifying the tensile test setup in Shimadzu AGS-J universal test machine based on the measurements of bending angle, which is a measure of target flexibility, with larger angles indicating greater flexibility. The flexibility test results for the aramid fabrics and STF impregnated aramid fabrics are presented in Table 4. No significant difference in flexibility between the aramid fabrics with and without impregnated STFs was observed. This indicates that the addition of STF causes a relatively small amount of change in the flexibility of aramid fabrics at low rates of deformation, as desired. Untreated aramid exhibited the highest flexibility with 24° bending angle. Bending angles of STF/aramid targets were observed to decrease with increasing silica concentration in STF as compared to aramid fabric.

Table 4. The flexibility test results for the aramid fabric and STF/aramid fabrics

Sample code	Bending at the edge of the sample (mm)	Bending angle, α (°)
Aramid fabric	45	24.23
STF5/aramid	43	23.26
STF10/aramid	41	22.29
STF15/aramid	40	21.8
STF20/aramid	38	20.8
STF25/aramid	37	20.3
STF30/aramid	36	19.8

4 Conclusion

This study reported the steady-shear rheological properties of fumed silica based STFs at different weight fractions and the stab resistances of aramid fabrics impregnated with STFs. Steady-shear rheological experiments demonstrated that with the addition of silica

nanoparticles into the PEG, shear thickening behavior was observed, and this response was more obvious at STFs with higher silica concentration. On the other hand, STF/aramid fabrics showed a significant enhancement in stab resistance as compared with untreated aramid. Both stab and rheological experiments show that increasing shear thickening response corresponds to increased stab performance in STF/aramid fabrics. Nevertheless, there was no significant difference between untreated aramid and STF/aramid targets in the matter of flexibility. As a conclusion, the impregnation of shear thickening fluids consisting 30% (w/v) of fumed silica onto the aramid fabrics resulted in the highest quasi-static and dynamic stab and ballistic resistances without negative effect on flexibility.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the support of BARIŞ Electrical Industry Inc. and Undersecretariat for Defence Industries of Turkey (SSM) for financial support.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate: %15

References

- [1] B.A. Cheeseman, T. A. Bogetti, Ballistic impact into fabric and compliant composite laminates, *Composite Structures*, 61 (1), 161-173, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(03\)00029-1](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(03)00029-1).
- [2] M. Decker, C. J. Halbach, C. H. Nam, N. J. Wagner, E. D. Wetzel, Stab resistance of shear thickening fluid (STF)-treated fabrics, *Composites Science and Technology*, 67 (3), 565-578, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.08.007>.
- [3] H. M. Rao, M. Hosur, J. Mayo, S. Burton, S. Jeelani, Stab Characterization of Hybrid Ballistic Fabrics, *Proceedings of the Annual Society for Experimental Mechanics Conference*, pp. 1-4, Albuquerque, New Mexico, USA, 2009.
- [4] V. B. C. Tan, T. E. Tay, and W. K. Teo, Strengthening fabric armour with silica colloidal suspensions, *International Journal of Solids and Structures*, 42 (5), 1561-1576, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2004.08.013>.
- [5] A. Srivastava, A. Majumdar, and B. Butola, Improving the impact resistance of textile structures by using shear thickening fluids: a review, *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 37 (2), 115-129, 2012. <https://doi.org/10.1080/10408436.2011.613493>.
- [6] Y. S. Lee, E. D. Wetzel, and N. J. Wagner, The ballistic impact characteristics of Kevlar® woven fabrics impregnated with a colloidal shear thickening fluid, *Journal of Materials Science*, 38 (13), 2825-2833, 2003. <https://doi.org/10.1023/A:1024424200221>.
- [7] Y. Duan, M. Keefe, T. A. Bogetti, B. Powers, Finite element modeling of transverse impact on a ballistic fabric, *International Journal of Mechanical Sciences*, 48 (1), 33-43, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ijmeccsi.2005.09.007>.
- [8] A. Srivastava, A. Majumdar, and B. S. Butola, Improving the impact resistance performance of Kevlar fabrics using silica based shear thickening fluid, *Materials Science and Engineering: A*, 529, 224-229, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.09.021>.
- [9] H. Barnes, Shear-thickening (“Dilatancy”) in suspensions of nonaggregating solid particles dispersed in Newtonian liquids, *Journal of Rheology*, 33 (2), 329-366, 1989, <https://doi.org/10.1122/1.550017>.
- [10] Y. S. Lee and N. J. Wagner, Dynamic properties of shear thickening colloidal suspensions, *Rheologica Acta*, 42 (3), 199-208, 2003. <https://doi.org/10.1007/s00397-002-0290-7>.
- [11] T. J. Kang, C. Y. Kim, and K. H. Hong, Rheological behavior of concentrated silica suspension and its application to soft armor, *Journal of Applied Polymer Science*, 124 (2), 1534-1541, 2012. <https://doi.org/10.1002/app.34843>.
- [12] E. D. Wetzel, Y. S. Lee, R. G. Egres, K. M. Kirkwood, J. E. Kirkwood, and N. J. Wagner, The effect of rheological parameters on the ballistic properties of shear thickening fluid (STF)-Kevlar composites. *AIP Conference Proceedings*, 712, 288-293, 2004. <https://doi.org/10.1063/1.1766538>.
- [13] D. P. Kalman, J. B. Schein, J. M. Houghton, C. H. N. Laufer, E. D. Wetzel, and N. J. Wagner, Polymer dispersion based shear thickening fluid-fabrics for protective applications. *Proceedings of SAMPE*, pp. 1-9, Baltimore, 2007.
- [14] N. Kagei, D. Kanie, and M. Kawaguchi, Viscous fingering in shear thickening silica suspensions. *Physics of Fluids*, 17 (5), 054103, 2005. <https://doi.org/10.1063/1.1894407>.
- [15] T. A. Hassan, V. K. Rangari, and S. Jeelani, Sonochemical synthesis and rheological properties of shear thickening silica dispersions, *Ultrasonics sonochemistry*, 17 (5), 947-952, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.02.001>.
- [16] J. R. Melrose and R. C. Ball, “Contact networks” in continuously shear thickening colloids, *Journal of Rheology*, 48 (5), 961-978, 2004. <https://doi.org/10.1122/1.1784784>.
- [17] R. Hoffman, Discontinuous and dilatant viscosity behavior in concentrated suspensions. I. Observation of a flow instability, *Transactions of The Society of Rheology*, 16 (1), 155-173, 1972. <https://doi.org/10.1122/1.549250>.
- [18] W. H. Boersma, J. Laven, and H. N. Stein, Shear thickening (dilatancy) in concentrated dispersions. *AIChE Journal*, 36 (3), 321-332, 1990. <https://doi.org/10.1002/aic.690360302>.
- [19] N. J. Wagner and J. F. Brady, Shear thickening in colloidal dispersions, *Physics Today*, 62 (10), 27-32, 2009. <https://doi.org/10.1063/1.3248476>.
- [20] R. P. Chhabra and J. F. Richardson, *Non-Newtonian Flow and Applied Rheology: Engineering Applications*, Butterworth-Heinemann, 2011.
- [21] M. J. Decker, C. J. Halbach, C. H. Nam, N. J. Wagner, and E. D. Wetzel, Stab resistance of shear thickening

- fluid (STF)-treated fabrics, *Composites Science and Technology*, 67 (3), 565-578, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.08.007>.
- [22] W. Li, D. Xiong, X. Zhao, L. Sun, and J. Liu, Dynamic stab resistance of ultra-high molecular weight polyethylene fabric impregnated with shear thickening fluid. *Materials & Design*, 102, 162-167, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.006>.
- [23] X. Feng, S. Li, Y. Wang, Y. Wang, and J. Liu, Effects of different silica particles on quasi-static stab resistant properties of fabrics impregnated with shear thickening fluids. *Materials & Design*, 64, 456-461, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.060>.
- [24] D. P. Kalman, R. L. Merrill, N. J. Wagner, and E. D. Wetzel, Effect of particle hardness on the penetration behavior of fabrics intercalated with dry particles and concentrated particle– fluid suspensions, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 1 (11), 2602-2612, 2009. <https://doi.org/10.1021/am900516w>.
- [25] Standard, N., 0115.00, Stab Resistance of Personal Body Armor. US Department of Justice, Office of Justice Programs, National Institute of Justice, 2000.
- [26] G. Bossis and J. F. Brady, The rheology of Brownian suspensions. *The Journal of Chemical Physics*, 91 (3), 1866-1874, 1989. <https://doi.org/10.1063/1.457091>.
- [27] J. Bender and N. J. Wagner, Reversible shear thickening in monodisperse and bidisperse colloidal dispersions, *Journal of Rheology*, 40 (5), 899-916, 1996. <https://doi.org/10.1122/1.550767>.
- [28] M. Chellamuthu, E. M. Arndt, and J. P. Rothstein, Extensional rheology of shear-thickening nanoparticle suspensions, *Soft Matter*, 5 (10), 2117-2124, 2009. <https://doi.org/10.1039/B820684H>.





Assessment of hazards and risks in glass products production and processing business during the pandemic

Pandemi sürecinde cam ürünleri üretim ve işleme işletmelerinde tehlike ve risklerin değerlendirilmesi

İhsan Ateş^{1,*}, Serdar Salman², Yahya Bozkurt³

¹ Department of Occupational Safety, Institute of Science, Marmara University, Istanbul, Turkey

^{2,3} Department of Metallurgical and Materials Engineering, Faculty of Technology, Marmara University, Istanbul, Turkey

Abstract

In this study, the hazards in a medium-sized enterprise engaged in production and processing of glass products in Turkey and the risks they pose are identified. Then, using cross-sectional research, a physical, chemical and biological risk report was created by L-type matrix method. During this reporting, hazards caused by Covid-19, which has been declared as pandemic by World Health Organization and became the biggest health problem in the world today, and regulatory and preventive actions that can be taken against these hazards are widely covered. The aim of the study is to contribute to the industry in terms of taking measures against occupational accidents and diseases.

Anahtar kelimeler: Glass industry, Occupational safety, Hazard, Risk analysis, Covid-19, Pandemi

1 Introduction

Throughout their journey of survival in the cycle of life, people have to perform some certain actions mandated by the life itself such as working, producing, having fun and exercising. Observed in every aspect of life, the role and the significance of “safety” in working life date back to the beginning of the mechanized industrialization in Europe during the 18th and 19th centuries. As a result of the analysis of the occupational accidents and diseases experienced at the beginning of the industrialization era, certain measures taken to prevent the recurrence of such have lead the process to a reactive course of actions. Taking the occupational accidents and occupational diseases occurring through the course of the mechanization process into consideration, the concept of occupational safety becomes prominent and have lead into changes in design of the machines. Every change brings about the prevention culture and the process is ensured to be proactive. When industrialization in the world is analyzed, from the very beginning until today, the concept of safety culture has developed through its natural course and works have been conducted in order to create a safe working environment in light of technological advances [1].

Occupational Health and Safety (OHS) has taken its place among important concepts of today’s business life. Works conducted and steps taken in the OHS field have

Özet

Bu çalışmada, Türkiye’de cam ürünleri üretimi ve işlemesi yapan orta ölçekli bir işletmedeki tehlikeler ve bunların oluşturduğu riskler tespit edilmiştir. Daha sonra kesitsel araştırma kullanılarak L tipi matris yöntemi ile fiziksel, kimyasal ve biyolojik bir risk raporu oluşturulmuştur. Bu raporlama sırasında Dünya Sağlık Örgütü tarafından pandemi ilan edilen ve bugün dünyanın en büyük sağlık sorunu haline gelen Covid-19’un neden olduğu tehlikeler ve bu tehlikelere karşı alınabilecek düzenleyici ve önleyici tedbirler geniş kapsamlı olarak ele alınmaktadır. Çalışmanın amacı, iş kazası ve meslek hastalıklarına karşı önlem alma konusunda sektöre katkı sağlamaktır.

Keywords: Cam endüstrisi, İş güvenliği, Tehlike, Risk analizi, Covid-19, Pandemi

positive impacts on the change in safety culture. OHS professionals focus on adult training and habit-breaking subjects, thus making significant contributions to the awareness-raising and the improvement of safety culture levels of employees. The involvement of workers in activities such as trainings, improper implementations detected during audits, risk assessments of workers plays an active role in the prevention of occupational accidents and diseases. With the OHS Law no. 6331 (OHSL) going into effect, OHS-related works conducted almost in all industries in Turkey have accelerated, and statistics have started to be followed on a sectoral basis. Following the enforcement of OHSL no. 6331, reactive methods have been replaced by proactive methods. Proactive approach is a system that aims to prevent possible accidents and diseases by determining the hazards in the activities carried out in the work environment in advance. As an output of this system, it is aimed to take measures against the risks posed by hazards in the work environment analyzed, and to prevent the possible accidents and diseases by analyzing in advance. There are many different methods developed and implemented in terms of hazard and risk identification. As a result of the implementation of these methods, a corrective and preventive approach was adopted rather than a prescriptive approach [2].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ihsanates@hotmail.com (İ. Ateş)

Geliş / Recieved: 04.02.2021 Kabul / Accepted: 16.03.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.874295

As of 1990s, numerous studies have been conducted in terms of hazards and risks which may be encountered by glass industry workers. Some of these studies have been conducted on the risk of cancer among glass factory workers [3], occupational glass injury risk of bar staff [4], diabetic and arsenic-based health problems of artistic glass workers [5-8], injuries at glass bottle production facilities [9], exposure to occupational styrene in glass fiber reinforced plastic industry and skin diseases [10, 11], review and meta-analysis of risks related to rockwool and glass wool exposure of lung, head and neck cancers [12].

Glass industry with all of its sub-industries is a sector in hazardous and very hazardous class due to chemical raw materials, work equipment used during production, Covid-19 which has become today's biggest health problem as well as physical, chemical and biological hazards, and it harbors significant hazards and relevant risks in terms of OHS. In this study; hazards within the work environments of glass and glass product enterprises, the risks they may create are identified, risk analysis of the enterprise is created using L-type matrix risk assessment method, and recommendations and actions required for measures to be taken are defined.

2 Glass and glass products industry

Glass is one of the oldest forms of artificial materials discovered by humankind. During the prehistoric ages, humans used volcanic glass, found in nature, to construct arrowheads and cutting tools although they did have the knowledge of how glass was produced. The first glass produced by humans is thought to be the beads made in Mesopotamia and Egypt in 2500 BC [13].

While almost all kinds of glass products were handcrafted until the end of the 19th century [14], today, all glassworks except certain special parts are produced by machines. Glass, thanks to its natural state of transparency, constant volume, odorless and tasteless form, and resistance to numerous chemicals is an industrial field that provides input to almost all industries such as food, beverage, medicine, cosmetics, architecture, health, automotive,

construction, communication, white goods, machinery, furniture, electric-electronics and glassware.

Glass industry production capacity in Turkey is approximately 3.5 million tons. The industry, supplying almost all of its production inputs from domestic sources, is obliged to maintain its energetic, intensive and high-capacity operation activities with its production value of approximately 2 billion dollars and 20 thousand employees [15].

3 Place of glass and glass products production in Turkey

Turkish Glass Industry, founded in 1934 upon the order of Atatürk, has increased its production capacity day by day in parallel with technological advances, and become one of the most significant branches of Turkish manufacturing industry today thanks to its product quality, increasing export figures and being an industry, which supplies all of its production inputs from domestic sources.

5-years import and export figures for glass and glassware products are given below. Turkey's top export items are tableware, ornaments, flat glass and fibers. According to 2023 Export Strategy of Turkey Exporters Assembly, 2023 export target for glass and glass products industry is 2.5 billion dollars [15]. It is estimated that global annual glass production capacity is approximately 180 million tons and has a value of approximately 130-140 billion dollars. Global glass industry grows between 2-4% on average every year based on the advances in the global economy. 53% of this belongs to glass packages, 29% to flat glass, 5% glass houseware, 2% to glass fiber and 11% to other products [15].

Table 1 shows glass and glass products import figures between 2013-2019. According to this, most of the imports are made from China. China is followed by Germany and Bulgaria. Import of glass items from China, solely, is more than the total of import from the subsequent countries.

Table 2 shows export figures of glass and glass products industry. Germany is in the first place, followed by Italy, USA and France. Despite ranking the first in 2015 and 2016, Italy dropped to the second place in 2017 and 2018.

Table 1. Countries from which Turkey imports glass products and import amounts (1000 USD) [16]

Imported Countries	Yearly Import Amounts						
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
China	237.581	238.476	223.749	202.222	185.235	164.474	146.118
Germany	78.179	84.057	71.809	73.456	80.100	85.832	79.225
Bulgaria	25.815	36.413	43.465	51.264	61.793	64.822	43.733
Italy	42.765	63.912	45.284	52.720	68.368	58.695	53.105
France	47.816	48.398	45.606	47.017	51.137	51.143	53.254
USA	32.341	37.881	42.858	39.434	50.253	47.058	37.270

Table 2. Countries to which Turkey exports glass products and export amounts (1000 USD) [16]

Exported Countries	Yearly Export Amounts						
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Germany	103.519	115.313	89.760	84.898	90.955	92.161	85.670
Italy	59.333	60.901	160.220	120.960	60.403	71.908	91.813
USA	38.801	46.765	42.870	42.688	44.023	47.717	53.796
France	57.537	55.265	59.654	49.842	42.902	47.543	50.705
United Kingdom	55.153	59.186	82.914	46.705	54.034	47.369	57.558
Israel	35.078	40.467	37.671	40.436	39.794	47.089	58.035

4 Risk assessment methods

The word “risk” derives from the words risq in Arabic or risicum in Latin [17]. According to [18], risk is the probability of not achieving a targeted result or probability of the occurrence of an undesired incident, and uncertainties are potential sources of risk [18]. Risk is an objective concept related to the uncertainty of occurrence of unwanted incidents [18]. Throughout years, various risk assessment models have been conceptualized in order to elucidate the concept of the safety risk assessment [19,20]. Through proactive approach, risk assessments are performed at enterprises in order to identify the risks and take the required measures before the accident occurs [21, 22].

Following are the different (qualitative, quantitative and mixed) risk assessment methods applied in calculation of risk score [23]:

- Process Hazard Analysis (PHA)
- Probabilistic Risk Assessment (PRA)
- Probabilistic Risk Assessment Using Checklist (PRA Using Checklist)
- Fine - Kinney Method
- Safety Audit
- Rapid Ranking Methodology
- Job Safety Analysis (JSA)
- Canonical-Correlation Analysis (CCA)
- Failure Mode and Effects Analysis Methodology (FMEA)
- Event Tree Analysis (ETA)
- What If Analysis (What If)
- Risk Assessment Decision Matrix Methodology (L-shaped, X-shaped)
- Risk Map
- Hazard Rating Method (DOW, MOND Index)
- Hazard and Operability Study Methodology (HAZOP)

4.1 L-type matrix method

Statistics of occupational diseases and accidents in the industry, field workers and OHS professionals are used in order to assess the hazards and risks encountered in glass and glass products production. In conclusion, it has been observed that employees are exposed to physical, chemical, biological, psychosocial, ergonomic hazards and risks along the line from the raw material preparation stage until the shipping process.

In L-type matrix risk assessment method, it is aimed to reach the risk score result by assessing the probability of the hazardous situation along with the impact of the damage. Corrective and preventive actions are implemented in accordance with the equivalent of the risk score, which is found as a result of mathematical multiplication of the values obtained, in the score table [14].

Values indicating the probability and severity of the incident or hazardous situation subject to the assessment are selected from Table 3, multiplied, and the result determines the risk score.

Table 3 indicates how to value and score the ranking/severity and the probability of risks when conducting a risk analysis. Risks that do not cause incapacity or require first aid are assessed as very light in terms of ranking/severity and scored 1, while situations that may require first aid or outpatient treatment are considered light and scored 2. Death and mass death events are ranked as very serious and scored 5. Probability of risks that almost never occur are defined as highly unlikely and given 1 as the score while risks that occur every day or once a week are identified as very likely and assessed with a score of 5.

4.2 Risk score assessment

Concepts to be used for risk score assessment can be defined as follows:

Risk: Probability of loss, injury or other harmful results caused by the hazard.

Risk Score: Value found as a result of mathematical multiplication of probability, frequency and severity.

Severity: Severity of results in case of an accident.

Hazard: Potential of causing loss or damage, either originating from the workplace itself or the outer environment, that may affect the worker or workplace [25].

Assessment of resultant risk [26] score is conducted according to Table 4 and Table 5, and corrective and preventive actions are taken. As seen in Table 4, risk score is obtained by multiplying risk rating/severity and probability values. For instance, score of a risk with moderate rating/severity and moderate probability is found to be $3 \times 3 = 9$. The score found is assessed as seen in Table 5. This table shows the rating of risk and the resulting assessment accordingly. The higher risk score, the more important the actions to be taken. If risk score is 25 as a result of the actions taken, it is assessed as “unacceptable risk”. In this case, required measures must be taken immediately, or it must be considered to close the facility, building and environment. If the risk score is between 1 and 5, it is considered as “probable risk” and observation practices continue

4.3 Identification of hazards and risks

Glass industry is in “very hazardous” class due to its production stages and the chemical substances used. Glass is broken or crushed during the raw material preparation stage and concentrated in blend preparation section. This is where, glass and other various alloy elements and chemical substances interfuse. Measures must be taken against chemical dusts that may be released in this process. Release of these dusts to the environment may cause lung disease. The blend in solid phase prepared during fusion stage is transformed to liquid phase and given the capability to change form. In this stage, various measures must be taken against thermal comfort conditions and chemical vapor. Materials coming out of the kiln are shaped by pressure or force in the forming unit, checked after cooling process, and sent to the warehouse. Each stage has its own specific hazards and risks [15].

Table 3. Table for rating/severity and probability values in risk analysis [24]

Ranking / Severity		Probability	
1 Very Light	Does not cause incapacity or require first aid.	1 Very Low	Not expected to occur during the process. Sufficient control is ensured. (Almost never)
2 Light	Situations that may require first aid, outpatient treatment.	2 Low	It is thought that the probability during the process is eliminated. Control system available. (Once in a few years)
3 Moderate	Injuries requiring treatment, inpatient treatment, short-term incapacity.	3 Moderate	Probable to occur during the process, however it is not expected. Its uncontrollability is a very slight probability. (Once or twice a year)
4 Serious	Sever injuries, loss of limb, occupational disease, continuous incapacity.	4 High	Likely to occur during the process. Its controllability is not certain, or controls might be limited and insufficient (Once a month)
5 Very Serious	Death, Mass Death.	5 Very High	Expected to occur during the process. No control system. (Once a week/Every day)

Table 4. Risk score assessment [24]

		Ranking / Severity				
		Very Serious 5	Serious 4	Moderate 3	Light 2	Very Light 1
Probability	Very High 5	Unacceptable 25	High 20	High 15	Moderate 10	Moderate 5
	High 4	High 20	High 16	Moderate 12	Moderate 8	Low 4
	Moderate 3	High 15	Moderate 12	Moderate 9	Moderate 6	Low 3
	Low 2	Moderate 10	Moderate 8	Moderate 6	Low 4	Low 2
	Very Low 1	Moderate 5	Low 4	Low 3	Low 2	Irrelevant 1

Table 5. Risk assessment results [24]

Risk Value	Risk Ranking	Risk Assessment Result
$x = 25$	1st Degree	Unacceptable risk required measures must be taken immediately / or it must be considered to close the facility, building and environment
$12 < x < 25$	2nd Degree	Very important risk must be improved in the short run (within a few months)
$6 < x < 15$	3rd Degree	Important risk must be improved in the long run (within the year)
$1 < x < 15$	4th Degree	Probable risk must be implemented under surveillance
$x = 1$	5th Degree	Unimportant risk measures are non-priority

Required safety measures must be taken for chemicals used in glass production, and material safety data forms (MSDSs) of chemicals must be obtained. Forced and natural ventilation systems must be used in areas where toxic chemicals which are harmful for respiration are processed, environmental measures must be performed in required intervals. Appropriate mask use must be ensured in sections where there is no sufficient ventilation and dusty areas. Combustible and caustic materials must not be placed in the same environment, employees must be trained against possible fires, and appropriate fire extinguishers must be provided. Noisy work areas must be isolated from other departments, and appropriate protective earpieces must be used by employees exposed to noise. Working hours of employees exposed to continuous loud noises must be

regulated and suitable resting breaks must be scheduled [27]. Appropriate personal protection gears must be provided and used in order to protect employees during processes where the glass is formed by blowing. Appropriate heatproof and noncombustible gloves must be provided to persons who are constantly exposed to high temperatures, and direct contact of eyes and skin with heat must be avoided. Employees must hydrate sufficiently and working hours must be regulated appropriately. Ventilation and cooling systems must be constructed suitably [28]. Relevant training must be provided, and suitable transport vehicles must be used in order to prevent accidents that may occur during the conveyance of materials. Appropriate gloves, clothes, and face protector's resistant to cutting must be used in order to be protected from "cutting" feature of broken glass, and

manual handling procedures must be replaced with automation system as much as possible [14].

4.4 Risk factors

When we take a look at the risks that may occur after the hazards arising within the scope of occupational health and safety, risk factors may be listed as follows [28]:

- **Physical risk factors:** Noise, vibration, lighting, heat, humidity, dusts, radiation, pressure, etc.
- **Chemical risk factors:** Mines, solvents, toxic gases, acid and alkalis, pesticides, plastic substances, dusts, etc.
- **Biological risk factors:** Bacteria, viruses, parasites, brucella, anthrax, plague, tularemia, etc.
- **Psychosocial risk factors:** Job security, future concerns, long working hours, work stress, severity, time pressure, job dissatisfaction, monotone work, rareness of resting breaks, etc.
- **Ergonomic risk factors:** Physiology of the work, heavy load handling and lifting, etc.

4.4.1 Physical risk factors

Valve actuator devices, mixer engines, vibrators, dust collectors and blowing machines operating with loud noises are machines that are frequently used in glass production. Workers who use or work in the vicinity of these machinery may experience loss of hearing due to noise when they are exposed to loud noise for a long time [29].

Since fusion process is generally conducted in closed-system furnaces, there are no employees in this section where this process takes place. However, since molten glass is taken out from kilns to be processed in enterprises conducting manual production, employees may be exposed to high temperatures [30]. Severe burns may occur on the skin due to high temperatures. Infrared lights may harm the eyes if measures are not taken, also the risk of cataract increases for people who are exposed to this heat for a long time. In addition, people who are exposed to high temperatures for a long time may experience heat strokes. Heat stroke may cause fatigue, drop in blood pressure, nausea, vomiting as well as fever, respiratory failure, and loss of consciousness in later stages. High temperature may also cause attention deficit of the employee and thus may lead to occupational accidents [31].

Since cooling process is performed on automated belts, the risks in this section are relatively less than others. However, noise exposure is also very high in this section.

Employees may experience musculoskeletal system disorders during packaging and transport of glasses produced with different forms and weights. In this section, especially glass shards pose risks. Also, there may be risks caused by forklifts and pallet trucks used for transport.

4.4.2 Chemical risk factors

There are numerous chemical compounds bearing features of glass. Breathing the air contaminated with the vapor of chemicals used in glass production such as silica, clay, limestone, aluminum oxide, and heavy metals might cause health-related hazards can cause health problems.

Paints used during changing the color of the glass vaporize more since they are applied on hot glass. Respiration of vaporized chemicals may cause pneumoconiosis and lung diseases. The risk of lung cancer increases in employees who have been exposed to vapors of chemicals for long years [31].

The process during which the glass is rapidly crashed to an abrasive and hard ground in order to smooth out or swell the glass surface is called blasting. During blasting, silica crystals are mixed into the air and may cause silicosis in lungs as a result of the air breathed. Heavy metals are added to the mixture used for production of frit and coloring of the frit. Respiration of the metal smoke may cause lead poisoning. A person who suffers from lead poisoning may experience anemia, headache and even coma and death in later stages. In glass material production where the glass is shaped by blowing, the blower may be exposed to chemical vapors. The blower may experience kidney function deformations and respiratory tract diseases such as bronchopneumonia and bronchitis as a result of inhaling metals such as mercury [32].

Despite majority of the process is performed by automated system in large-scale production factories, these kinds of exposures are experienced while taking samples from production, during repairment of system failures, and as a result of employee faults and unavoidable accidents.

4.4.3 Biological risk factors

In crowded enterprises where the number of employees is high, biological hazards are risk factors required to be taken into consideration. Biological agents include bacteria, viruses, fungi, other microorganisms and related toxins. These organisms which are (or products of) living creatures are generally found in natural environments such as water, soil, plants and animals. When talking about biological risk factors in working life, microorganisms, cell cultures and human parasites which may cause any infection, allergy or poisoning (including genetically modified ones) come to mind [33, 34].

European Directive 2000/54/CE classifies biological hazards (pathogens) into four groups based on infection risk level [35]:

Group 1: Unlikely to cause human disease;

Group 2: Can cause human disease and might be a hazard to workers; unlikely to spread to the community; there is usually effective prophylaxis or treatment available;

Group 3: Can cause severe human disease and present a serious hazard to workers; it may present a risk of spreading to the community, but there is usually effective prophylaxis or treatment available;

Group 4: Causes severe human disease and is a serious hazard to workers; it may present a high risk of spreading to the community; there is usually no effective prophylaxis or treatment available.

Under *Group 3*, Covid-19 pandemic, which is thought to be originated from Huanan Seafood and Live Animal Market in Wuhan city of Hubei state of China in December 2019 for the first time and has caused a pandemic

throughout the world, continues to pose vital threats [36]. These risks caused by the pandemic affect the whole world, thus negatively changing the working life in our country too. Certain hazards caused by Covid-19 and corrective and preventive actions that can be taken against these hazards are given in Table 6.

4.4.4 Psychosocial risk factors

It has been observed that identification and diagnosis of psychosocial risk factors in workplaces is difficult, it is challenging to access previous records, and even when accessed, very limited in Social Security Institution. It is difficult to diagnose occupational diseases based on psychosocial factors. Because, establishing causal relation between the disease and the work or the working environment, and understanding whether it is caused by the occupation is a rather difficult process compared to other diseases [37].

Psychosocial factors include subjects such as relationships between people in a workplace, relations of employees with each other, with foremen, headmen and directors, management form and remuneration policy of the workplace. Also, work stress and similar issues caused by heavy, repetitive and monotone works can be examined under this title. Primary psychosocial factors include stress, which is described as the disease of our age by certain circles, as well as conflicts and organizational factors (working hours, shifts, etc.) [38].

4.4.5 Ergonomic risk factors

Ergonomics is defined as designing workplaces, equipment, machinery, apparatus, products, environments and systems appropriate for the employee by optimizing the efficiency and effectiveness of work systems, taking into consideration physical, physiological, biomechanical and psychological characteristics of humans [39, 40].

5 Research methods and results

In this study, a medium-scale enterprise engaged in the production and processing of glass products in Turkey is examined cross-sectionally [41]. Prior to the study, a risk analysis team was established consisting of one head labor inspector, two class A occupational safety specialists, two class B occupational safety specialists, one workplace physician and employer representative, employee representative, head of the department, and supporting staff. Risk analysis methods were examined with team members, and the L-type matrix risk analysis method was preferred as the risk analysis method to be applied in the workplace. Information related to the L-type matrix risk analysis was conveyed to team members through training, afterwards, field inspections were conducted and required statistical

data was collected for a month. Near miss incidents and accident reports of the subject enterprise were examined in detail by team members. The findings obtained were assessed in accordance with the L-type matrix risk analysis method, and risk analysis of the firm was created. Required measures were taken, field observations were repeated, and risk analysis was revised following this risk analysis.

Table 6 identifies the hazard sources in the enterprise and reveals the risks that may be caused by these hazards. In the resulting risk analysis, 37 activities with the highest risk score are listed. Probability, severity, and risk scores are shown based on existing conditions in these cases. Priorities are detected based on scores, and recommendations about the measures to be taken are listed. Risk scores of activities numbered 1, 2, 3, 4, 5, 6 and 7 are found to be 25. Immediate measures must be taken for identified hazards. Risk scores of other activities given in the table are found to be 15-20. Recommendations are provided, and measures to be taken are identified also for these activities.

6 Conclusion

Hazards and risks based on physical, chemical and biological factors which the employees can be exposed to during the production process of an enterprise engaged in glass and glass products industry were identified. The risks identified were proactively assessed, and corrective and preventive measures were identified for each activity. Preventive and corrective actions identified for 37 activities with high risk scores as a result of the study must be immediately processed, and a probable unwanted situation must be prevented. Among the hazards identified in the table, it has been found that hazards such as pandemic, electrical panels, machinery, moving parts, working at height, chemical substances and fire had the highest risk scores. In order to prevent occupational accidents before they happen, measures required to be taken in terms of activities centered around people must be realized immediately. Therefore, actions must be taken with the motto "People First", and risks must be eliminated at source before they occur. In conclusion, the study conducted is significant as it constitutes a leading model for enterprises engaged in glass and glass products industry and scientists who will conduct studies in this field.

Acknowledgement

This research did not receive any specific funding.

Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.

Similarity Rate (iThenticate): 8%

Table 6. Risk assessment with L-type matrix method (P: Probability, S: Severity, RS: Risk score)

No	Department	Hazard	*Probability / **Risk	Current Situation	P	S	RS	Recommendations/Measures to be Taken
1	General	Coronavirus pandemic	*Exposure to coronavirus pandemic. **Infection, disability, death.	Covid-19 virus, which spreads very rapidly, has been declared a pandemic by World Health Organization (WHO).	5	5	25	Employees and visitors (37.5 C and above) must be prevented from entering the enterprise and referred to the nearest health institution. Infrared, contactless temperature meter must be used to take temperature at the enterprise.
2	General	PPEs which are not sufficient or appropriate for coronavirus pandemic and lack of disinfectants in stocks	*Exposure to coronavirus pandemic. **Infection, disability, death.	It has been found that masks are used, however are not replaced periodically.	5	5	25	It is required to increase stocks of masks (TS EN95, EN149, FFP2, FFP3), gloves (latex gloves, EN ISO 374-5), bleach, alcohol, cologne (80 degrees), hand disinfectants.
3	General	Not respecting individual safe distance or close contact due to coronavirus pandemic	*Exposure to coronavirus pandemic. **Infection, disability, death.	It has been found that employees do not respect social distance rules in the cafeteria.	5	5	25	In cases people are present collectively (trainings, meetings, dinners, etc.), procedures must be implemented to ensure that there is at least 1,5 m distance between employees.
4	General	Lack of hygiene training of employees	*Exposure to coronavirus pandemic. **Infection, disability, death.	It has been understood that the employees were not given required trainings in terms of pandemic process.	5	5	25	Hygiene training must be compulsory for employees, and employees who did not receive these trainings must not work.
5	General	Employees over 65 and with chronic diseases due to coronavirus pandemic	*Exposure to coronavirus pandemic. **Infection, disability, death.	Covid-19 virus, which spreads very rapidly, has been declared a pandemic by World Health Organization (WHO).	5	5	25	People over 65, individuals with chronic diseases, pregnant women, disabled individuals and employees who require special policies must be isolated (home office, leave, etc.)
6	General	Electrical Wiring	*Lack of insulating mat under the electrical panel / wetness under the panel. **Electric shock, serious injury, burn, death.	Required warning signs are not available.	5	5	25	Insulating mats must be placed under electrical panels in the enterprise. If wet floor cannot be dried, insulating mat must be positioned in a way to prevent contact of the insulating mat with water.
7	Electrical Panels	Electrical Wiring and Equipment	*Lack of leakage current relay **Electric shock, death.	Leakage current relay is defective.	5	5	25	Leakage current relays must be present at main boards (300Ma) and secondary boards (30Ma).
8	General	Not observing individual safe distance or close contact due to coronavirus pandemic, and lack of remote communication during meetings	*Exposure to coronavirus pandemic. **Infection, disability, death.	It has been detected that teleconference method is not used commonly for trainings and meetings.	4	5	20	Interviews and meetings must be conducted via remote communication.
9	Locker Rooms	Common Use Areas	*Employees becoming infected. **Spread of infection, disability, death.	It has been detected that there is no disinfection checklist in locker rooms.	4	5	20	Locker rooms must be disinfested periodically, and checklist must be marked.
10	Cafeteria	Common Use Areas	*Employees becoming infected. **Spread of infection, disability, death.	It has been detected that metal and class materials are used in the cafeteria.	4	5	20	Cafeterias must switch to plastic tray and packaged fork, spoon, water and bread system. Water, jug and salad bars must be covered or distributed by cafeteria personnel ensuring that 1,5 m distance is preserved.

Table 6. (Continued)

No	Department	Hazard	*Probability / **Risk	Current Situation	P	S	R S	Recommendations/Measures to be Taken
11	General	Machinery and equipment used in common	*Employees becoming infected. **Spread of infection, disability, death.	Covid-19 virus, which spreads very rapidly, has been declared a pandemic by WHO.	4	5	20	Machinery and equipment must be disinfested periodically.
12	General	Machinery	*Lack of instructions of use for machinery. **Serious injury, long-term treatment.	Machines lack instructions of use.	5	4	20	Machines without instructions must not be used and instructions must be prepared immediately
13	Shipping	Working at height	*Lack of guardrails on the side of ramps. **Falling from height, serious injury.	There are no guardrails on the sides of ramps despite the area is suitable for guardrail construction.	5	4	20	The area around the ramps that would cause falling from height must be covered 50 cm – 100 cm from the ground with guardrail protection.
14	Shipping	Moving vehicles and machinery (Shipping area)	*Lack of protective enclosures of ramp pistons. **Jamming of limbs, serious injury.	Ramp pistons do not have protective enclosures.	5	4	20	Ramp pistons must be supported with protective enclosures, and manual interventions of personnel must be prevented.
15	Empty Tube Storage Area	Explosion (Empty tube stock area)	*Doors being open, tubes being not fixes. **Explosion, serious injury, death.	Tubes are not fixed separately as empty-full.	4	5	20	Tubes in empty tube area must be fixed and its door must be kept locked.
16	Waste Area	Electricity (Fuse box)	*Lack of electric panel cover. **Electric shock, severe injury, burn, death.	Cover of electric panel is not mounted.	4	5	20	Fuse box cover must be mounted in order to ensure that it is not affected from possible weather conditions.
17	Roof	Working at height (Roof climbing area)	*Lack of lock at the stairs. **Falling from height, injury, death.	The stair has a lock mechanism but is not locked.	4	5	20	The stairs used to climb to the roof outside the factory must be locked in order to prevent it from being used by unauthorized personnel without safety measures.
18	General	Coronavirus pandemic, inappropriate conditions for hand hygiene	*Exposure to coronavirus pandemic. **Infection, disability, death.	It has been found that there is sufficient amount of liquid soap at toilets. It has been detected that alcohol-based disinfectants are not present in every area.	4	5	20	Attention must be paid to hand hygiene, hands must be washed with soap and water for at least 20 seconds, and hand sanitizers with 70-80% alcohol concentration must be used when there is no soap and water.
19	General	Social and individual behaviors due to coronavirus pandemic	*Exposure to coronavirus pandemic. **Infection, disability, death.	It has been found that social communication among employees is not appropriate for pandemic prevention rules.	4	5	20	Shaking hands and kissing must be prohibited; employees must avoid touching their mouths, noses and eyes with dirty hands; mouth and nose must be covered by single-use napkin when coughing and sneezing, and inside of the elbow must be used if there is no napkin to be used.
20	General	Lack of hygiene equipment among coronavirus measures	*Exposure to coronavirus pandemic. **Infection, disability, death.	Covid-19 virus, which spreads very rapidly, has been declared a pandemic by WHO.	4	5	20	All equipment requiring hygiene (glasses, towels, etc.) must be personal and not used in common. Manual washing must be avoided, and dishes must be washed in the dishwasher.
21	General	Emergencies (Explosion, fire, etc.)	*Emergency lights are insufficient. **Serious injury, long-term treatment.	Emergency lights are insufficient.	4	4	16	Emergency lights must be installed in locations with deficient lighting.
22	General	Fire	*Insufficient number of fire extinguishers. **Fire, serious injury.	There are no fire extinguishers in certain areas marked with signs.	4	4	16	Fire extinguishers in areas marked with signs must be completed.

Table 6. (Continued)

No	Department	Hazard	*Probability / **Risk	Current Situation	P	S	R S	Recommendations/Measures to be Taken
23	General	Fire	*Smoke sensor systems not operating. **Fire, serious injury.	Some smoke sensors are defective.	4	4	16	Smoke sensor systems must be checked and replaced (if necessary) in periodic intervals.
24	General	Fire	*Fire alarm buttons not operating. **Fire, serious injury.	The fire alarm button in the storage department is not working.	4	4	16	Fire alarm buttons must be checked and made operational in periodic intervals.
25	General	Moving vehicles and machines	*Lack of iron guardrail in the front part of the pallet truck. **Serious injury, long-term treatment.	There is no iron guardrail in the front part of the pallet truck.	4	4	16	Appropriate guardrails must be installed on the front part of the pallet truck.
26	Shipping	Chemical substances	*Lack of MSDS forms of chemicals used. **Serious injury, burn, occupational disease.	There are no MSDS forms for chemical substances where they are stored.	4	4	16	MSDS data sheets of all chemical substances must be hang where the chemical substances are stored at.
27	Shipping	Chemical substances	*Insufficient ventilation. **Occupational disease.	Insufficient ventilation in serigraphy section.	4	4	16	Ventilation in serigraphy section must be reinforced according to standards.
28	C Line	Chemical substances suspended in the air	*Insufficient ventilation. **Occupational disease.	Ventilation is not sufficient in C line section.	4	4	16	Ventilation system in C line press section must be reinforced according to standards.
29	C Line	Faulty storage (Feeding point)	*Not using the apparatus to prevent falling of glasses. **Serious injury, long-term treatment due to falling of glasses.	Employees do not use the apparatus to prevent falling of glasses despite they are available.	4	4	16	Employees must be trained in terms of using the apparatus to prevent falling of glasses as well as providing required warnings/notices.
30	A Line	Moving vehicles and machines (piston in the corner turning point in line A)	*Not using protective enclosures of machinery and equipment. **Jamming of limbs, serious injury.	Protective enclosures of the machine are not used.	4	4	16	Awareness trainings must be provided to employees in order to prevent jamming of limbs of personnel in the movement area of the pistons.
31	New Panel Department	Moving vehicles and machines (Rinsing machine)	*Not using protective enclosures of machinery and equipment. **Serious injury, long-term treatment.	The machine does not have protective enclosures.	4	4	16	The new board rinsing line must be enclosed with fence to prevent possible accident risks.
32	Rohmer	Moving vehicles and machines (Rohmer machine)	*Not using protective enclosures of machinery and equipment. **Serious injury, long-term treatment.	The machine does not have protective enclosures.	4	4	16	Rohmer machine must be enclosed with fence to prevent unauthorized intervention.
33	Pressing Room	Chemical substances suspended in the air	*Insufficient ventilation. **Occupational disease.	Ventilation system is not sufficient.	4	4	16	Appropriate ventilation system must be installed in board press chamber.
34	General	Crash (Walkways inside the factory)	*Deformation on paints of walkways and forklift ways. **Serious injury, long-term treatment.	Paints of walkways and forklift ways are faded.	4	4	16	Walkways and forklift ways must be painted and made apparent.
35	Maintenance Department	Moving vehicles and machines (Spiral machine)	*Protective enclosure of the machinery equipment not being mounted. **Serious injury.	The machine has protective enclosures, but not mounted.	4	4	16	Protective enclosure must be mounted on the spiral machine, and machine equipment without protective enclosures must not be operated.
36	Production	Moving vehicles and machines	*Cutting tools and equipment left in the open. *Injury due to cuts.	Protective handles are available, but not mounted.	5	3	15	Use of cutting equipment without protective handles must be prevented, and the personnel must be informed.
37	A-B End-of-Line Pressing 2	Electricity	*Dripping of water from the discharge system of the air conditioner next to the electrical board. *Electric shock, serious injury, burn.	The water dripping from discharge hose of the air conditioner causes the insulating mats under the electric boards to lose their functions.	5	3	15	Discharge hose of the air conditioner must be checked to prevent leakage.

References

- [1] B. O. Alli, *Fundamental Principles of Occupational Health and Safety* (2nd ed.). International Labor Organization, Geneva, 2008.
- [2] Sayı: 28512, İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirmesi Yönetmeliği. Resmi Gazete, 29 Aralık 2012.
- [3] R. Sankila, S. Karjalainen, E. Pukkala, H. Oksanen, T. Hakulinen, L. Teppo and M. Hakama, Cancer risk among glass factory workers: an excess of lung cancer. *Occupational and Environmental Medicine*, 47(12), 815-818, 1990. <https://doi.org/10.1136/oem.47.12.815>
- [4] J. P. Shepherd, M. R. Brickley, D. Gallagher and R. V. Walker, Risk of occupational glass injury in bar staff. *Injury*, 25(4), 219-220, 1994. [https://doi.org/10.1016/0020-1383\(94\)90064-7](https://doi.org/10.1016/0020-1383(94)90064-7)
- [5] G. Wingren and O. Axelson, Epidemiologic studies of occupational cancer as related to complex mixtures of trace elements in the art glass industry. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 19(1), 95-100, 1993.
- [6] M. Rahman, G. Wingren and O. Axelson, Diabetes mellitus among Swedish art glass workers—an effect of arsenic exposure?. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 22(2), 146-149, 1996.
- [7] D. Bartoli, G. Battista, M. De Santis, T. E. Iaia, D. Orsi, M. Tarchi and M. Valiani, Cohort study of art glass workers in Tuscany, Italy: mortality from non-malignant diseases. *Occupational Medicine*, 48(7), 441-445, 1998. <https://doi.org/10.1093/occmed/48.7.441>
- [8] R. Pirastu, D. Bartoli, G. Battista, M. De Santis, T. Iaia, D. Orsi and M. Valiani, Cancer mortality of art glass workers in Tuscany, Italy. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 24(5), 386-391, 1998.
- [9] J. Bazroy, G. Roy, A. Sahai and M.B. Soudarssanane, Magnitude and risk factors of injuries in a glass manufacturing plant. *Environmental and Occupational Health Practice*, 45(1), 53-59, 2003. <https://doi.org/10.1539/joh.45.53>
- [10] K. Tarvainen, R. Jolanki, L. Forsman-Grönholm, T. Estlander, P. Pfäffli, J. Juntunen and L. Kanerva, Exposure, skin protection and occupational skin diseases in the glass-fibre-reinforced plastics industry. *Contact Dermatitis*, 29(3), 119-127, 1993. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0536.1993.tb03508.x>
- [11] J. G. M. Van Rooij, A. Kasper, G. Triebig, P. Werner, F. J. Jongeneelen and H. Kromhout, Trends in occupational exposure to styrene in the European glass fibre-reinforced plastics industry. *Annals of Occupational Hygiene*, 52(5), 337-349, 2008. <https://doi.org/10.1093/annhyg/men020>
- [12] L. Lipworth, C. La Vecchia, C. Bosetti and J. K. McLaughlin, Occupational exposure to rock wool and glass wool and risk of cancers of the lung and the head and neck: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 51(9), 1075-1087, 2009. <https://doi.org/10.1097/jom.0b013e3181b35125>
- [13] K. Cummins, *Techniques of Kiln-Formed Glass* (1st ed.). University of Pennsylvania Press, Philadelphia, 1997.
- [14] E. Çakmak, Atölye tipi üretim yapan sanayi işletmelerinde iş sağlığı ve güvenliği. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Eğitim Uzmanlığı Tezi, T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Ankara, Türkiye, 2014.
- [15] Meslek Hastalıkları ve İş ile İlgili Hastalıklar Tanı Rehberi. T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Ankara, 2011.
- [16] Türkiye Cam ve Cam Ürünleri Sanayi Meclisi Sektör Raporu. Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği, Ankara, 2012.
- [17] ITC-TRADE MAP, Trade statistics for international business development. https://www.trademap.org/country_selproductcountry_ts.aspx?nvpm=1%7c792%7c%7c%7c%7c70%7c%7c%7c2%7c1%7c1%7c2%7c1%7c2%7c1%7c1, Accessed 3 February 2021.
- [18] R. Lay and G. Strasser, Risk Management of Complex, Technology Based Systems: Observations on similarities and differences. in *Risk Assessment and Management. Advances in Risk Analysis*, vol 5. L. B. Lave, (Eds.) Boston: Springer, 179-188, 1987. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-6443-7_20
- [19] J. Ansell and F. Wharton, *Risk Analysis Assessment and Management*. John Wiley & Sons, West Sussex, 1992.
- [20] E. V. Tarasova, E. N. Nikulina, E. Nikolaevna and N. V. Moskvicheva, Analysis of risk assessment methods of innovative projects. *Revista Espacios*, 38(49), 18-34, 2017.
- [21] S. Tweneboah-Koduah and W. J. Buchanan, Security risk assessment of critical infrastructure systems: A comparative study. *The Computer Journal*, 61(9), 1389-1406, 2018. <https://doi.org/10.1093/comjnl/bxy002>
- [22] M. Ersoy, M. Y. Çelik, L. Yeşilkaya and O. Çolak, Combination of Fine-Kinney and GRA methods to solve occupational health and safety problems. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34(2), 751-770, 2019. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416534>
- [23] A. Oulehlová, Risk management of hazardous activities in the Czech Republic. *Védelem Tudomány - IV. évfolyam, Iparbiztonság Különszám*, 2019(2), 1-28, 2019.
- [24] A. Özçelik, İş sağlığı ve güvenliğinde Kinney yöntemiyle risk yönetimi: Mermer işletmesi örneği. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, 2013.
- [25] Ö. Özkılıç, İş Sağlığı ve Güvenliği, Yönetim Sistemleri ve Risk Değerlendirme Metodolojileri. Türkiye İşverenler Sendikası Konfederasyonu (TİSK), Ankara, 2005.
- [26] Sayı: 28339, İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu. Resmi Gazete, 30 Haziran 2012.
- [27] Yayın No:140, 5 Adımda Risk Değerlendirmesi. T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Ankara, 2007.
- [28] A. Navidian, Z. Rostami and N. Rozbehani, Effect of motivational group interviewing-based safety education

- on workers' safety behaviors in glass manufacturing. BMC Public Health, 15(1), 929, 2015. <https://doi.org/10.1186/s12889-015-2246-8>
- [29] E. Ocaktan, İşçilerin sağlığı ve güvenliği için meslek hastalıkları, eğitim ve atölye. II. Sağlık Ekonomisi Kongresi, sayfa 11-15, Ankara, Türkiye, 4-5 Aralık 2014.
- [30] K. Çınar, Cam üretim sektöründe termal konfor şartlarının değerlendirilmesi. İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Ankara, 2016.
- [31] J. Bender, J. G. Hadley, J. P. Hellerstein and C. M. Hohman, Glass, pottery and related materials. Encyclopedia of Occupational Health and Safety, 225-263, 2011.
- [32] Meslek Hastalıkları ve İş ile İlgili Hastalıklar Tanı Rehberi. T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Ankara, 2011.
- [33] G. Ekuklu, A. Saltık and M. Yaman, Industrial dust problem due to total dust measurement in glass factory environment in Kırklareli. Working Environment Journal, 39, 13-20, 1998.
- [34] Ş. T. Azgın, N. Kekeçoğlu and E. Yamac, Evaluation of the air quality and CO₂-equivalent change of Kayseri during the Covid-19 outbreak. NOHU Journal of Engineering Sciences, 10(1), 9-15, 2021. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.811079>
- [35] I. F. Zulheir, Encyclopaedia of Occupational Health and Safety (4th ed.). International Labor Organization, Geneva, 1998.
- [36] E-Fact 53-Risk Assessment for Biological Agents. European Agency for Safety and Health at Work (EU-OSHA), 2010.
- [37] Ç. Üstün and S. Özçiftçi, Effects of Covid-19 pandemic on social life and ethical plane: An evaluation study. Anatolian Clinic the Journal of Medical Sciences, 25(1), 142-153, 2020. <https://doi.org/10.21673/anadoluklin.721864>
- [38] H. Akarsu, B. Ayan, E. Çakmak, B. Doğan, D. Boz Eravcı, E. Kahraman and D. Koçak, Relationship between psychosocial risk factors in the workplace and work related disease, occupational disease and work accident. Journal of Social Insurance, 14, 28-62, 2018. <https://doi.org/10.21441/sguz.2018.68>
- [39] M. N. İlhan, Occupational Health and Safety. Ataturk University Open Education Faculty, Erzurum, 2015.
- [40] M. P. Rowan and C. P. Wright, Ergonomics is good for business. Work Study, 43(8), 7-12, 1994. <https://doi.org/10.1108/EUM000000004015>
- [41] J. E. Fernandez, Ergonomics in the workplace. Facilities, 13(4), 20-27, 1995. <https://doi.org/10.1108/02632779510083359>





Covid-19 ile mücadelede bitkilerin olası rolü

The possible role of plants in combating Covid-19

Begüm Güler^{1*}, Meltem Bayraktar², Aynur Gürel³

¹ Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyomühendislik Anabilim Dalı, 35040, İzmir Türkiye

² Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Genetik ve Biyomühendislik Bölümü, 40100, Kırşehir, Türkiye

³ Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomühendislik Bölümü, 35040, İzmir Türkiye

Özet

2019 yılının sonlarına doğru Çin'in Wuhan eyaletinde başlayan ve hızla yayılan Covid-19 pandemisi ile tüm dünyada yaşam durma noktasına gelmiş çok sayıda insan hayatını kaybetmiştir. Varolan kriz araştırmacıları süratli çözüm bulmaya yönlendirmiş ve farklı araştırma konularında çalışmalara başlanmıştır. SARS ve MERS salgınları sırasında kullanılan tedavi yöntemleri hastaların iyileştirilmesinde yetersiz kalmış ve tam etkili protokollerin geliştirilmesi amacıyla farklı kaynaklar araştırılmaya başlanmıştır. Bu kaynaklardan birisi olan bitkiler, farklı biyoteknolojik yollar aracılığıyla aşı üretiminde kullanılabilecekleri gibi, sahip oldukları sekonder metabolitler nedeniyle tedavi amaçlı olarak da değerlendirilmektedir. Bitkilerin çeşitli viral hastalıkların tedavisinde daha önceki salgınlarda da kullanıldığı, güvenli, hızlı ve etkili bir çözüm yolu sunabildikleri gösterilmiştir. Bitkilerin aşı ve antiviral proteinlerin üretimleri için biyoreaktör olarak kullanımları, kitlesel üretilmeye izin verecek nitelikte ucuz bir tekniktir. Bitkiler sahip oldukları sekonder metabolitlerin gösterdikleri antiviral etki ile virüslerle mücadelede etkili araçlar olarak kabul edilebilirler. Gerçekleştirilen bu derlemede tüm dünyada kitlesel bir sağlık krizine neden olan SARS-CoV-2 virüsü ile ilgili genel bilgiler verildikten sonra, viral salgınlarda aşı üretim yöntemleri, bitkilerden elde edilen aşılarda, yenibilir aşılarda Covid-19 aşısı olarak kullanım potansiyelleri ve bitki sekonder metabolitlerinin antiviral etkilerinin salgının kontrolündeki rolleri üzerine bilgiler özetlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Koronavirüs, Covid-19, Bitkiler, Aşı, Sekonder metabolit

1 Giriş

Covid-19 pandemisi, 2019 yılının sonlarına doğru başlayan ve ilerleyen dönemde tüm dünyayı saran en önemli sağlık krizlerinden biridir. Salgın; sağlık sektörünün yanı sıra, ekonomik piyasalarda ve sosyal yaşamda da ciddi krizlere yol açmıştır [1, 2]. Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ), Covid-19'u yüksek bulaşma oranı ve belirli aşılarda ya da tedavi edilecek ilaçların bulunmaması nedeniyle, bir pandemi olarak ilan etmiştir [3, 4]. Özellikle bulaşıcılık potansiyelinin yüksek olmasından dolayı, hastanelerdeki yoğunluklar ciddi oranlara ulaşmış ve tüm dünyadaki bilim insanları çözüm

Abstract

With the Covid-19 pandemic that started in Wuhan province of China towards the end of 2019 and spread rapidly, many people around the world lost their lives. Existing crisis has led researchers to find solutions quickly and studies on different research topics have been initiated. The treatment methods used during the SARS and MERS epidemics were insufficient in treatment of patients, and different resources have been sought in order to develop a fully effective protocols. Plants, one of these sources, can be used in vaccine production through different biotechnological ways, and secondary metabolites of plants can also be evaluated for therapeutic purposes. It has been shown that plants have been used in the treatment of various viral diseases in previous epidemics and that they can offer a safe, fast and effective solution. The use of plants as bioreactors for the production of vaccine and antiviral proteins is an inexpensive technique that allows mass production. Plants are regarded as effective means of combating viruses with the antiviral effect of their secondary metabolites. In this review, after giving general information about the SARS-CoV-2 virus, which causes a massive health crisis all over the world, information about vaccine production methods in viral epidemics, vaccines which obtained from plants, potential use of edible vaccines as Covid-19 vaccine and roles of antiviral effects of plant secondary metabolites in the control of the epidemic are summarized.

Keywords: Coronavirus, Covid-19, Plants, Vaccine, Secondary metabolite

üretmek üzere kolları sıvamışlardır. Çalışmalar; genel olarak taşıyıcıların hızlı tespitinin sağlanması, hastaların tedavisine yönelik uygun antiviral ilaçların üretilmesi ve popülasyonun maruz kalmayan kısmını korumak için uygun aşının geliştirilmesi üzerine odaklanmıştır [5]. Bu süreç içerisinde de dünya genelinde hükümetler, sosyal teması azaltmak adına ülke çapında karantina uygulamalarına gitmiş, bir araya gelişler azaltılmaya çalışılmış ve maske takmak teşvik edilmiştir. Hijyen kuralları kapsamında alınan bu önlemler ile kısmi de olsa yayılma yavaşlatılmıştır [6].

Virüs hakkında; bulaşma şekli, morfolojisi ve diğer ayrıntılı bilgiler hızla ortaya çıkarken, DSÖ ve dünyanın

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: begumakyol.ege@gmail.com (B.Güler)

Geliş / Received 09.04.2021 Kabul / Accepted: 22.06.2021 Yayımlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngmuh.912506

önde gelen kuruluşları acil durum ve kontrol önlemleri açısından dünyanın dört bir yanındaki ülkelere tavsiyelerde bulunmuşlar ve küresel ölçekte alınan önlemler ile yayılma yavaşlatılarak, virüsün kontrol altına alınması konusunda daha verimli çalışmalar gerçekleştirilmiştir [7]. Ancak hızlı tanı kitleri, aşı ve terapötiklerin üretimindeki en kritik nokta, bu ürünlerin dağıtımı, uygulanabilirliği ve erişilebilirliği konusunda dünyanın her yerinde insanların eşit haklara sahip olmasıdır [2].

Mevcut durumda hastaların tedavisinde kullanılan seçenekler semptomları azaltmakla birlikte, farklı ilaç ve aşılarda geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar yoğun şekilde devam etmektedir. Bu noktada en büyük korkulardan birisi kullanılacak yöntemlerin güvenilirliğidir [2, 7]. Tıbbi bitkiler, Covid-19'a karşı yan etkisi olmayan veya çok az yan etkiye sahip terapötik ilaçlar geliştirmek için kullanılacak nitelikte biyoaktif bileşiklere sahiptirler [4]. Tıbbi bitkiler, sekonder metabolizma ürünleri olan bu biyoaktif bileşikler ile büyük bir pazar oluştururlar. Ancak iklime ve coğrafik koşullara bağlı olma durumunun neden olduğu kısıtlar, gelişen bitki biyoteknolojisi uygulamalarının katkısı ile bitkilerin hücre fabrikası olarak kullanımlarıyla aşılabilmektedir. Bitki biyoteknolojisi koronavirüse karşı ilaç üretiminde uniform, kullanımı güvenli ve yüksek verimli bir platform sunmaktadır [2, 7].

Bitki doku kültürü uygulamaları, tıbbi açıdan önemli sekonder metabolitlerin üretiminde bitki mekanizmasının etkili şekilde kullanımını sağlayan bitki biyoteknolojisinin temel direğidir. Bitkilerin *ex vitro* koşullarda yetiştirilmesinin zaman alması, biyoaktif bileşiklerin ekstraksiyonu ve izolasyonunun pahalı olması vb. nedenlerden dolayı; hücre süspansiyon kültürleri, kallus kültürleri, saçaklı kök kültürleri, adventif kök kültürleri ve diğer organ kültürleri gibi çeşitli doku kültürü teknikleri Covid-19 tedavisi için bitkisel metabolitlerin daha kısa sürede, uniform ve büyük çaplı üretimi açısından iyi bir alternatif olarak görülmektedir. Doku kültürü yöntemlerinin çevresel kısıtlamalar olmadan doğal bileşiklerin sürekli ve güvenilir bir şekilde üretimi gibi önemli avantajları söz konusudur [7, 8].

2 Virüs hakkında genel bilgiler

Koronavirüsler; büyük, küre şekilli ve yaklaşık 125 nm yarıçapında tek zincirli RNA virüsleridir. Genomik RNA'sı, tüm RNA virüsleri içerisinde en uzun olanıdır (yaklaşık olarak 26.2-31.7 kb) [9]. Özellikle üst solunum yolu enfeksiyonlarına sebep olan koronavirüs (CoV), genetik materyali tek zincirli RNA olan zarflı virüs grubu olarak tanımlanmaktadır [10]. Yaklaşık 30kb uzunluğundadır. Spike (S), nükleokapsit (N), zarf (E) ve membran proteini (M) olmak üzere dört yapısal proteinden oluşmaktadır [3, 11]. Bu proteinler, çift lipit katmanlı ve bombeli protein kılıf üzerinde S:E:M oranı 20:1:300 olacak şekilde yerleşmiştir. Bir koronavirüs partikülü yüzeyinde ortalama 74 adet S proteini bulundurmaktadır [9].

Koronavirüsler ilk olarak 1960'larda tanımlanmış, bu gruba ait farklı virüsler toplumlarda ölümlere neden olan virüs türleri olmuşlardır [10]. Virüsler bu isimlerini, latince taç anlamına gelen "corona" kelimesine benzeyen yuvarlak

güneş tacı yapısından almaktadır [12]. Betakoronavirüs cinsinin yeni bir üyesi olan Coronaviridae ailesine ait koronavirüs (2019-nCoV/SARS-CoV-2), SARS-CoV (Severe Acute Respiratory Syndrome-Ağır Akut Solunum Yolu Yetmezliği Sendromu) ile yakından ilişkilidir ve %70 benzerlik göstermektedir [4, 13]. İki virüs arasındaki farklı olan 308 aminoasitin genomik analizi tamamlanmış ve fonksiyonel ve patojenik ayrışmanın incelenmesinde bu farklılık başlangıç noktası olmuştur [13]. SARS-CoV-2'nin sahip olduğu RNA, protein translasyonu sırasında mRNA gibi davranmaktadır [14].

SARS-CoV; ilk olarak 2003 yılının Şubat ayında Çin'de görülmeye başlamış, 5 kıta ve 32 ülkede %10-15'lik ölüm oranı ile 916 kişinin hayatını kaybetmesine sebep olmuş ilk koronavirüs enfeksiyonudur. Yaklaşık on yıl kadar sonra Suudi Arabistan'dan başlayarak diğer Orta Doğu ülkelerine yayılan MERS-CoV (Middle East Respiratory Syndrome-Orta Doğu Solunum Sendromu) ise 2018 yılına kadar devam etmiş ve %39'luk ölüm oranı ile 543 kişinin ölümüne neden olmuştur. İlk vaka örneği 30 Aralık 2019 yılında Çin'in Wuhan kentinde bildirilen yeni koronavirüs ise ilk olarak 2019-nCoV (SARS-CoV-2) olarak adlandırılmıştır [15]. 10 Ocak 2020'de RT-PCR yöntemleri aracılığı ile ilk tam genom dizisi piyasaya sürülmüştür [16]. 12 Şubat 2020 tarihinde ise DSÖ bu patojeni 2019 yeni koronavirüs (2019-nCoV), COVID-19 veya Covid-19 olarak adlandırmıştır [4, 15]. 11 Mart 2020 tarihinde DSÖ tüm dünyada pandemi ilan etmiştir. Bu pandemi, 1918 influenza salgınından beridir kayıtlara geçen beşinci pandemidir [17]. 20 Haziran 2021 tarihinde ise yaklaşık olarak 178 milyon kişi virüsten etkilenmiş, 3.86 milyondan fazla kişi de yaşamını yitirmiştir.

Virüs-konukçu ilişkisindeki en etkili faktör, virüsün hücreye giriş ve konukçu içerisindeki replikasyonudur. Koronavirüsler, genellikle insan epitelyal hücrelerini hedef almaktadırlar [9]. Hedef hücreye girişten S proteini sorumludur [18]. S proteini ise S1 alt birimi (685 aminoasit) ve S2 alt birimi (588 aminoasit) olmak üzere iki alt birime sahiptir. S2, koronavirüsler arasında genellikle korunan bölgedir (%99). S1 ise %70 benzerlik göstermekle birlikte, reseptör bağlanma domaini (RBD) ile virüs girişi ve konukçu hücre tropizmi arasındaki farklılıklardan sorumludur [1]. Virüsün insan hücrelerine girişi, viral protein S'nin S1 alt biriminin insan hücre zarı üzerinde bulunan Anjiyotensin Dönüştürücü Enzim 2 (Angiotensin Converting Enzyme 2: ACE2) olarak adlandırılan reseptör proteinlerine bağlanmasıyla meydana gelmektedir [19]. SARS-CoV-2 de SARS-CoV ile benzer şekilde virüs üzerindeki reseptör bağlayıcı domain ACE-2 ile bağlanmaktadır. Ancak SARS-CoV-2'nin reseptör proteine afinitesi, SARS-CoV'un yaklaşık 20 katı kadardır. Bu sebeple ACE-2, Covid-19 enfeksiyonunda terapötik olarak kullanılabilme potansiyeline sahiptir [11, 20]. SARS-CoV-2/COVID-19 ile enfekte olmuş bir kişinin öksürük veya hapsirme sonucu oluşturduğu damlacıklara yakın temas nedeniyle maruz kalan insanlar, bu virüsle kolayca enfekte olmaktadır [4]. Virüs ayrıca kontamine yüzey/objelerle veya el/yüz/ağız ile temas yoluyla dolaylı olarak da bulaşabilmektedir [14]. Yapılan araştırmalar göstermiştir ki, enfekte olmuş bireyler yüksek oranlarda SARS-CoV-2 S1 RBD spesifik IgG

antikorları göstermekle birlikte, bunun çok düşük bir oranı (26 hastadan 3'ü) SARS-CoV-2'nin ACE-2 reseptörüne bağlanmasını durdurabilmiştir [1].

Çeşitli interferon uygulamaları, monoklonal antikorlar, oligonükleotit bazlı tedaviler, peptitler, küçük molekülü ilaçlar ve aşılarla ilgili çalışmalar devam etmesine rağmen, salgının önlenmesinde ilk hat savunmasını var olan ilaçların kullanımı oluşturmaktadır [21]. Halen Remdesivir, Hidroksiklorokin, Lopinavir / Ritonavir gibi ilaçlar ve diğer HIV proteaz inhibitörleri hastaların tedavisinde kullanılmaktadır [4]. Remdesivir; geniş yelpazede RNA virüs enfeksiyonları (SARS ve MERS koronavirüsleri dahil) için kullanılan önemli bir antiviral ilaçtır. Yapılan çalışmalarda, SARS-CoV-2'nin hücreye girişi sonrasında nükleotit analogu olarak görev alarak antiviral etki gösterdiği ispatlanmıştır. Remdesivirin etkisinin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmalarda %68'lik bir iyileşme olduğu tespit edilmesine rağmen, çalışmada kontrol grubunun kullanılmamış olması büyük eksiklik olarak görülmüştür. DSÖ ise Remdesivir kullanımının hastalarda sağ kalım ve iyileşme oranlarını arttırdığına dair yeterli kanıt olmadığını öne sürerek, hastalığın ciddiyetine bakılmaksızın hastanede yatan bireylerde Remdesivir kullanımını kısıtlayan şartlı bir tavsiye yayınlamıştır. Ritonavir interferonu, Lopinavir klasik ilacı ve kortikosteroid (3-5 gün) ile gerçekleştirilen bir çalışmada [22]; 51 hastadan 50'sinin iyileştiği belirlenirken, yapılan başka bir çalışmada [23] ise 26 yoğun bakım hastasının 16'sının taburcu olduğu bildirilmiştir. Ancak benzer şekilde Lopinavir/Ritonavir kullanan 199 Covid-19 hastası ile standart tedavi gören grup arasında belirgin farklılığın görülmemesi, bu konudaki araştırmaların devam etmesi gerektiğini göstermiştir [10]. Bunlar dışında plazma terapileri de etkili sonuçlar vermiştir. Ancak tüm bu sentetik ilaçların kullanımının gösterdiği ciddi yan etkiler; araştırmacıları güvenli, etkili ve ucuz olmasının yanı sıra; en az yan etki gösteren yeni ilaç ve aşıları araştırmaya yönlendirmiştir [21].

3 Viral salgınlarda aşı üretim tekniklerine genel bakış

DSÖ'nün verilerine göre her yıl yaklaşık 780,000 kişi hayatını kaybetmektedir. Var olan Covid-19 ise popülasyonlar üzerinde ciddi bir soruna yol açmış ve aşılamanın önemini artırmıştır [24]. Geçmiş yıllarda yaşanan viral salgınlara göstermiştir ki, salgınla mücadelede en etkili çözüm hızlı tespit ve hızlı aşılama ile sağlanmaktadır. Aşı üretim proseslerinde ya da yöntemlerinde geçmiş yıllarda görülen aksaklıklar günümüzde var olan pandemide düzeltilmeye çalışılmıştır. Örneğin, 2009 yılında yaşanan influenza A (H1N1) salgını sırasında aşı üretimi amacıyla kullanılan yumurta-bazlı üretim teknikleri yavaş kalmış ve aşının paylaşımı ve dağıtımında yaşanan sorunlar sebebiyle ilk dalganın atlatılmasında başarısız olunmuştur. Ya da aşı üretimlerinde kullanılan MDCK (Madin-Darby Canine Kidney) ve EHE hücre hatları, SARS-CoV-1 ve SARS-CoV-2 virüslerinin replikasyonuna izin vermediği için Covid-19 pandemisinde kullanılamamışlardır [25]. Ayrıca inaktif aşıların kullanımının ise zayıf immün yanıtı sebep olduğu belirlenmiştir [24]. Bu eksiklikler, aşının doğal viral amplifikasyonuna güven sorununun oluşmasına neden

olmuş, bunun yerine viral yapısal proteinler ve/veya membran elementlerini içeren rekombinant viral peptitleri veya virüs benzeri partikülleri (Virus-like particles-VLPs) kullanan yeni jenerasyon aşılar verilen önemi artırmıştır. VLP'ler genel olarak viral partiküllerle yapısal olarak benzerlik göstermekle birlikte, çoğalmak için gereken genetik materyalden yoksundurlar. Çoğalmak için de doğal virüsün bulaşıcılığına ihtiyaç duymadıklarından daha geniş bir konukçu seçeneğine sahiptirler. Böcek hücre hatları ve bitkiler de bu hatlara dahildirler. Canlı hücre içermemesi sebebiyle bu üretim tekniği; daha güvenli olmasının yanı sıra, konukçu çeşitliliğinin de bulunması ölçeklenebilmesinde çok önemli avantajlar sağlamaktadır [25].

Biyomühendislik teknolojileri ile aşı üretiminde viral antijenler olarak VLP'lerin kullanımının çok sayıda avantajları bulunmaktadır. Antijenlerin sunucu hücre tarafından kolaylıkla alınmaları, adaptif bağışıklığı aktive etmeleri, güçlü hücresel ve hormonal bağışıklığı sağlamaları bu avantajlardan bazılarıdır. Bitkilerin VLP üretimi için kullanımı ise kitlesel üretime imkan sağlamaları nedeniyle, araştırmacılar tarafından sıklıkla tercih edilen bir teknik olmaktadır. Medicago şirketi, bir aylık bir zamanda bütün hücrelerini kullanarak 10 milyon doz H1N1 influenza aşısının üretimini gerçekleştirmişlerdir [1].

Bitkiler, VLP'ler ya da aşılar gibi çok sayıda biyolojik prosesin yürütülmesinde biyoreaktör görevi görebilme potansiyeline sahiptirler. Bitkilerin yabancı genler kullanılarak transformasyonu ile ilaçların, aşıların ve antikorların farklı insan patojenlerine karşı kullanımı gerçekleştirilmekte ve bu şekilde güvenli, depolama sorunu olmayan bir üretim şekli geliştirilebilmektedir. Gerçekleştirilen birçok araştırma ve klinik çalışma, bitkisel kökenli aşıların etkili ve güvenli olduğunu göstermiştir. Kolera, Dang humması virüsü, Hepatit B virüsü, HIV ve Ebola'ya karşı monoklonal antikorlar ve Gaucher hastalığının tedavisinde kullanılan glukoserebrosidaz, bitkilerden elde edilen aşı ve terapötiklere birer örnektir [10].

Covid-19'un tedavisinde kullanmak amacıyla üretilmiş farklı aşı ve antikorlar mevcut olmasına rağmen, hiçbiri hakkında kesin bir kaniye varılamamaktadır [10]. Ayrıca virüslerin, uygulanan ilaçlara karşı direnç kazanmak amacıyla sahip oldukları genetik materyali mutasyona uğratma yeteneklerinden dolayı, geniş spektrumlu bir antiviral tedavinin geliştirilmesi son derece zor bir prostedir. Sentetik olarak geliştirilen antiviral ilaçların uygulamasının zaman zaman beklemeyen yan etkileri ciddi sağlık sorunlarına da yol açmaktadır. Bu sebeple bitkisel kökenli tedaviler, yan etkileri en aza indirerek antiviral tedavilerin geliştirilmesinde yeni fırsatlar sunmaktadır [9].

4 Bitkilerden rekombinant protein üretimleri ve covid-19 ile mücadele

Bitkilerden önemli proteinlerin üretim teknikleri ve bu proteinlerin endüstriyel olarak kullanımları son yıllarda önemli çalışma konularından olmuştur. Farklı kültür teknikleri ve transgenik bitkilerin kullanımı ile yabancı proteinlerin üretimi gerçekleştirilebilmektedir [26]. Sunduğu ekonomik potansiyel ile transgenik bitkilerin farmasötik

(ilaç üretiminde kullanılan) ve terapötik (tedavide kullanılan) proteinlerin üretimlerinde kullanımları, giderek artan önemli uygulama alanlarına yol açmıştır [27]. Bitkilerden elde edilen aşuların ve antikörlerin hastalıkların tedavisinde kullanımı oldukça güvenlidir ve ayrıca virüs veya bakteriyel toksinlerin incelenmesini gerektirmediği için maliyetlerin düşürülmesini sağlar [28].

“Moleküler çiftçilik” adı altında bitkiler, rekombinant aşı ve ilaçların üretiminde 30 yıldan uzun süredir kullanılmaktadır [10]. İlk olarak 1980’li yıllarda ilk rekombinant antikörlerin başarılı üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu tarihten itibaren çok sayıda protein, bitkiler aracılığıyla üretilmiş ve ticarileştirilmiştir [2]. Son yıllarda, gelişen genetik mühendisliği teknikleri ile birlikte antikor, viral ve bakteriyel antijen, hayvan ve insan terapötik proteinleri gibi çeşitli rekombinant proteinlerin üretimleri hız kazanarak artmaktadır. Bitkisel sistemlerden transgenik bitki teknolojileri kullanılarak, antikor ve yenebilir aşular, peptit, protein ve enzim gibi önemli farmasötiklerin üretimi, diğer üretim sistemlerine göre biyolojik ya da ekonomik olarak daha avantajlıdır [29].

Bitki doku kültürü ile ilk rekombinant proteinin üretimi 90’lı yılların başında gerçekleşmiştir. Bunun arkasından transgenik hücre süspansiyon kültürleri çeltik, soya fasulyesi ve domates gibi bitkilerde protein üretimleri için kullanılmıştır [26]. 1997 yılında, transgenik mısır kullanılarak ticari rekombinant avidin üretimi büyük ölçekte gerçekleştirilmiştir [30]. Bitki sistemlerinde rekombinant protein üretimi gerçekleştirildikten sonra saflaştırma işlemine ihtiyaç duyulduğundan, üretimin ticarileşmesi için, toplam çözülmüş protein (TSP: Total Soluble Protein) miktarının %1 oranına yaklaşması gerekir. Rekombinant proteinlerin üretimini etkileyen faktörler; konukçu bitkinin üretim potansiyeli ve ekspresyon sistemi, transgenin ekspresyon seviyesi ve rekombinant genin stabilitesidir [27].

Bitkilerin biyoreaktör olarak kullanımları; rekombinant proteinlerin yüksek konsantrasyonda düşük maliyetle üretimlerini sağlamaktadır. Buna ek olarak tohumlarda formüle edilen enzimlerin uzun süreli kararlı oldukları, depolama ve taşınım masraflarının da azaltılmasını sağladıkları da bilinmektedir. Daha önemlisi üretim miktarı esnek olabilmekte ve pazar sunuş formu kolaylıkla değiştirilebilmektedir [28]. Dikkat edilmesi gereken önemli nokta; doğal antikörler ile rekombinant hayvan ve insan hücrelerinde üretilen ve bitkilerden elde edilen antikörler arasında aktiflik ve spesiflik açısından farklılıkların bulunmasıdır [27].

ABD Savunma İleri Araştırma Projeleri Ajansı (The Defense Advanced Research Projects Agency-DARPA) tarafından desteklenen Blue Angel Projesi kapsamında, bitki bazlı sistemlerin aşı üretim potansiyellerine dikkat çekilerek; "yeni türlerin neden olduğu pandemilere ve ayrıca kasıtlı biyolojik tehditlerin neden olduğu enfeksiyonlara karşı aşı sağlama konusunda yetersiz kapasite" konusu ele alınmaya çalışılmış ve üç temel kriter belirlenmiştir. Bu kriterlerden ilki; yüksek muhafaza oranına sahip, kendi kendine yeterli bitki bazlı farmasötik üretim tesisi geliştirmektir. İkincisi; bir tesis inşa etmek ve işletmeye almak, bir aday protein antijeni geliştirmek ve ticari ölçekte bir hedef protein sunarak işlem

sağlamlığını göstermektir ve sonucusu ise; bu üretim prosesini 18 aydan daha kısa bir zaman aralığında tamamlamaktır [31]. Bu proje; bitki bazlı aşı üretim sistemlerinin hızlı aşı üretimine imkan verdiğini ve beklenmedik bir viral salgını bastırmak için gerekli olan üretim hızına sahip olduğunu göstermiştir. Medicago Inc., Caliber Biotherapeutics Inc. (iBio Inc. yeni adı), Fraunhofer CMB ve Kentucky BioProcessing Inc. şirketleri bunu başarı ile gerçekleştirmiş bazı şirketlerdir. Bu şirketler özellikle kanser terapilerinde kullanılan çeşitli aşı ve/veya antikörleri ürün listelerinde bulundurmaktadır. Medicago şirketi, yeni bir grip aşısının büyük miktarda üretim ve teslimini 3 aylık bir sürede gerçekleştirebileceğini bildirmiştir. 2014 yılında Kentucky Bioprocessing, “Zmapp” adlı insan kullanımı için acil durum onayı almış Ebola antikor kokteylinin üretimini hızlıca gerçekleştirmiş ve Mapp Biopharmaceutical aracılığı ile dağıtımını sağlamıştır. Bu durum, bitki bazlı üretim sistemlerinin aşı üretiminde kullanımının hızını gösteren bir olay olmuştur. Yakın zamanda ise, Medicago şirketi COVID-19 S protein sekansına ulaştıktan 20 gün sonra VLP aşı üyesini üretmeyi başarmıştır [25].

İmmun yanıtın gerçekleşmesinde önemli rol oynayan antikörlerin bitkilerde başarılı şekilde ekspresyonlarının gerçekleştirilmesi ile yeni buluşların önü açılmıştır. Tütün bitkisinde ilk kez immunoglobulin fragmentlerinin sentezinin gerçekleştirilmesinin ardından, birçok bitkide benzer çalışma gerçekleştirilmiş ve “plantibody” olarak adlandırılmışlardır. İzolasyon ve saflaştırma işlemlerinin ardından elde edilen ajanlar immunokromatografi ya da medikal uygulamalarda kullanılabilir [32].

Bitki hücreleri, ağızdan alınan aşuların üretimi için son derece uygun platformlardır. Bu platformlar “yenebilir aşı” olarak da adlandırılmaktadır [14]. Bitkilerde antijen determinantlarının eksprese edilmesiyle ilgili ilk teknolojiler; yenebilir aşuların üretimi üzerine yoğunlaşmış olsa da, sonraki dönemlerde yeterli dozlar üzerine araştırmalar gerçekleştirilmiş ve yenebilir aşular yerini “bitki aşuları” na bırakmıştır. Aşının uygun dozunun belirlenmesi amacıyla, tohumların, dondurularak kurutulmuş meyveler ya da yaprakların toz haline getirilmiş formları, maliyet düşürülerek kullanılmıştır. Toz halindeki bitkisel materyalin büyük ölçekte üretimi ile uygun aşı dozunun miktarının belirlenmesine yönelik çalışmalar kolaylıkla gerçekleştirilmekte ve kalite kontrol sağlanabilmektedir. Ayrıca bu materyal etkisini arttırmak amacıyla mukozal adjuvanlar, vitaminler ya da farklı aşularla birlikte uygulanabilmektedir. Bugüne kadar üretilmiş çok sayıda antijenik determinant bulunmaktadır [32].

Protein ekspresyonlarının bitkide gerçekleştiği kısımlar uzun yıllardır araştırmacıların çalışma konularından olmuştur. Tohumlarda (mısır, kanola, soya fasulyesi, çeltik), yapraklarda (tütün, yonca, marul), su bitkilerinde (*Lemna minor*), bitki hücre kültürlerinde (tütün, havuç, çeltik) ve saçaklı kök kültürlerinde protein ekspresyonlarının gerçekleştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bu üretimlerin üç başlık altında toparlanması mümkündür. Bu başlıklar; tam bitki stabil ekspresyon sistemleri, tam bitki geçici ekspresyon sistemleri ve *in vitro* kültür sistemleri olarak adlandırılabilir (Şekil 1) [33]. Tütün, turp,

patates ve domates gibi pek çok bitki aşısı üretimi amacıyla kullanılmıştır. Turpta üretilen interferon alfa, tütün ve patatesten üretilen insan serum albumini, tütünde hepatit B virüsüne karşı üretilen antikolar (scFv mAb) bunun bazı örnekleridir. Transgenik ayçiçeğinden üretilen insülin (SemBioSys), transgenik arpadan elde edilen büyüme faktörü, transgenik havuçtan üretilen ve Gaucher hastalığının tedavisinde kullanılan taligluseraz enzimi (ProtalixBio Therapeutics), transgenik tütünden elde edilen kuş gribi aşısı (Medicago) ve transgenik tütünden üretilen Ebola aşısı (Mapp Biopharmaceutical) ticari olarak üretimi yapılan bitkisel temelli biyofarmasötik ürünlerdir [1].

Bitki bazlı aşılarda, üçüncü jenerasyon aşılarda olarak adlandırılmaktadır. Bu aşısı üretim tekniği, bitki ekspresyon sisteminde aşının klonlanması ile antijenik ya da koruyucu özellikteki proteinin bitki içerisinde üretilmesi esasına dayanmaktadır. Bu şekilde aşılarda; bitkiler biyoreaktör olarak kullanılarak üretilmekte, çok sayıda üretim aynı anda gerçekleştirilebilmekte ve sürekli üretim sağlanabilmektedir [1]. Transgenik bitki aşılarının üretimi için iki farklı yol vardır. Bunlardan birincisi, yabancı proteinin bitki doku kültürü teknikleri ile üretimi ve ayırma saflaştırma işlemlerinin gerçekleştirilerek damar içi kullanımlar için yüksek kalitede ürün elde edilmesi yöntemidir. Diğer yöntem ise, alt akım işlemine gerek kalmadan oral kullanım için uygun proteinin sindirilebilir kısmının ekspresyonuna dayanmaktadır. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda 5 grup bitki aşısı belirlenmiştir: bakteriyel aşılarda, virüs aşılarda, gebelik aşılarda, parazit aşılarda ve diabet aşılarda (Tablo 1). Transgenik bitkilerden aşılarda elde edilmesine yönelik çalışmalar hızlı şekilde gelişme göstermesine rağmen, ticarileşme aşamasına geçmeden önce çözülmesi gereken birkaç sorun bulunmaktadır. Bunlardan birisi ölçek büyütmede model bitki olarak *Arabidopsis thaliana* ve *Nicotiana tabacum* L. gibi sindirimi zor olan bitkilerin kullanılmasıdır. Tütünde aşılarda üretilmesi, nikotin ve diğer alkaloidlerin kontaminasyon riskini barındırmaktadır [27].



Şekil 1. Bitki ekspresyon sistemlerinin gruplandırılması [34].

Yapılan araştırmalarda görülmüştür ki; bitkilerin rekombinant proteinlerin üretiminde konukçu olarak kullanımının maliyeti, memeli hücrelerinin kullanıldığı sistemlerin %0.1'i, bakteri ekspresyon sistemlerinin ise %2-10'u kadardır [11]. Transgenik bitkiler kullanılarak aşılarda üretimi, memeli patojenleri ile kontaminasyon riskini azaltmasının yanı sıra, oral kullanımın gerçekleştirilmesine de izin vermesi gibi birçok sebeple son yıllarda önemli araştırma alanlarından biri olmuştur [2, 35].

Yenebilir aşısı; patojenlere ait antijenleri üreten transgenik bitkilerin tüketilmesiyle insan ve hayvanlarda çeşitli bulaşıcı hastalıklara karşı bağışıklık proteinlerinin oluşumuna yol

açan aşılardır. Yenebilir aşılarda, seçili bir genin bitkiye aktarıldığı ve bu genin kodladığı proteinin (antijen) üretiminin gerçekleştirildiği sub-unit aşılardır [35]. Yenebilir aşılarda;

- Düşük maliyet,
- Hızlı ölçek büyütme,
- Aynı anda çoklu aşılarda üretimine olanak vermesi,
- Uygun koşullarda uzun süreli depolama,
- Üretim sırasında sterilizasyonun bir problem olmaması,
- Transportu sırasında soğuk zincir gereksiniminin azalması,
- Aşısı örneklerinde karşılaşılan kontaminasyon risklerinin ortadan kalkması,
- İğne ve şırınga maliyetlerinin ortadan kalması,
- Uygulama sırasında gerekli olan tıbbi yardım ihtiyacının azalması,
- Çocuklarda görülen enjeksiyon korkusunun ortadan kalkması,
- Tekrarlı kullanılan iğnelerin sebep olduğu kan yoluyla bulaşan hastalıkların ortadan kalkması gibi önemli avantajlara sahiptirler.

Belirli bölgedeki mukoza ile temas eden bitkilerden elde edilen aşılarda avantajlarından biri, lektinler ve saponinler gibi adjuvant özellik gösteren farklı bitki bileşenlerini de içermeleridir. Ayrıca bu aşılarda gerçekleştirilen insan ve hayvan çalışmalarından oral olarak uygulandıkları yerlerde antijen-spesifik immun yanıtı indüklemişlerdir [36]. Ayrıca gerçekleştirilen farklı çalışmalar, oda sıcaklığında uzun süre stabil olarak kalabildiklerini de göstermiştir [37]. Yine de oral kullanım subunit aşılarda immun cevaplarında var olan çeşitlilikten dolayı ticari olarak başarı elde edilememiştir. Günümüzde bitki aşılarda yapılan çalışmalar yeterli değildir. Oral kullanımın artırılması için stabilizasyon ve/veya sindirim sistemindeki degradasyondan aşısı antijenlerinin korunması ve daha etkili sonuçlar alınması için immun sistemin spesifik bölgelerinin hedeflenmesi ile ilgili çalışmalar yapılmalıdır. Bu anlamda yapılan çalışmalar kapsamında, bitki hücre matriksi içerisinde immunjenin enkapsülasyonunun, gastrik enzimlerden ve asitlerin gerçekleştirdiği degradasyondan korunmayı sağlayabileceği ifade edilmiştir [36]. Covid-19 ile mücadele için aşısı geliştirmenin en önemli basamağı, SARS-CoV-2 ile konukçu bağışıklık sistemi arasındaki ilişkinin tam olarak anlaşılmasından geçmektedir. Bu ilişki, hastalığın hafif, şiddetli ya da asemptomatik gelişim gelişmeyeceği üzerinde etkili bir parametredir [1]. Fc füzyon proteinleri, diğer proteinlere bağlanarak ekspresyonlarını kolaylaştırmakta ve proteinin yarı-ömrünün uzamasını sağlamaktadır

Siriwattananon et al. [11], gerçekleştirdikleri bir araştırmada; *Nicotiana benthamiana* bitkisinde ACE2-Fc terapötik protein üretimine dayalı bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada virüsün konak hücre üzerindeki bağlanma bölgelerine tutunmasını önleyen ACE2-Fc füzyon proteininin bitkide üretimi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen *in vitro* çalışmalarla da enfeksiyonun önleniği ispatlanmıştır [11].

Tablo 1. Bitkilerden elde edilen bazı aşı tipleri, konukçu bitkiler ve antijenlere örnekler

Kategori	Antijen	Konukçu Bitki
Virus Aşları	HBsAg	<i>Nicotiana tabacum</i> L. <i>Lupinus luteus</i>
	HBsAg orta proteini	<i>Solanum tuberosum</i> L.
	Şap virüsü yapı proteini	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	Şap virüsü yapı polipeptidini	<i>Yonca</i>
	Norwalk virüsü kapsit proteini	<i>Lycopersicon esculentum</i>
	HIV kapsit proteini	<i>Lycium barbarum</i> L. <i>Nicotiana tabacum</i> L.
Bakteriyel Aşlar	<i>Helicobacter pylori</i> üreaz subunit B	<i>Oryza sativa</i> L.
	<i>Actinobacillus pleuropneumoniae</i> toksini	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	Measles virus hemagglutinin protein cholera toxin B subunit	<i>Lactuca sativa</i> L.
	Shiga toksini (tip 2)	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
	Lyme hastalık ajanı dış yüzeyi A proteini	<i>Nicotiana tabacum</i> L.
Parazit Aşları	Sistiserkozis sentetik peptidi	<i>Carica papaya</i> L.
	<i>Entamoeba histolytica</i> 'ın Gal/GalNAc lektinleri	<i>Nicotiana tabacum</i> L.

Kanada'da bulunan Medicago firması, Covid-19'a ait gen sekansı tanımlandıktan 20 gün sonra, *Nicotiana benthamiana* bitkisini kullanarak VLP'lerin üretimini başarmışlardır. Covid-19'un S proteinini kodlayan gen sekansı *Agrobacterium* aracılığıyla bitkiye transfer edilmiş ve sonuç olarak bitkide lipit membranını ve S proteinini içeren bir VLP'nin üretimi gerçekleştirilmiştir. Klasik aşı üretim yöntemlerine göre çok düşük bir miktara mal olan bu ürünün faz 3 denemeleri 2021 Mart ayı içerisinde sürdürülmüştür [10, 38]. Benzer şekilde British American Tobacco şirketinin alt kuruluşu olan Kentucky BioProcessing (KBS) de benzer şekilde virüse ait genetik sekansın bir kısmının *Nicotiana benthamiana* bitkisinde üretimini gerçekleştirmiş ve potansiyel bir antijen üretmiştir. Firmaya ait aşı, 2021 Mart ayı içerisinde faz 2 denemelerini yürütmüştür [10, 39]. California Üniversitesi'nde bulunan bir araştırma grubunun Covid-19 ile ilgili gerçekleştirdiği bir çalışmada, SARS-CoV-2 üzerinde bulunan B- ve T- hücre epitoplari ile birlikte bürölce mozaik virüsü kullanılarak immün cevabı tetikleyen bir tür VLP üretimi sağlanmıştı [10].

McDonald ve Holtz [40], Covid-19 sebebiyle karantinaya giren California bölgesindeki bir çiftlikte toplam maliyeti 1.46 milyon \$ olan ve 350 hektarlık alanda hasat edilmiş marulun üreticinin elinde kaldığını farketmişlerdir. Araştırmacılar, 3 milyon kg yaş marul biyokütlesine tekabül eden bu hasat ürününün Covid-19 tanı kitlerinde kullanılmak üzere rekombinant protein üretiminde kullanılabileceğini ileri sürmüşlerdir. DARPA'nın Blue Angel projesi kapsamında, 2010 yılında bitkilerden terapötik proteinlerin büyük ölçek üretimine 100 milyon \$'lık yatırımı da araştırmacıları bu konuda desteklemektedir [40]. Araştırmacılar, daha önceki yıllarda serada yetiştirilen *Nicotiana benthamiana* bitkisinde monoklonal antikor üretiminin gerçekleştirilmesi üzerine bir teknoekonomik model geliştirmişlerdir [41]. Bu çalışmadan elde edilen veriler kullanılarak maruldan elde edilmesi düşünülen

antijene ait bazı sayısal veriler hesaplanmıştır. Veriler değerlendirildiğinde ise 1 milyar ELISA antijeninin üretimi için 36 hektarlık marul yeterli olurken, aynı miktarda antijen için 60.000 L memeli hücre kültürünün kullanılması gerektiği ileri sürülmüştür. Ayrıca memeli hücre kültürlerinin pahalı besin ortamı bileşenleri ve yüksek laboratuvar özellikleri, bitkileri daha da dikkat çeker hale getirmektedir [40].

İlaç geliştirilmesine ait araştırmalarda moleküler doking/yerleştirme çalışmalarına da önem verilmiştir. Bu biyoinformatik tekniğinde, bir molekülün protein yapısında bulunan başka bir molekül ile etkileşimi modellenmekte ve makromoleküller için ligandların görünür bağlanma modları ve afiniteleri tahmin edilmekte ve belirlenmektedir [42, 43] (Tablo 2). Bu teknikte, moleküllerin farklı durumları göz önünde bulundurularak üç boyutlu uzaydaki moleküllerin etkileşimleri incelenebilmekte, daha ilgili ve önemli farmakolojik etkileşimde yer alan faktörler belirlenebilmektedir [43]. Böylece, moleküler doking yöntemi yüksek maliyetli ve zaman kaybettiren klinik ve laboratuvar çalışmalarından önce tercih edilen bir yöntem haline gelmiştir. Ayrıca, son yıllarda moleküler doking/yerleştirme yöntemlerinin hızı, güvenilirliği ve doğruluğundaki gelişmeler, yapı bazlı ilaçların tasarlanmasında bu yöntemleri uygun bir seçenek haline getirmiştir [3]. Mohammadi and Shaghagi, [43] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, sarımsaktan elde edilen dialil disülfid, zerdeçaldan elde edilen kurkumin, biberden elde edilen kapsaisin, kakuleden elde edilen limonen, meyan kökünden elde edilen kumarin, yarbuz bitkisinden elde edilen timol, *Stachys schtschegleevi* bitkisinden elde edilen verbakosit ve geven bitkisinden elde edilen glukuronik asit metabolitlerinin moleküler doking yöntemi ile Covid-19'a karşı ilaç etkisi incelenmiştir. Tüm metabolitler farklı oranlarda etkili bulunsalar da, Covid-19'a karşı en etkili olan metabolitin kurkumin olduğu belirlenmiştir.

Tablo 2. Bazı bileşikler ve seçilen antiviral ajanlar arasındaki etkileşim tablosu [44]

Bileşik	Ligand	Reseptör	kcal/mol
Umifenovir	6-Ring	CE LYS 118 (A)	-0.6
	N 18	O ALA 356 (A)	-1.7
Remdevisir	6-Ring	CB GLU 403 (A)	-0.6
	5-Ring	CG PRO 407 (A)	-0.5
Ribavirin	5-Ring	NE1 TRP 220 (A)	-0.5

Psidium guajava L. ve *Piper nigrum* L.'nin sekonder metabolitlerinin (izokuersetin, terpenil asetat, morin-3-O-likozit, ginensin ve braçiamit A), koronavirüs hastalığı (Covid-19) ile ilişkili 3 anahtar proteine (viral S proteini, viral S proteininin hedefi olan ACE2 ve viral S proteininin öncül enzimi TMPRSS2) bağlanma açısından tarandığı moleküler doking çalışmasında, incelenen tüm bileşiklerin bu üç reseptöre önemli ölçüde bağlandığı tespit edilmiştir. İncelenen sekonder metabolitler arasından karyofilen, terpenil asetat, morin and morin glikozitlerinin klinik araştırmalar için düşünülebileceği belirtilmiştir [20].

Jena et al. [3] kateşin ve kurkuminin, SARS-CoV-2 virüsünün S proteini ve konak hücrelerin aynı kökenli reseptörü ACE2 ile etkileşimini moleküler doking/yerleştirme yöntemi kullanılarak belirlemeyi amaçladıkları çalışmalarında; kateşin ve kurkuminin sadece viral S Proteini ve konakçı reseptör ACE2'ye değil, aynı zamanda onların komplekslerine de (SARS-CoV-2'nin S proteininin reseptör bağlayıcı domaini (RBD) ve ACE2; RBD/ACE2-kompleks) güçlü bağlanma afinitesi sergilediklerini belirlemişlerdir. Kurkumin, viral S proteininin RBD'ne doğrudan bağlanırken, bunun aksine kateşin S proteininin RBD bölgesi yakınında bulunan amino asit kalıntılarına bağlanmış ve RBD'nin amino asit kalıntılarında ve yakın çevresinde dalgalanmaya neden olmuştur. Elde edilen bulgulara göre, kateşin ve kurkuminin SARS-CoV-2'ye karşı ileriye dönük antiviral ilaçlar için düşünülebileceği rapor edilmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda bu bulguları doğrulamak için deneysel çalışmaların yapılması gerektiği vurgulanmıştır [3].

Biyoflavonoitler, çeşitli biyolojik potansiyele sahip bitki kaynaklı polifenolik bileşiklerin en büyük grubunu oluştururlar ve ayrıca SARS ve MERS (Orta Doğu Solunum Sendromu) tedavisinde etkili oldukları da kanıtlanmıştır. Üç SARS-CoV-2 proteini (yapısal olmayan protein-15 Endoribonükleaz-NSP15, SARS-CoV-2'nin S proteininin reseptör bağlayıcı domaini-RBD ve ana proteaz-Mpro / 3CL^{pro}) üzerine bazı flavonoitlerin etkisi, moleküler doking/yerleştirme ile belirlenmeye çalışılmış ve incelenen flavonoidlerden glisirik asit, amentoflavon ve mulberosin'in SARS-CoV-2 anahtar viral proteinlerini inhibe etmede umut verici potansiyellerinin olduğu belirlenmiştir [45].

Yapılan başka bir moleküler doking çalışmasında; krisin, emetin, tuteolin, kuersetin, amentoflavon, apigenin, hesperetin, neobavaizoflavon, izobavaçalkon, psoralidin, epikateşin gallat, emodin, beta-sitosterol, juglanin, kazinol-A, ferruginol, theaflavin-3,3'-digallat fenolik bileşiği, tomentin-D, papiriflavonol metabolitleri SARS-CoV-2'ye

karşı kullanılacak kapasiteye sahip metabolitler olarak belirlenmiştir. Kristin ve emodin SARS-CoV-2'in S proteini ve ACE2 arasındaki etkileşimi; Emetin'nin RNA, DNA ve protein sentezini; kuersetin, amentoflavon, hesperetin, beta-sitosterol, theaflavin-3,3'-digallat ve apigeninin 3CL proteazı; neobavaizoflavon, izobavaçalkon, psoralidin, tomentin-D ve epikateşin gallatın papain benzeri proteazı (PL^{pro}) ve ferruginolün replikasyonu inhibe ettiği; luteolinin viral girişi engellediği ve papiriflavonol A ve Kazinol A'nın proteaz inhibisyonuna neden olduğu rapor edilmiştir [46]. SARS-CoV-2 spike proteinlerine karşı stilbenoitlerle yapılan moleküler doking/yerleştirme çalışmasında, stilben bazlı bileşiklerin (özellikle resveratrol) spike proteinini bozmak şeklinde etki eden anti-SARS-CoV-2 ilaç adayları olarak düşünülebileceği bildirilmiştir [47].

Pandey et al. [48], moleküler doking/yerleştirme yöntemiyle yaptıkları çalışmada, SARS-CoV-2 spike proteinlerinin inhibisyonunu hedeflemişler ve bu amaçla daha önce antiviral etkinlikleri rapor edilmiş olan 9 flavonoidi (baicalin, kurkumin, galangin, morin, kuersetin, skutellarein, silibinin, mirisetin, epigallokateşin) incelemişlerdir. Taradıkları bu bileşikler arasında SARS-CoV-2 spike glikoproteinine karşı en yüksek bağlanma afinitesini baicalinin gösterdiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca çalışmanın devamında yine moleküler doking yöntemi ile baicalinin spike proteinini inhibe edici potansiyeli COVID-19 tedavisi için kullanılan iki ilaç (Abacavir ve Hidroksiklorokin) ile karşılaştırıldığında, baicalinin daha iyi inhibe edici potansiyele sahip olduğu ortaya konmuştur. Kumar et al. [49] SARS-CoV-2 virüs inhibisyonunda hedef olarak daha önceki salgına neden olan diğer SARS-CoV'ye %89 benzerlik gösterdiği için Nsp15 proteinini seçmişler ve moleküler doking yöntemi ile farklı fitokimyasal maddelerin Nsp15 proteini ile bağlanma potansiyellerini incelemişlerdir. Çalışmada yaklaşık 50 fitokimyasalın Nsp15 ile bağlanma potansiyeli gösterdiği tespit edilmiş ve bu fitokimyasalların viral replikasyonu inhibe edebilme potansiyellerinin olabileceği rapor edilmiştir. İncelenen fitokimyasallardan bazıları; sarsasapogenin, kurkumin, ajmalisin, novobiosin, silmarin ve arantotin, piperin, gingerol, rosmarinik asit ve alfa terpenil asetatdır.

5 Bitkisel sekonder metabolitlerin kullanımı ve covid-19 ile mücadele

Bitkisel sekonder metabolitler, bitkinin doğal yaşam döngüsünün devamı için gerekli olmamakla birlikte, bitkilerin çevre ile olan adaptasyonlarında büyük önem taşıyan metabolitlerdir [50]. Bitkilerde bulunan sekonder metabolitlerin çeşitli biyolojik ve ekolojik özellikleri mevcuttur. Özellikle kimyasal savunmadaki antioksidatif ve antimikrobiyal etkileri çok önemlidir. Moleküler çiftçilikte, bitkilerin bu özellikleri değerli sekonder metabolitlerin büyük ölçek üretimleri amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca metabolizma mühendisliği devreye sokularak biyoaktif bileşiklerin üretimindeki kısıtlar ortadan kaldırılmakta ve biyoprosesler devreye sokularak verimlilik artırılmaktadır [10]. Bitkilerde moleküler çiftçilik kullanılarak farklı biyolojik ve farmasötik ürünlerin üretiminin en önemli avantajı, düşük maliyetli ve

ölçeklenebilir olmasının yanı sıra, varolan Covid-19 pandemisi gibi acil durumlarda endüstriyel ölçekte hızlı üretime imkan vermeleridir [1].

Covid-19 pandemisi hızlı şekilde bulaşması ve yüksek ölüm oranları ile acil önlemler ve tedavi yöntemlerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulan bir süreçtir. Salgının 180 ülkede görülmüş olması ve ölüm oranlarının yüksek olması nedenleriyle hızla yeni ilaç keşiflerine ihtiyaç vardır. Halk tıbbında geniş yer bulan tıbbi bitkiler, biyoaktif ve fitokimyasal madde içeriklerinin zengin olması nedeniyle yeni ilaçların geliştirilmesinde ciddi potansiyele sahiptirler [15]. Gerçekleştirilen çalışmalarda, virüs kaynaklı enfeksiyonların önlenmesinde çoğunluğu bitkilerden elde edilen proteaz inhibitörlerinin son derece etkili olduğu belirlenmiştir [44].

Tarih öncesi dönemden beri insanlar, bitkilere ait farklı kısımları, enfeksiyöz hastalıklar da dahil olmak üzere çok çeşitli hastalıkların tedavisinde kullanmışlardır [9]. 18. yy'ın başlarına kadar yaklaşık olarak 13 bin bitki türü tıbbi amaçlarla değerlendirilmiştir. Günümüzde ise bu sayı yaklaşık 20 bine yaklaşmıştır. Tıbbi-aromatik bitkiler; fitokimyasal maddeleri içeren ve bu maddeler sayesinde bazı ilaç bileşimlerine girebilen, hastalıkların tedavisinde doğrudan ya da işlenerek kullanılan bazı bitki türleri olarak tanımlanmaktadır [51]. Bazı tıbbi bitkilerin antiviral özelliklere sahip olduğu bildirilmiştir. Polifenoller, flavonoidler, alkaloidler, kinonlar, kumarinler, terpenler, proantosiyanidinler, ligninler, tanenler, polisakkaritler, steroidler, tiyosülfonatlar ve saponinler, viral enfeksiyonlarla savaştığı gözlenen başlıca fito-bileşenlerdir [4]. Koruyucu ve tamamlayıcı tıp olarak adlandırılan ve tıbbi özellikleri bulunan bitkilerin veya bu bitkilerden elde edilen çeşitli formülasyonların kullanımı ile çeşitli hastalıkların semptomlarının iyileştirilmesinin yanı sıra, viral enfeksiyonların tedavisi de başarılı şekilde gerçekleştirilmiştir. Nim bitkisi (ya da yalancı tespah ağacı) olarak da adlandırılan *Azadirachta indica*'ya ait tohumlar kullanılarak elde edilen Praneem adlı formülasyon HIV tedavisinde başarılı şekilde uygulanmıştır [15]. Çin'de bulunan 31 bölgenin 23'ünün sağlık otoriteleri, Covid-19 salgınının yayılmasının önlenmesinde bitkisel tedavilerin işe yaradığını belirtmişlerdir. Bu bölgelerde en sık kullanılan bitkisel formüller Radix astragali (Huangqi) ve Glycyrrhizae radix Et Rhizoma (Gancao)'dır [10].

Son zamanlarda yapılan birkaç çalışmada kateşinler (yeşil çay kateşinleri) ve kurkumin (diferuloilmetan; zerdeçaldan) gibi doğal polifenolik bileşiklerin İnsan İmmün Yetmezlik Virüsü (HIV), Herpes Simplex Virüsü, İnfluenza virüsü, Hepatit B ve C virüsleri (sırasıyla HBV ve HCV), Adenovirüs, Zika virüs, Chikungunya virüsü (CHIKV) gibi geniş bir virüs yelpazesine karşı antiviral aktivitelere sahip olduğu rapor edilmiştir [3, 4]. Her iki polifenolik bileşiğin antiviral aktivitelerini açıklamak için çeşitli mekanizmalar öne sürülmüştür. Örneğin, yeşil çay kateşinlerinin viral giriş ve replikasyonunun potansiyel bir baskılayıcısı olduğu, kurkuminin ise guanin nükleotidinin de novo sentezinde hız sınırlayıcı bir enzim olan monofosfat dehidrojenazın güçlü bir inhibitörü olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, yapılan bazı hayvan deneylerinde, yeşil çay kateşinleri ve kurkuminin

ACE2'nin ekspresyonunu inhibe ettiği de gözlemlenmiştir [3].

Bitkisel terapi ve tıbbi bitkilerin kullanımının son derece etkili bir teknik olduğu 2003 yılında yaşanan SARS epidemisinde ispatlanmıştır. Birçok ülke SARS ile mücadelelerinde bitkilerden yararlanmışlardır. Çok sayıda araştırmacı, 2003 yılında başlamak üzere çok sayıda sekonder metabolitin ve antiviral ekstraktın SARS-CoV üzerindeki etkilerini incelemeye başlamıştır. Bu amaçla 200'den fazla bitki taranmıştır [52].

Glisirhizinin HIV ve Ağır Akut Solunum Yolu Yetersizliği Sendromu (Severe Acute Respiratory Syndrome, SARS) benzeri virüslere karşı etkili olduğu rapor edilmiştir [53]. Cinatl et al. [54]; SARS hastalarından alınan iki klinik koronavirüs izolatına (FFM-1 ve FFM-2) karşı ribavirin, 6-azauridin, pirazofurin, mikofenolik asit ve ticari olarak mevcut olan bu bileşikler hastalarda antiviral, antitümör ve immünosupresif aktiviteleri için kullanılmışlardır. Çalışma sonunda, inceledikleri tüm bileşikler arasında SARS ile ilişkili virüsün replikasyonunu önlemede en aktif bileşiğin glisirizin olduğu bulunmuştur. Virüs replikasyonunun inhibisyonuna ek olarak, glisirizinin, replikatif döngünün erken aşamalarında virüsün adsorpsiyonunu ve penetrasyonunu da inhibe ettiği rapor edilmiştir. Glisirizin, hem adsorpsiyon periyodu sırasında hem de sonrasında verildiğinde en etkili bulunmuştur (EC50 300 mg / L).

Covid-19 ile mücadele kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarda, insanların bağışıklık sistemlerini desteklemek üzere bitkileri kullanmaları konusunda teşvik edilmeleri ve viral enfeksiyonların baskılanması amacıyla probiyotikler gibi fonksiyonel gıdalarla ilgili araştırmaların artırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Naja ve Hamdeh (2020), pandemi sürecinde bireysel, sosyal ve milli seviyelerde optimal beslenmeyi destekleyen çok seviyeli aksiyon planı belirlemişlerdir. Bu çalışmada asıl amaçlar, sağlıklı beslenmenin sürdürülmesi ve aynı zamanda kullanılabilen tüm bitkisel ürünler ile bitki türleri hakkında kapsamlı bir bilimsel veri tabanının oluşturulmasına yöneliktir [6].

Doğal bir eczane olarak görev yapan ülkemizin sahip olduğu derin etnobotanik bilgi birikimi dikkate alındığında, topraklarımızın Covid-19 tedavisinde kullanım potansiyeli bulunan pek çok bitkiye ev sahibi olduğu görülmektedir. Sahip oldukları güçlü antioksidan ve antimikrobiyal aktivitenin yanı sıra, antiviral aktivitesi de yüksek olan ve bağışıklık sistemini güçlendirme özelliği ile farklı ülkelerde de dikkatleri üzerine çeken laden (*Citrus spp.*), zeytin yaprağı (*Olea europea L.*), meyan kökü (*Glycyrrhiza glabra L.*) ve farklı kekik cinslerinin (*Origanum*, *Thymus* ve *Thymbra*) Covid-19 tedavisi için potansiyele sahip olarak görülmektedir [15]. Özellikle terpenoidler, alkaloidler, stilbenler ve flavonoidlerin bitkisel bazlı anti-viral ilaçların üretilmesi için temel biyolojik aktiviteye sahip metabolitler oldukları düşünülmektedir [6]. Şimdiye kadar; arktin, skutelarin, forsitozit, kaempferol, sekoksiloganin, nikotianamin, saikosaponin gibi çeşitli fitokimyasal bileşiklerin anti-SARS-CoV-2 aktivitesine sahip oldukları bildirilmiştir [8] (Tablo 3).

Tablo 3. Koronavirüslerle mücadelede kullanılan çeşitli bitki sekonder metabolitleri*

Sekonder Metabolit	Bitki	Etkili Olduğu Virüs	Etkili Olduğu Hedef	IC ₅₀ Değeri**	Kaynak
3'-O-metildioplakol	<i>Paulownia tomentosa</i>	SARS-CoV	PL ^{pro} inhibisyonu	9.5 µM	[55]
3'-O-metildioplakon	<i>Paulownia tomentosa</i>	SARS-CoV	PL ^{pro} inhibisyonu	13.2 µM	[55]
4'-O-metildioplakol	<i>Paulownia tomentosa</i>	SARS-CoV	PL ^{pro} inhibisyonu	9.2 µM	[55]
4'-O-metildioplakon	<i>Paulownia tomentosa</i>	SARS-CoV	PL ^{pro} inhibisyonu	12.7 µM	[55]
4'-O-metilbavaçalkon	<i>Psoralea corylifolia</i>	SARS-CoV	PL ^{pro} inhibisyonu	10.1 µM	[56]
6-geranil-4',5,7-trihidroksil-3',5'-dimetoksiflavanon	<i>Paulownia tomentosa</i>	SARS-CoV	PL ^{pro} inhibisyonu	13.9 µM	[55]
Amentoflavon	<i>Torreya nucifera</i>	SARS-CoV	3CL ^{pro} inhibisyonu	8.3 µM	[57]
Apigenin	<i>Torreya nucifera</i>	SARS-CoV	3CL ^{pro} inhibisyonu	280.8 µM	[57]
Baikalein	<i>Scutellaria baicalensis</i>	SARS-CoV-2	3CL ^{pro} inhibisyonu	0.39 µM	[58]
Baikalin	<i>Scutellaria baicalensis</i>	SARS-CoV		11 µg/ml	[59]
Bavaçinin	<i>Psoralea corylifolia</i>	SARS-CoV	PL ^{pro} inhibisyonu	38.4 µM	[55]
Broussoçalkon-B	<i>Broussonetia papyrifera</i>	SARS-CoV	3CL ^{pro} inhibisyonu	57.8 µM	[59]
		SARS-CoV	PL ^{pro} inhibisyonu	11.6 µM	
		MERS-CoV	3CL ^{pro} inhibisyonu	27.9 µM	
		MERS-CoV	PL ^{pro} inhibisyonu	112.9 µM	
Dihidrotanşinin	<i>Salvia miltiorrhiza</i>	MERS-CoV	Viral girişin inhibisyonu	1 µg/mL	[61]
Diplakon	<i>Paulownia tomentosa</i>	SARS-CoV	PL ^{pro} inhibisyonu	10.4 µM	[55]
Emodin	<i>Rheum</i> ve <i>Polygonum</i> cinslerinin ana bileşenleri	SARS-CoV	S proteininin ACE2'ye bağlanmasını engeller	200 µmol/L	[62]
Essin	<i>Aesculus hippocastanum</i>	SARS-CoV		6.0 µM	[63]
Gallokateşin gallat	<i>Pichia pastoris</i>	SARS-CoV	3CL ^{pro} inhibisyonu	47 µM	[64]
Glisirizin	<i>Glycyrrhiza glabra</i>	SARS-CoV	Virüs replikasyonunun inhibisyonu	300 mg/L	[54]
Hesperetin	<i>Isatis indigotica</i>	SARS-CoV	3CL ^{pro} inhibisyonu	8.3 µM	[65]
Hirsutenon	<i>Alnus japonica</i>	SARS-CoV	PL ^{pro} inhibisyonu	4.1 µM	[66]
İgüesterin	<i>Tritergium regelii</i>	SARS-CoV	3CL ^{pro} inhibisyonu	2.6 µM	[67]
İzobavaçalkon	<i>Psoralea corylifolia</i>	SARS-CoV	PL ^{pro} inhibisyonu	7.3 µM	[56]
İzolikuiritigenin	<i>Broussonetia papyrifera</i>	SARS-CoV	3CL ^{pro} inhibisyonu	61.9 µM	[59]
		SARS-CoV	PL ^{pro} inhibisyonu	24.6 µM	
		MERS-CoV	3CL ^{pro} inhibisyonu	33.9 µM	
		MERS-CoV	PL ^{pro} inhibisyonu	82.2 µM	

Tablo 3 (Devamı). Koronavirüslerle mücadelede kullanılan çeşitli bitki sekonder metabolitleri*

Sekonder Metabolit	Bitki	Etkili Olduğu Virüs	Etkili Olduğu Hedef	IC ₅₀ Değeri**	Kaynak
Kaempferol	<i>Broussonetia papyrifera</i>	SARS-CoV	3CL ^{pro} inhibisyonu	116.3 µM	[59]
		SARS-CoV	PL ^{pro} inhibisyonu	16.3 µM	
		MERS-CoV	3CL ^{pro} inhibisyonu	35.3 µM	
		MERS-CoV	PL ^{pro} inhibisyonu	206.6 µM	
Korilifol-A	<i>Psoralea corylifolia</i>	SARS-CoV	PL ^{pro} inhibisyonu	32.3 µM	[56]
Kuersetin	<i>Houttuynia cordata</i> Thunb.	Murin koronavirüs (M-CoV)	3CL ^{pro} inhibisyonu	125 µg/mL	[68]
	<i>Torreya nucifera</i>	SARS-CoV	3CL ^{pro} inhibisyonu	23.8 µM	[58]
	<i>Broussonetia papyrifera</i>	SARS-CoV	3CL ^{pro} inhibisyonu	52.7 µM	[60]
		SARS-CoV	PL ^{pro} inhibisyonu	8.6 µM	
Kuersetin-β-galaktozit	<i>Broussonetia papyrifera</i>	SARS-CoV	3CL ^{pro} inhibisyonu	128.8 µM	[60]
		SARS-CoV	PL ^{pro} inhibisyonu	51.9 µM	
		MERS-CoV	3CL ^{pro} inhibisyonu	68.0 µM	
		MERS-CoV	PL ^{pro} inhibisyonu	129.4 µM	
Ksantoangelol-E	<i>Angelica keiskei</i>	SARS-CoV	3CL ^{pro} ve PL ^{pro} inhibisyonu		[69]
Luteolin	<i>Torreya nucifera</i>	SARS-CoV	3CL ^{pro} inhibisyonu	20.2 µM	[58]
Mimulon	<i>Paulownia tomentosa</i>	SARS-CoV	PL ^{pro} inhibisyonu	14.4 µM	[55]
Neobavaizoflavon	<i>Psoralea corylifolia</i>	SARS-CoV	PL ^{pro} inhibisyonu	18.3 µM	[56]
Psoralidin	<i>Psoralea corylifolia</i>	SARS-CoV	PL ^{pro} inhibisyonu	4.2 µM	[56]
Pristimerin	<i>Triterygium regelii</i>	SARS-CoV	3CL ^{pro} inhibisyonu	5.5 µM	[67]
Selastrol	<i>Triterygium regelii</i>	SARS-CoV	3CL ^{pro} inhibisyonu	10.3 µM	[67]
Sefarantin	<i>Stephania japonica</i>	SARS-CoV-2	Viral giriş ve replikasyonun inhibisyonu	0.98 µmol/L	[70]
Sinigrin	<i>Isatis indigotica</i>	SARS-CoV	3CL ^{pro} inhibisyonu	217 µM	[65]
Tingenon	<i>Triterygium regelii</i>	SARS-CoV	3CL ^{pro} inhibisyonu	9.9 µM	[67]
Tomentin-A	<i>Paulownia tomentosa</i>	SARS-CoV	PL ^{pro} inhibisyonu	6.2 µM	[55]
Tomentin-B	<i>Paulownia tomentosa</i>	SARS-CoV	PL ^{pro} inhibisyonu	6.1 µM	[55]
Tomentin-C	<i>Paulownia tomentosa</i>	SARS-CoV	PL ^{pro} inhibisyonu	11.6 µM	[55]
Tomentin-D	<i>Paulownia tomentosa</i>	SARS-CoV	PL ^{pro} inhibisyonu	12.5 µM	[55]
Tomentin-E	<i>Paulownia tomentosa</i>	SARS-CoV	PL ^{pro} inhibisyonu	5.0 µM	[55]
Triptantrin	<i>Strobilanthes cusia</i>	HCoV-NL63	Özellikle viral RNA genom sentezini ve PL ^{pro} 2 aktivitesini bloke ederek, HCoV-NL63 replikasyonunun önlemek	1.52 µM	[71]

* SARS-CoV–Severe Acute Respiratory Syndrome=Ağır Akut Solunum Yolu Yetmezliği Sendromu; 3CL^{pro}–3-Chymotrypsin-Like Protease=3-Kimotripsin Benzeri Proteaz; PL^{pro}–Papain Like Protease=Papain Benzeri proteaz; MERS–Middle East Respiratory Syndrome=Orta Doğu Solunum Sendromu; ACE2–Angiotensin-Converting Enzyme 2=Anjiyotensin Dönüştürücü Enzim 2; M-CoV–Murin Koronavirüs; HCoV-NL63–HCoV-NL63 Korona Virüsü

**IC₅₀ = yarı-maksimum inhibisyon konsantrasyonu

Sahip oldukları terapötik özelliklerinden dolayı, allopatik ilaçlara göre daha az yan etki göstermeleri nedeniyle, bitkilerin Covid-19 tedavisinde kullanımı farklı araştırmacılar tarafından önerilmiştir. Polifenoller başta olmak üzere bitkilerden elde edilen çeşitli fitokimyasalların (flavonoitler, gallerler ve kuersetinler vb.), Covid-19 dahil olmak üzere koronavirüslerin proliferasyonunu önlediği belirlenmiştir. Bu ürünlerin farmasötik formülasyon ya da fonksiyonel gıda olarak kullanımı mümkün olabilmektedir. *Artemisia kermanensi*, *Eucalyptus caesia*, *Mentha* spp. *Rosmarinus officinalis*, *Satureja hortensis* ve *Zataria multiflora* yüksek fenolik içerikleri ile bu amaçla kullanılabilir bitkilerdir. Ayrıca yapılan araştırmalar

sonucunda, *Torreya nucifera*'da bulunan biflavonoitlerin SARS-CoV 3CL^{pro} replikasyonunu inhibe ettiği de gösterilmiştir [10]. SARS-CoV 3CL^{pro}, viral replikasyon sırasında koronavirüsün davranışlarını düzenleyen önemli bir viral enzimdir. Bu enzimin varlığı, enfekte olmuş konak hücrede SARS koronavirüslerinin replikasyonunu sağlanmasında kritik önem taşımaktadır. Gerçekleştirilen başka bir çalışmada, *Isatis indigotica* bitkisinden elde edilen ve anti-viral özellikleri olduğu bilinen betasitosterol, hesperetin, aloe emodin, indigo ve sinigrin fenolik bileşiklerinin, enzimin etkisini sınırlandırdıkları tespit edilmiştir. Çalışmada elde edilen IC₅₀ değerleri sırasıyla 1210, 365, 8.3, 752 ve 217 µmolar olarak belirlenmiştir.

Ayrıca doğal yollarla elde edilmiş 720 metabolitin bu enzim üzerindeki etkileri incelenmiş ve Pu'er (geleneksel Çin fermente çayı) ve siyah çaydan elde edilen theaflavin-3, 30-digallat, 3-isothaflavin-3-gallat ve tannik asit metabolitlerinin etkin şekilde enzimi inhibe ettikleri belirlenmiştir [9]. Ayrıca Senna bitkisinin yapraklarından alınan ekstratların Covid-19 hastalarında semptomları iyileştirdiği belirtilmiştir. Geleneksel Çin tıbbi formülasyonlarından olan ve 13 farklı bitkinin karışımını içeren Lianhuanqingwen (LH)'nin ise SARS-CoV-2 replikasyonunu baskıladığı, proinflamatuvar sitokin üretimini azalttığı ve SARS-CoV-2 hücrelerinde yapısal değişikliğe sebep olduğu gösterilmiştir. Ayrıca *in vitro* denemelerde LH'nin SARS-CoV-2'ye karşı antiviral aktivite gösterdiği de ispatlanmıştır [10].

Kınakına ağacı (chincona) kabuğundan elde edilen kinin, önemli bir alkaloiddir. Sentetik bir kinin türevi olan klorokininin, biyoyumumluluğu nedeniyle sahip olduğu DNA-interkalasyon özelliklerini, koronavirüslerin semptomlarının azaltılmasında etkili olduğu, bu şekilde SARS-CoV-2 için iyi bir ilaç adayı olduğu düşünülmüştür [9]. Ancak çalışmalar sırasında vertiküler aritmi, kutanöz ters reaksiyonlar ve ateşli karaciğer yetmezliği gibi ciddi yan etkiler ile karşılaşılmıştır. Yan etkilerine rağmen yine de doğal kinin türevleri ve analoglarının semptomların azaltılmasında etkili olduğu görülmüştür. Benzer şekilde *Rauwolfia serpentina* bitkisine ait kuru köklerden elde edilen reserpin alkaloidinin de SARS-CoV'un replikasyonunu inhibe ettiği belirlenmiştir. Ayrıca palmatin ve çelidoin de Covid-19 ile mücadelede etkili olabileceği düşünülen diğer alkaloidlerdir [7].

Kompleks oluşturma kabiliyetine sahip çeşitli heterosiklik moleküller, giriş inhibitörü ilaçların geliştirilmesinde kullanılabilir [12]. Aromatik halkaları ve hidroksil (-OH) grupları ile bilinen flavon glikozitleri, fenolikler ve polifenolik bileşikler de gösterdikleri antiviral etkileri nedeniyle birçok araştırmacı tarafından önerilmiştir. Hidroksil gruplarının viral protein aktivitesini, proteinlerin pozitif yüklü amino grupları ile hidrojen bağları kurarak inhibe ettikleri düşünülmektedir. Polifenoller ise, viral zarfın lipoprotein tabakaları arasına girmekte ve virüsün konak hücreye girişini engellemektedir. Örneğin; Rheum ve Polygonum bitkilerinden elde edilen krisin flavonoidi, S proteini üzerinde etkili olmuş ve ACE2 interaksiyonunu etkilemiştir [7].

Esansiyel yağlar; viral zarfın çift lipit tabakasının arasına yerleşmekte ve membran akışkanlığına etki etmektedir. Yapılan araştırmalar lipofilik yapıları nedeniyle monoterpen, oksijenli seksiterpenler ve fenilpropanoidlerin, koronavirüslerin bilayer fosfolipit tabakasının içine yerleştiğini göstermiştir. Ökalyptüs (*Eucalyptus* spp.) ağacından elde edilen ökalyptol esansiyel yağının ise, başta SARS-CoV-2 olmak üzere koronavirüsler üzerinde etkili bir antiviral bileşik olduğu belirlenmiştir. Bu antiviral özellik ise metabolitin eter (-O), keton (=O) ve hidroksil (-OH) gruplarına bağlanmıştır [9].

Gerçekleştirilen başka bir çalışmada ise, *Stephania tetrandra* ve Menispermaceae ailesinin benzer bitkilerinden elde edilen farmasötik olarak önemli 3 bis-benzilizokinolin

alkaloitinin (sefarantin-CEP, fangkinolin-FAN ve tetrandrin-TET) HCoV-OC43 koronavirüsü ile enfekte olmuş MRC-5 insan akciğer hücrelerindeki etkileri saptanmıştır. Bu metabolitler, ayrıca anti-inflamatuvar ve anti-kanser aktivite de göstermektedirler. Çalışma sonucunda metabolitlerin HCoV-OC43'ün konakçı hücre içerisinde replikasyonunun ciddi oranda düştüğü ve IC50 değerlerinin CEP, FAN ve TET için sırası ile 0.83, 1.01 ve 0.33 olduğu belirtilmiştir. Ayrıca N ve S proteinlerinin ekspresyonu da bu üç metabolit tarafından sınırlandırılmıştır [9].

Bitkilerden sekonder metabolitlerin üretimi; bitki genetiği, çevresel faktörler, iklim, mevsim, büyüme periyodu, bitki kısmı, hasat öncesi ve sonrasındaki işlemlerin yanı sıra, ekstraksiyon tekniklerine de bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Tüm bu faktörler, klasik yöntemlerle sekonder metabolit üretimini kısıtlamakta, bu noktada ise bitki doku kültürü uygulamaları devreye girmektedir [50]. Bitki doku kültürü, farklı bitki hücreleri, organları veya dokularının totipotensi özelliğinden faydalanmak adına aksenik koşullarda kültüre alınması işlemidir [72]. Bitki doku kültürlerinin kullanımının en büyük avantajı, sekonder metabolizmanın savunma cevabının tetiklenmesi ile aktive olmasıdır. Bu tetiklenme, üretilen metabolit miktarının biyotik ya da abiyotik stres sonucu elisitasyon ile artmasını sağlamaktadır [7]. Elisitasyon, *in vitro* ve *ex vivo* gelişen bitkilerde biyokütlenin ve sekonder metabolit üretimlerinin artırılması olarak tanımlanmaktadır [73]. Elisitasyonda kullanılan elisitörler, bu işlemi sinyal iletim kaskatlarına müdahale ederek gerçekleştirirler [49].

6 Sonuçlar

Koronavirüsler, toplum sağlığını tehdit eden ve ölümcül sonuçlar doğuran virüsler olmalarına rağmen, antiviral ilaç geliştirilmesine yönelik çalışmalar sadece SARS ve MERS üzerinde yoğunlaşmıştır. Çeşitli hayvan modelleri ve hücre kültürü çalışmaları kullanılarak yapılan araştırmalar ile virüslerin konakçı hücreye girişini veya çoğalma hızını azaltıcı pek çok ilaç adayı üretilmiştir. Covid-19 kaynaklı semptomların ve ölüm oranlarının azaltılması amacıyla uygun tedavilerin geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar devam etmekte birlikte, günümüzde hala başarı sağlanamamıştır. Özellikle virüsün hızlı mutasyona uğrama özelliği nedeniyle yeni formülasyonların ve alternatif tekniklerin denenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Covid-19 pandemisi çok hızlı değişen ve çok hızlı gelişen bir durumdur. DSÖ, hastalık ve ölüm oranlarını düzenli olarak takip etmekte ve paylaşmaktadır. Modern batı tıbbi, henüz Covid-19 tedavisi için tamamen etkili bir yöntem önermemiştir.

Khan et al., [7], Covid-19 ile mücadele araştırmaları devam ederken, bitkiler aleminin araştırılması gereken önemli bir alan olduğunu belirtmişlerdir. DSÖ, dünya üzerindeki hastalıkların tedavisinin %80'inin bitkilerle gerçekleştirildiğini bildirmiştir. Ancak aşırı hasat ve bilinçsiz/dikkatsiz bir şekilde gerçekleştirilen toplama işlemleri, bitkisel popülasyonlara zarar vererek çoğunun yok olma tehlikesi ile karşı karşıya kalmasına neden olmaktadır.

Bitkisel ilaçların tamamen güvenli olduğu ve hiçbir yan etkisinin bulunmadığı düşüncesi tamamen yanlış bir bakış

açısıdır. Farklı bitkilerde birbirlerinden farklı çok sayıda toksik bileşik bulunmaktadır. Bu sebeple, bitkilerde sekonder metabolizma yollarının detaylıca incelenmesi, güvenli kullanım için önemlidir. Benzer şekilde önemli olan diğer faktörler de coğrafya ve iklimsel koşulların sekonder metabolit çeşitliliği üzerindeki etkisidir. Bu noktada tüm bu sorunların çözümünde bitki biyoteknolojisi bir araç olmaktadır.

Bitki bazlı biyolojik üretim sistemlerinin, acil üretim çalışmaları için üretim ana hatlarını hızla değiştirme yeteneği, pandemik durumlar için büyük bir avantaj olarak görülmektedir. Mevcut pandemik durum dikkate alındığında özellikle aşının dünya genelindeki tüm ülkelere dağıtımında ciddi sıkıntılar yaşandığı ortaya çıkmıştır. Bu nedenle fermentasyon tabanlı ürün sistemlerinin maliyetinin yaklaşık %50'si olarak düşünülen nispeten düşük maliyetli bitki tabanlı biyolojik üretim platformları, halihazırda ilaç endüstrisinden yoksun olan ülkeler için çok önemli bir değer sunmaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %6

Kaynaklar

- [1] K. Dhama, N. Senthilkumar, M.I. Yattoo, S.K. Patel, R. Tiwari, S.K. Saxena and H. Harapan, Plant-based vaccines and antibodies to combat COVID-19: current status and prospects. *Human Vaccines & Immunotherapeutics*, 16:12, 2913-2920, 2020. <https://doi:10.1080/21645515.2020.1842034>.
- [2] B. Shanmugaraj and W. Phoolcharoen, Addressing demand for recombinant biopharmaceuticals in the COVID-19 era. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, 14(2), 49-51, 2021. <https://doi:10.4103/1995-7645.306736>.
- [3] A.B. Jena, N. Kanungo, V. Nayak, G.B.N. Chainy and J. Dandapat, Catechin and curcumin interact with S protein of SARS CoV2 and ACE2 of human cell membrane: insights from computational studies. *Scientific Reports*, 11, 2043, 1-14, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81462-7>.
- [4] S. Shinde and A. Thomas, Plant derived polyphenol - Catechin as a potential antiviral drug against Covid-19. *Pharmaceutical Resonance*, 3(2), 58-62, 2021. <https://doi.org/10.1080/07391102.2020.1796810>.
- [5] M. J. I. Shohag, F. Z. Khan, L. Tang, Y. Wei, Z. He and X. Yang, COVID-19 Crisis: How Can Plant Biotechnology Help? *Plants*, 10, 352, 1-10, 2021. <https://doi.org/10.3390/plants10020352>.
- [6] O. Sytar, M. Brestic, S. Hajihashemi, M. Skalicky, J. Kubeš, L. Lamilla-Tamayo, U. Ibrahimova, S. Ibadullayeva and M. Landi, COVID-19 Prophylaxis Efforts Based on Natural Antiviral Plant Extracts and Their Compounds. *Molecules*, 26, 727, 1-19, 2021. <https://doi.org/10.3390/molecules26030727>.
- [7] T. Khan, M. A. Khan, K. Karam, N. Ullah, Z. U. R. Mashwani and A. Nadhman, Plant *in vitro* Culture Technologies; A Promise Into Factories of Secondary Metabolites Against COVID-19. *Frontiers in Plant Science*, 12, 610194, 1-21, 2021. <https://doi:10.3389/fpls.2021.610194>.
- [8] A. Ferid, A. Mohammed, S.I. Khalivulla, M. Korivi and M.K.A.A. Razab, Plant cell and callus cultures as an alternative source of bioactive compounds with therapeutic potential against coronavirus disease (COVID-19). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 596 012099, 2020. <https://doi:10.1088/1755-1315/596/1/012099>.
- [9] I. Jahan and A. Onay, Potentials of plant-based substance to inhabit and probable cure for the COVID-19. *Turkish Journal of Biology*, 44, 228-24, 2020. <https://doi:10.3906/biy-2005-114>.
- [10] N. Mahmood, S.B. Nasir and K. Hefferon, Plant-Based Drugs and Vaccines for COVID-19. *Vaccines*, 9, 15, 1-16, 2021. <https://doi.org/10.3390/vaccines9010015>.
- [11] K. Siri wattananon, S. Manopwisedjaroen, P. Kanjanasirirat, P. Budi Purwono, K. Rattanapisit, B. Shanmugaraj, D.R. Smith, S. Borwornpinyo, A. Thitithanyanont and W. Phoolcharoen, Development of Plant-Produced Recombinant ACE2-Fc Fusion Protein as a Potential Therapeutic Agent Against SARS-CoV-2. *Frontiers in Plant Science*, 11, 604663, 1-12, 2021. <https://doi:10.3389/fpls.2020.604663>.
- [12] M. I. Sohail, A. Siddiqui, E. Natasha and M. Karman, Chapter 25: Phytomedicine and the COVID-19 pandemic. In R.A.Bhat, K.R. Hakeem, M.A.Dervash (Eds.) *Phytomedicine: A Treasure of Pharmacologically Active Products from Plants*. 693-708. 2021.
- [13] S. Rosalez-Mendoza, V. A. Merquez-Escobar, O. Gonzales-Ortega, R. Nieto-Gomez and J.I. Arevalo-Villalobos, What Does Plant-Based Vaccine Technology Offer to the Fight against COVID-19?. *Vaccines*, 8, 183, 1-19, 2020. <https://doi:10.3390/vaccines8020183>.
- [14] T.M. Karpinsky, M. Ozarowski, A.S. Mrozikiewicz, H. Wolski and D. Wlodkovic, The 2020 race towards SARS-CoV-2 specific vaccines. *Theranostics*, 11 (4), 1690-1702, 2021. <https://doi:10.7150/thno.53691>.
- [15] N. Şekeroglu and S. Gezici, Koronavirüs Pandemisi ve Türkiye'nin Bazı Şifalı Bitkileri. *Anadolu Kliniği Tıp Bilimleri Dergisi*, 25 (Özel Sayı 1), 163-182, 2020. <https://doi:10.21673/anadoluklin.724210>.
- [16] D. Paraskevis, E. G. Kostaki, G. Magiorkinis, G. Panayiotakopoulos, G. Sourvinos and S. Tsiodras, Full-genome evolutionary analysis of the novel corona virus (2019-nCoV) rejects the hypothesis of emergence as a result of a recent recombination event. *Infection, Genetics and Evolution*, 79, 104212, 1-4, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.meegid.2020.104212>.
- [17] Y. C. Liu, R. L. Kuo and S. R. Shih, COVID-19: The first documented coronavirus pandemic in history. *Biomedical Journal*, 43, 328-333, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.bj.2020.04.007>.
- [18] M. Letko, A. Marzi and V. Munster, Functional assessment of cell entry and receptor usage for SARS-

- CoV-2 and other lineage B betacoronaviruses. *Nature Microbiology*, 5, 562-569, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41564-020-0688-y>.
- [19] W. Liu, M.J. Moore, N. Vassilleva, J. Sui, S.K. Wong, M.A. Berne, M. Somasundaran, J.L. Sullivan, K. Luzuriaga, T.C. Greenough, H. Choe and M. Farzan, Angiotensin-converting enzyme 2 is a functional receptor for the SARS coronavirus. *Nature*, 426, 450-454, 2003. <https://doi.org/10.1038/nature02145>.
- [20] M. De Jesus, J. T. Gaza, H. Junio and R. Nellas, Molecular docking of secondary metabolites from *Psidium guajava* L. and *Piper nigrum* L. to Covid-19 associated receptors ACE2, Spike Protein RBD, and TMPRSS2. *ChemRxiv*. Preprint, 2020. <https://doi.org/10.26434/chemrxiv.12867350.v1>.
- [21] F. R. Bhuiyan, S. Howlader, T. Raihan and M. Hasan, Plants metabolites: Possibility of natural therapeutics against the COVID-19 pandemic, *Frontiers in Medicine*, 7, 444, 1-26, 2020. <https://doi.org/10.3389/fmed.2020.00444>.
- [22] L. Liu, J. Y. Gao, W. Hu, X. Zhang, L. Guo, C. Liu, Y. Tang, C. Lang, F. Mou, Z. Yi, Q. Pei, K. Sun, J. Xiang and J. Xiao, Clinical characteristics of 51 patients discharged from hospital with COVID-19 in Chongqing, China. *medRxiv The Preprint Server for Health Science*, 2020. <https://doi.org/10.1101/2020.02.20.20025536>.
- [23] X. Qin, S. Qiu, Y. Yuan, Y. Zong, Z. Tuo, J. Li and J. Liu, Clinical characteristics and treatment of patients infected with COVID-19 in Shishou, China. *The Lancet Respiratory Medicine*, 2020. Preprint. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3541147>.
- [24] S. Sharma and N. Negi, Production and Challenges of Plant based Vaccines. *Annals of the Romanian Society for Cell Biology*, 25(1), 3625 – 3639, 2021.
- [25] Z. LeBlanc, P. Waterhouse and J. Bally, Plant-Based Vaccines: The Way Ahead? *Viruses*, 13, 5, 2021. <https://dx.doi.org/doi:10.3390/v13010005>.
- [26] D. A. Ullisch, C. A. Müller, S. Maibaum, J. Kirchhoff, A. Schiermeyer, S. Schillberg, J. L. Roberts, W. Treffenfeld and J. Büchs, Comprehensive characterization of two different *Nicotiana tabacum* cell lines leads to doubled GFP and HA protein production by media optimization. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 113(2), 242–248, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2011.09.022>.
- [27] Z. He, X. Du, W. Yao and J. Dai, Pharmaceutical proteins produced in plant bioreactor in recent years. *African Journal of Biotechnology*, 7 (25), 4917-4925, 2008.
- [28] K. Herbers and U. Sonnewald, Production of new/modified proteins in transgenic plants. *Current Opinion in Biotechnology*, 10, 163–168, 1999. [https://doi.org/10.1016/s0958-1669\(99\)80029-9](https://doi.org/10.1016/s0958-1669(99)80029-9).
- [29] E. Altundiş, S. Gülçe-İz, M. Ö. Ozen, P. Nartop, İ. Deliloğlu-Gürhan and A. Gürel, Plant derived edible vaccines and therapeutics, *Frontier in Clinical Drug Research: Anti-Infectives*, Vol(1), 200-236, 2014.
- [30] Y. C. Kuo, C. C. Tan, J. Y. Ku, W. C. Hsu, S. C. Su, C. A. Lu and L. F. Huang, Improving pharmaceutical protein production in *Oryza sativa*. *International Journal of Molecular Science*, 14, 8719-8739, 2013. <https://doi.org/10.3390/ijms14058719>.
- [31] B. R. Holtz, B. R. Berquist, L. D. Bennet, V. J. M. Kommineni, R. K. Munigunti, E. L. White, D. C. Wilkerson, K. Y. I. Wongii, L. H. Ly and S. Marcel, Commercial-scale biotherapeutics manufacturing facility for plant-made pharmaceuticals. *Plant Biotechnology Journal*, 13, 1180–1190, 2015. <https://doi.org/10.1111/pbi.12469>.
- [32] A. K. Sharma and M. K. Sharma, Plants as bioreactors: Recent developments and emerging opportunities. *Biotechnology Advances*, 27, 811-832, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2009.06.004>.
- [33] L. R. Wilken and Z. L. Nikolov, Recovery and purification of plant-made recombinant proteins. *Biotechnology Advances*, 30, 419-433, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.07.020>.
- [34] J. Xu, M. C. Dolan, G. Medrano, C. L. Cramer and P. J. Weathers, Green factory: Plants as bioproduction platforms for recombinant proteins. *Biotechnology Advances*, 30, 1171–1184, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.08.020>.
- [35] M. M. Rigano and A. M. Walmsley, Expression systems and developments in plant-made vaccines. *Immunology and Cell Biology*, 83, 271–277, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1711.2005.01336.x>.
- [36] M. M. Rigano, G. D. Guzman, A. M. Walmsley, L. Frusciante and A. Barone, Production of pharmaceutical proteins in solanaceae food crops. *International Journal of Molecular Science*, 14, 2753-2773, 2013. <https://doi.org/10.3390/ijms14022753>.
- [37] P. Rashmi and B. L. R. Madhavi, Vaccine development and delivery strategies—A glimpse. *Journal of Vaccines and Immunology*, 7(1), 004-008, 2021. <https://dx.doi.org/10.17352/jvi.000038>.
- [38] Medicago, 2020. (Erişim tarihi: 20.03.2021) <https://www.medicago.com/en/covid-19-programs/>
- [39] Covid19 Vaccine Tracker. (Erişim tarihi: 20.03.2021) <https://covid19.trackvaccines.org/vaccines/18/>
- [40] K. A. McDonald and R. B. Holtz, From farm to finger prick—A perspective on how plants can help in the fight against COVID-19. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 782, 1-5, 2020. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00782>.
- [41] S. Nandi, A. T. Kwong, B. R. Holtz, R. L. Erwin, S. Marcel, and K. A. McDonald, Techno-economic analysis of a transient plantbased platform for monoclonal antibody production. *mAbs*, 8, 1456–1466, 2016. <https://doi.org/10.1080/19420862.2016.1227901>.
- [42] Ortaakarsu, A. (Erişim tarihi: 24.03.2021). <https://www.ortaakarsu.net/?cat=6>
- [43] N. Mohammadi and N. Shaghghi, Inhibitory effect of eight secondary metabolites from conventional medicinal plants on COVID_19 virus protease by molecular docking analysis. *ChemRxiv*. Preprint, 2020. <https://doi.org/10.26434/chemrxiv.11987475.v1>

- [44] M. H. Abdellatif, A. Ali, A. Ali and M. A. Hussien, Computational studies by molecular docking of some antiviral drugs with COVID-19 receptors are an approach to medication for COVID-19. *Open Chemistry*, 19, 245-264, 2021. <https://doi.org/10.1515/chem-2021-0024>.
- [45] R. Patil, R. Chikhale, P. Khanal, N. Gurav, M. Ayyanar, S. Sinha, S. Prasad, Y. N. Dey, M. Wanjari and S.S. Gurav, Computational and network pharmacology analysis of bioflavonoids as possible natural antiviral compounds in COVID-19. *Informatics in Medicine Unlocked*, 22, 100504, 1-14, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.imu.2020.100504>.
- [46] D. Kumar and S. Bhagat, Natural compound against COVID-19 in silico screening by attacking Mpro and ACE2 using molecular docking. *International Journal for Research in Applied Sciences and Biotechnology*, 7(6), 168-180, 2020. <https://doi.org/10.31033/ijrasb.7.6.25>.
- [47] H. M. Wahedi, S. Ahmad and S. W. Abbasi, Stilbene-based natural compounds as promising drug candidates against COVID-19. *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*, 1-10, 2020. <https://doi.org/10.1080/07391102.2020.1762743>.
- [48] P. Pandey, F. Khan, A. K. Rana, Y. Srivastava, S. K. Jha and N. K. Jha, A drug repurposing approach towards elucidating the potential of flavonoids as COVID-19 spike protein inhibitors. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 11(1), 8482 – 8501, 2021. <https://doi.org/10.33263/BRIAC111.84828501>.
- [49] S. Kumar, P. Kashyap, S. Chowdhury, S. Kumar, A. Panwar and A. Kumar, Identification of phytochemicals as potential therapeutic agents that binds to Nsp15 protein target of coronavirus (SARS-CoV-2) that are capable of inhibiting virus replication. *Phytomedicine*, In Press, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2020.153317>.
- [50] R. Farjaminezhad and G. Garoosi, Improvement and prediction of secondary metabolites production under yeast extract elicitation of *Azadirachta indica* cell suspension culture using response surface methodology. *AMB express*, 11-43, 1-16, 2021. <https://doi.org/10.1186/s13568-021-01203-x>.
- [51] A. Teke, M. Yener, Ş. Akkuş and A. Gümüşçü, Chapter 12: Halkın Tıbbi-Aromatik Bitkiler Kullanımı Ve Tanımasında Bilinç Durumu: Çumra Örneği. *Research in Medicinal and Aromatic Plants* (Edt: Gülen Özyazıcı). Iksad Publication. 267:289. 2020.
- [52] S. Mazraedoost, G. Behbudi, S. M. Mousavi and S. A. Hashemi, Covid-19 treatment by plant compounds. *Advances in Applied NanoBio-Technologies*, 2(1), 23-33, 2020. [https://dx.doi.org/10.47277/AANBT/2\(1\)33](https://dx.doi.org/10.47277/AANBT/2(1)33).
- [53] M. Srivastava and P. Misra, Enhancement of Medicinally Important Bioactive Compounds in Hairy Root Cultures of *Glycyrrhiza*, *Rauwolfia*, and *Solanum* Through *In Vitro* Stress Application. In: Malik S. (eds) *Production of Plant Derived Natural Compounds through Hairy Root Culture*. Springer, Cham. 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-69769-7_6
- [54] J. Cinatl, B. Morgenstern, G. Bauer, P. Chandra, H. Rabenau and H. W. Doerr, Glycyrrhizin, an active component of liquorice roots, and replication of SARS-associated coronavirus. *The Lancet*, 361, 2045-2046, 2003. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(03\)13615-x](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(03)13615-x).
- [55] J. K. Cho, M. J. Curtis-Long, K. H. Lee, D. W. Kim, H. W. Ryu, H. J. Yuk and K. H. Park, Geranylated flavonoids displaying SARS-CoV papain-like protease inhibition from the fruits of *Paulownia tomentosa*. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 21, 3051-3057, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.bmc.2013.03.027>.
- [56] D. W. Kim, K. H. Seo, M. J. Curtis-Long, K. Y. Oh, J. W. Oh, J. K. Cho, K. H. Lee and K. H. Park, Phenolic phytochemical displaying SARS-CoV papain-like protease inhibition from the seeds of *Psoralea corylifolia*. *Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry*, 29(1), 59-63, 2014. <https://doi.org/10.3109/14756366.2012.753591>.
- [57] Y. B. Ryu, H. J. Jeong, J. H. Kim, M. Y. Kim, J. Y. Park, D. Kim, T. T. H. Nguyen, S. J. Park, J. S. Chang, K. H. Park, M. C. Rho and W. S. Lee, Biflavonoids from *Torreya nucifera* displaying SARS-CoV 3CL (pro) inhibition. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 18(22), 7940-7947, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.bmc.2010.09.035>.
- [58] H. Liu, F. Ye, Q. Sun, H. Liang, C. Li, S. Li, R. Lu, B. Huang, W. Tan and L. Lai, *Scutellaria baicalensis* extract and baicalein inhibit replication of SARS-CoV-2 and its 3C-like protease *in vitro*. *Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry*, 36(1), 497-503, 2021. <https://doi.org/10.1080/14756366.2021.1873977>.
- [59] F. Chen, K. H. Chan, Y. Jiang, R. Y. T. Kao, H. T. Lu, K. W. Fan, V. C. C. Cheng, W. H. W. Tsui, I. F. N. Hung, T. S. W. Lee, Y. Guan, J. S. M. Peiris and K. Y. Yuen, *In vitro* susceptibility of 10 clinical isolates of SARS coronavirus to selected antiviral compounds. *Journal of Clinical Virology*, 31, 69-75, 2004. <http://doi.org/10.1016/j.jcv.2004.03.003>.
- [60] J. Y. Park, H. J. Yuk, H. W. Ryu, S. H. Lim, K. S. Kim and K. H. Park, Evaluation of polyphenols from *Broussonetia papyrifera* as coronavirus protease inhibitors. *Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry*, 32(1), 504-512, 2017. <http://dx.doi.org/10.1080/14756366.2016.1265519>.
- [61] J. Y. Kim, Y. I. Kim, S. J. Park, I. K. Kim, Y. K. Choi and S. H. Kim, Safe, high-throughput screening of natural compounds of MERS-CoV entry inhibitors using a pseudovirus expressing MERS-CoV spike protein. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 52, 730-732, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2018.05.003>.
- [62] T. Y. Ho, S. L. Wu, J. C. Chen, C. C. Li and C. Y. Hsiang, Emodin blocks the SARS coronavirus spike protein and angiotensin-converting enzyme 2 interaction. *Antiviral Research*, 74, 92-101, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.antiviral.2006.04.014>.
- [63] C. Y. Wu, J. T. Jan, S. H. Ma, C. J. Kuo, H. F. Juan, Y. S. E. Cheng, H. H. Hsu, H. C. Huang, D. Wu, A. Brik,

- F. S. Liang, R. S. Liu, J. M. Fang, S. T. Chen, P. H. Liang and C. H. Wong, Small molecules targeting severe acute respiratory syndrome human coronavirus. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 101(27), 10012–10017, 2004. <https://doi.org/10.1073/pnas.0403596101>.
- [64] T. T. H. Nguyen, H. J. Woo, H. K. Kang, V. D. Nguyen, Y. M. Kim, D. W. Kim, S. A. Ahn, Y. Xia and D. Kim, Flavonoid-mediated inhibition of SARS coronavirus 3C-like protease expressed in *Pichia pastoris*. Biotechnology Letters, 34, 831–838, 2012. <https://doi.org/10.1007/s10529-011-0845-8>.
- [65] C. W. Lin, F. J. Tsai, C. H. Tsai, C. C. Lai, L. Wan, T. Y. Ho, C. C. Hsieh and P. D. L. Chao, Anti-SARS coronavirus 3C-like protease effects of *Isatis indigotica* root and plant-derived phenolic compounds. Antiviral Research, 68, 36–42, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.antiviral.2005.07.002>.
- [66] J. Y. Park, H. J. Jeong, J. H. Kim, Y. M. Kim, S. J. Park, D. Kim, K. H. Park, W. S. Lee and Y. B. Ryu, Diarylheptanoids from *Alnus japonica* inhibit papain-like protease of severe acute respiratory syndrome coronavirus. Biological and Pharmaceutical Bulletin, 35(11), 2036–2042, 2012. <https://doi.org/10.1248/bpb.b12-00623>.
- [67] Y. B. Ryu, S. J. Park, Y. M. Kim, J. Y. Lee, W. D. Seo, J. S. Chang, K. H. Park, M. C. Rho and W. S. Lee, SARS-CoV 3CLpro inhibitory effects of quinone-methide triterpenes from *Tripterygium regelii*. Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters, 20, 1873–1876, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.bmcl.2010.01.152>.
- [68] K. H. Chiow, M. C. Phoon, T. Putti, B. K. H. Tan and V. T. Chow, Evaluation of antiviral activities of *Houttuynia cordata* Thunb. extract, quercetin, quercetrin and cinanserin on murine coronavirus and dengue virus infection. Asian Pacific Journal of Tropical Medicine, 9(1), 1–7, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apjtm.2015.12.002>.
- [69] J. Y. Park, J. A. Ko, D. W. Kim, Y. M. Kim, H. J. Kwon, H. J. Jeong, C. Y. Kim, K. H. Park, W. S. Lee and Y. B. Ryu, Chalcones isolated from *Angelica keiskei* inhibit cysteine proteases of SARS-CoV. Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry, 31(1), 23–30, 2016. <https://doi.org/10.3109/14756366.2014.1003215>.
- [70] H. H. Fan, L. Q. Wang, W. L. Liu, X. P. An, Z. D. Liu, X. Q. He, L. H. Song and Y. G. Tong, Repurposing of clinically approved drugs for treatment of coronavirus disease 2019 in a 2019-novel coronavirus-related coronavirus model. Chinese Medical Journal, 133(9), 1051–1056, 2020. <https://doi.org/10.1097/CM9.0000000000000797>.
- [71] Y. C. Tsai, C. L. Lee, H. R. Yen, Y. S. Chang, Y. P. Lin, S. H. Huang and C. W. Lin, Antiviral action of tryptanthrin isolated from *Strobilanthes cusia* leaf against Human Coronavirus NL63. Biomolecules, 10 (366), 1–17, 2020. <https://doi.org/10.3390/biom10030366>.
- [72] M. Hesami and A. M. P. Jones, Application of artificial intelligence models and optimization algorithms in plant cell and tissue culture. Applied Microbiology and Biotechnology, 104, 9449–9485, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10888-2>.
- [73] N. Nabi, S. Singh and P. Saffeuallah, Responses of *in vitro* cell cultures to elicitation: regulatory role of jasmonic acid and methyl jasmonate: a review. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, 57, 341–355, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11627-020-10140-6>.

