

NÖHÜ MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ DERGİSİ NOHU JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCES

ISSN: 2564-6605

Cilt: 11 Sayı: 1 2022

Volume: 11 Issue: 1 2022



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 Korkanç

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

Doç. Dr./Assoc. Prof. Dr. Firdevs Uysal

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

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. Ceyhun 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>
Doç. Dr. Firdevs Uysal (Yardımcı Editör/ <i>Co-Editor</i>)	İnşaat Mühendisliği <i>Civil Engineering</i>
Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Şakir Dokuz (Yardımcı Editör/ <i>Co-Editor</i>)	Bilgisayar Mühendisliği <i>Computer 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>
Prof. Dr. Bora Timurkutluk	Makine Mühendisliği <i>Mechanical Engineering</i>
Prof. Dr. Ali Özgün Ok	Geomatik Mühendisliği <i>Geomatics Engineering</i>
Doç. Dr. Yasin Kabalcı	Elektrik-Elektronik Mühendisliği <i>Electrical Electronics 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: mbdergisi@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

Araştırma Makalesi/Research Article

Türkiye'de mutluluk düzeyini etkileyen faktörlerin makine öğrenme ve nitelik seçme algoritmaları ile belirlenmesi

Identifying the factors affecting the level of happiness in Turkey using machine learning and feature selection algorithms

İncilay Yıldız, Fatih Abut

001-009

Araştırma Makalesi/Research Article

Retina kan damarlarını çıkarmak için eşikleme temelli morfolojik bir yöntem

A threshold-based morphological method for extraction blood vessels from retina

Buket Toptaş, Davut Hanbay

010-016

Çevre Mühendisliği / Environmental Engineering

Araştırma Makalesi/Research Article

Proje aşamasında öngörülen ve mevcut durumda sağlanan verimin karşılaştırılması: Azerbaycan Nahçıvan atıksu arıtma tesisi örneği

The comparison of efficiency between project phase and current situation-case study of Azerbaijan Nakhchivan wastewater treatment plant

Ahmet Saatçı, Özge Hanay

017-024

Research Article/Araştırma Makalesi

The effect of supporting electrolyte type and concentration on the phosphate removal from water by electrocoagulation method using iron electrodes

Elektrokoagülasyon yöntemi ile demir elektrotlar kullanılarak sulardan fosfat giderimi üzerine destek elektrolit türü ve konsantrasyonunun etkisi

Şahset İrdemez, Züleyha Bingül, Sinan Kul, Fatma Ekmekyapar Torun, Nuhi Demircioğlu

025-030

Araştırma Makalesi/Research Article

Sucul ortamdan amoksisilin gideriminde hibrit adsorpsiyon/oksidasyon performansının değerlendirilmesi

Removal of amoxicillin in aqueous media by hybrid adsorption/oxidation

Dilşad Öztürk, Hamdi Mihçioğur

031-038

Araştırma Makalesi/Research Article

COVID-19 salgını dönemindeki kısıtlamaların sera gazı salınımına etkisi

Effect of the lockdown on greenhouse gas emissions during the COVID-19 pandemic

Hülya Aykaç Özen

039-047

Elektrik-Elektronik Mühendisliği / *Electrical-Electronic Engineering*

Araştırma Makalesi/Research Article

Abdominal bilgisayarlı tomografi görüntülerinde böbrek taşlarının sınırlarının ve sayılarının görüntü işleme yöntemleri kullanılarak tespiti

The detection of the borders and numbers of kidney stones in the abdominal computed tomography images using image processing methods

Merve Karaman, Salim Çınar

048-054

Research Article/Araştırma Makalesi

Metaheuristic optimization of predictive torque control for induction motor control

Asenkron motor kontrolü için öngörülü moment kontrolünün metasezgisel optimizasyonu

Aycan Gürel, Emrah Zerdali

055-061

Research Article/Araştırma Makalesi

A novel microstrip triple wideband bandstop filter design by using adjacent direct coupled dual-mode resonators

Bitişik direk kuplajlı çift-modlu rezonatörler kullanılarak yeni bir mikroşerit üç geniş bantlı bant tutan filtre tasarımı

Elif Güntürkün Şahin

062-067

Araştırma Makalesi/Research Article

Afyonkarahisar bölgesi şartlarında bulut hareketlerinin gökyüzü sınıfları tabanlı tahmini

Sky class based prediction of cloud movements in Afyonkarahisar region conditions

Ardan Hüseyin Eşlik, Emre Akarslan, Fatih Onur Hocaoğlu

068-076

Araştırma Makalesi/Research Article

Rotasyon kontrollü Wilson-Cowan nöron modeli ve donanım gerçekleştirimi

Rotation-controlled Wilson-Cowan neuron model and its hardware

Nimet Korkmaz

077-083

Araştırma Makalesi/Research Article

Türkiye'nin endüstriyel elektrik tüketimine yönelik depolama gazı enerji potansiyeli

Landfill gas energy potential towards Turkey's industrial electricity consumption

Burhan Baran

084-091

Endüstri Mühendisliği / *Industrial Engineering*

Research Article/Araştırma Makalesi

Balancing disassembly line under hazardous parts with precise and fuzzy goals

Kesin ve bulanık hedeflerle tehlikeli parçaları dikkate alan demontaj hatlarının dengelenmesi

Seda Hezer, Yakup Kara

092-108



Harita Mühendisliği / Geomatic Engineering

Araştırma Makalesi/Research Article

Farklı uydu sistemi kombinasyonlarının gerçek zamanlı hassas nokta konumlamaya etkisi

The effect of different satellite system combinations on real-time precise point positioning

Cevat İnal, Burhaneddin Bilgen, Sercan Bülbül, Musa Başbük

109-115

İnşaat Mühendisliği / Civil Engineering

Review Article/Deleme Makalesi

Investigation of transportation investments in Bursa in terms of urban-environment-community relations

Bursa'daki ulaştırma yatırımlarının kent-çevre-toplum ilişkileri açısından incelenmesi

Ahmet Ünal, Ahmet Tortum

116-121

Araştırma Makalesi/Research Article

Değişken kesitli Timoshenko kolonlarının tamamlayıcı fonksiyonlar yöntemiyle burkulma analizi

Buckling analysis of Timoshenko columns having variable cross-section by complementary functions method

Burkay Sivri, Beytullah Temel

122-128

Araştırma Makalesi/Research Article

Basitleştirilmiş tasarım ilkelerinin betonarme binaların kat ötelemelerine tesiri üzerine bir inceleme

An investigation on the effect of simplified design principles on the storey drift of RC buildings

Hakan Dilmaç

129-135

Araştırma Makalesi/Research Article

Çelik basınç çubuklarında bazı güçlendirme türlerinin basınç dayanımı kapasitelerine katkısının deneysel araştırılması

Experimental investigation of contribution of some strengthening types to compressive strength capacities in steel braces

Oğuz Düğenci

136-147

Araştırma Makalesi/Research Article

Klasik ve alttan alışı dolusavak havalandırıcı performanslarının sayısal modelle incelenmesi

Investigation of classical and bottom-inlet spillway aerator performances by numerical model

Mehmet Cihan Aydın, Muhammed Reşid Özdemir

148-156

Jeoloji Mühendisliği / Geological Engineering

Research Article/Araştırma Makalesi

Geochemistry of Upper Eocene-Oligocene sandstones from Tuzgölü Basin (Central Anatolia)

Tuzgölü Havzasından Üst Eosen-Oligosen kumtaşlarının jeokimyası (Orta Anadolu)

Mehmet Yavuz Hüseyinca, Şuayip Küpeli

157-169



Makine Mühendisliği / Mechanical Engineering

Research Article/Araştırma Makalesi

Economic analyses of onshore commercial large scale wind power plant installed in Turkey

Türkiye’de kurulu olan kara tipi ticari ve büyük ölçekli rüzgar güç santralinin ekonomik analizleri

Akin Ilhan, Mehmet Bilgili, Melih Sari, Besir Sahin

170-176

Araştırma Makalesi/Research Article

İplik işletmeleri iklimlendirme sektöründe kullanılan pleyt üzerindeki akışın sayısal olarak incelenmesi

Numerical investigation of flow on plate used in the air conditioning sector of yarn production facilities

Emrah Gönen, Ahmet Kaya

177-183

Araştırma Makalesi/Research Article

CNC Freze tezgahları için bir program arayüzünün tasarlanması

Designing a program interface for CNC milling machines

Mikail Olam, Nihat Tosun

184-191

Araştırma Makalesi/Research Article

Peltier’in ısı akış sensörü olarak kullanıldığı ısı iletkenlik ölçüm metodu

Thermal conductivity measurement method using Peltier as heat flow sensor

Ahmet Korkmaz, Haydar Bayar, Yüksel Palacı

192-197

Araştırma Makalesi/Research Article

Modifiye edilmiş ve modifiye edilmemiş bor karbür (B₄C) nanopartiküllerinin yapısal yapıştırıcıların mekanik özellikleri üzerine etkisinin karşılaştırılması

Comparison of the effect of modified and unmodified boron carbide (B₄C) nanoparticles on the mechanical properties of structural adhesives

Kürşat Gültekin

198-206

Araştırma Makalesi/Research Article

Ram makinelerindeki hava akışının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile modellenmesi

Modeling of air flow in stenter machines by Computational Fluid Dynamics

Muhammet Tibet Sığircı, Ahmet Erdoğan

207-216

Araştırma Makalesi/Research Article

Bir prototip kağıt kesme makinesi tasarımı

Design of a prototype for paper cutting machine

Hasan Demirtaş

217-221



Research Article/Araştırma Makalesi

Numerical study of heat transfer aspects in cutting tools made of Al_2O_3 , ZrB_2 , TiB_2 , TiN using ANSYS fluent software

ANSYS fluent yazılımı kullanılarak Al_2O_3 , ZrB_2 , TiB_2 , TiN 'den yapılmış kesici takımlarda ısı transferi yönlerinin sayısal çalışması

Kamal F. Mohammed, Süleyman Baştürk

222-231

Research Article/Araştırma Makalesi

Comparison of mechanical and geometrical properties of octet lattice structures using the electron beam melting

Elektron ışın eritme yöntemi kullanılarak sekizli kafes örgü yapıların mekanik ve geometrik özelliklerinin karşılaştırılması

Bilçen Mutlu Mital

232-238



Türkiye'de mutluluk düzeyini etkileyen faktörlerin makine öğrenme ve nitelik seçme algoritmaları ile belirlenmesi

Identifying the factors affecting the level of happiness in Turkey using machine learning and feature selection algorithms

İncilay Yıldız¹ , Fatih Abut^{2,*} 

¹ Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 01330, Adana, Türkiye

² Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 01330, Adana, Türkiye

Özet

Mutluluk düzeyi, mutluluk algısının düzeyini açıklayan ve yaşam memnuniyeti ölçmeye yarayan önemli bir parametredir. Bu çalışmada, Türkiye'deki mutluluk düzeyini etkileyen faktörleri belirlemek üzere Relief-F nitelik seçme algoritması ile birleştirilmiş Destek Vektör Makinesi (SVM), Çok Katmanlı Sinir Ağı (MLP) ve Ağaç Arttırma (TB) tabanlı yeni modeller önerilmiştir. Kullanılan veri seti Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından 2015 yılında il düzeyinde yapılan İllerde Yaşam Endeksi (İYE) araştırması sonucu oluşturulmuştur. Tahmin modellerinin performansı, 10-katlı çapraz doğrulama kullanılarak, Kök Ortalama Kare Hatası (Root Mean Square Error - RMSE) ve R-kare (R^2) değerlerinin hesaplanmasıyla değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre sağlık hizmetlerinden memnuniyet oranı, sağlığından memnuniyet oranı ile orta ve üstü gelir grubundaki hanelerin oranı Türkiye'deki mutluluk düzeyi tahmininde önemli rol oynayan değişkenler olarak belirlenmiştir. Ayrıca SVM yönteminin mutluluk düzeyi tahmininde etkin bir yöntem olduğu ve tüm SVM tabanlı tahmin modellerinin MLP ve TB tabanlı modellere göre daha düşük RMSE ve daha yüksek R^2 değerleri ürettiği gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Makine öğrenmesi, Nitelik seçme, Mutluluk düzeyi, Tahmin

1 Giriş

Mutluluk, bir bireyin kendi yaşamının genel kalitesini bir bütün olarak olumlu bir şekilde değerlendirme derecesidir. Genellikle yaşamda nihai bir hedef olarak kabul edilir ve neredeyse herkes mutlu olmak ister. Mutluluk; gelir, işgücü piyasası durumu, iş özellikleri, sağlık, boş zaman, aile, sosyal ilişkiler, güvenlik, özgürlük, ahlaki değerler ve diğerleri dahil olmak üzere birçok etkene bağlıdır [1]. TÜİK tarafından mutluluk "acı, keder ve ıstırahın yokluğu ve bunların yerine sevinç, neşe ve tatmin duygularının varlığıyla karakterize edilen durum; hayattan genel olarak memnun olma hali" şeklinde ifade edilmiştir [2].

Mutluluk verilerinin en temel kullanımı, bir ülke veya belirli bir sosyal grup içindeki görünen yaşam kalitesini tahmin etmektir. Bu genellikle bir sosyal problemin veya

Abstract

Happiness level is an important parameter that explains the level of perception of happiness and helps to measure life satisfaction. In this study, new models based on Support Vector Machine (SVM), Multilayer Neural Network (MLP) and Tree Boost (TB) individually combined with Relief-F feature selector algorithm were proposed to determine the factors affecting the level of happiness in Turkey. The utilized data set was created by the Turkish Statistical Institute (TÜİK) in 2015 as a result of the Provincial Life Index survey. The performance of the prediction models was evaluated by calculating the Root Mean Square Error (RMSE) and R-squared (R^2) values using 10-fold cross validation. According to the results obtained, satisfaction with health services, health satisfaction rate and the ratio of households in the middle- and higher-income group were identified as variables that play an important role in the prediction of happiness level in Turkey. In addition, it has been observed that SVM is an effective method in predicting happiness level and all SVM-based prediction models consistently produce lower RMSE and higher R^2 values than MLP-based and TB-based models.

Keywords: Machine learning, Feature selection, Happiness level, Prediction

konunun kapsamını değerlendirmek ve olası politika müdahalelerini önermek için yapılır. Yüksek memnuniyet, ilgili popülasyondaki yaşam kalitesinin iyi olduğunu gösterirken düşük memnuniyet, ciddi eksikliklere işaret etmektedir [3].

Birleşmiş Milletler 2019 Yılı Dünya Mutluluk Raporu'na göre; dünyanın en mutlu ülkesi Finlandiya en mutsuz ülkesi Güney Sudandır. Toplam 156 ülkenin yer aldığı araştırmada Türkiye, 2017 yılında 69. sıradayken geçtiğimiz yıl 74'üncü sırada ve bu yıl 79. sırada yer almıştır [4]. YMA'nın 2019 yılı sonuçlarına göre Türkiye'de genel mutluluk düzeyi ve mutluluk kaynağı olan değerlerin yüzdeleri Tablo 1'de verilmiştir [5].

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: fabut@cu.edu.tr (F. Abut)

Geliş / Received: 02.02.2021 Kabul / Accepted: 26.07.2021 Yayımlanma / Published: 14.01.2022
doi: 10.28948/ngumuh.873199

Tablo 1. YMA 2019 sonuçları

YMA 2019	Değer Tanımı	%
Genel Mutluluk Düzeyi	Çok Mutlu	6.61
	Mutlu	45.74
	Orta	34.58
	Mutsuz	9.93
Mutluluk Kaynağı Olan Değerler	Çok Mutsuz	3.13
	Başarı	9.17
	İş	2.13
	Sağlık	69.86
	Sevgi	14.32
Para	4.16	
Diğer	0.35	

Mutluluk düzeyi; toplumun refah içinde yaşaması, motivasyonu ile doğrudan ilişkili olduğu için kişinin verimliliği ve başarısı için de tetikleyici bir unsurdur. Başarılı ve mutlu toplumlar iyi bir yaşam kalitesine sahiptir. Yaşam kalitesi mutluluk düzeyi ile ölçüldüğü için mutluluk düzeyini tahmin etmek önemlidir.

Bu çalışma kapsamında, Türkiye'de mutluluk düzeyini etkileyen faktörleri belirlemek üzere Relief-F nitelik seçici algoritması ile birleştirilmiş Destek Vektör Makinesi (SVM), Çok Katmanlı Sinir Ağı (MLP) ve TB tabanlı çeşitli tahmin modelleri geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, 10-katlı çapraz doğrulama kullanılarak, Kök Ortalama Kare Hatası (Root Mean Square Error - RMSE) ve R-kare (R^2) değerlerinin hesaplanmasıyla değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır.

Bölüm 2'de literatürde bulunan ilgili çalışmalar özetlenmiştir. Bölüm 3'te veri setini oluşturma sürecinden bahsedilmiş ve metodoloji hakkında bilgiler verilmiştir. Bölüm 4'te çalışma ile ilgili sonuçlar ve tartışma sunulmuştur. Bölüm 5, makaleyi özet ve öneriler ile sonlandırmaktadır.

2 İlgili çalışmalar

Literatürde mutluluk düzeyi ve yaşam memnuniyeti ile ilgili birçok çalışma mevcuttur. Sibel Selim'in [6] 2008 yılında yapmış olduğu araştırma, Türkiye'deki yaşam doyumunu ve mutluluğunu incelemeyi amaçlamaktadır. Türkiye için öznel iyi oluş ile ilgili önceki araştırmalar hem mutluluk hem de yaşam doyumunu göz önünde bulundurarak genişletilmiştir. Bu çalışmada, Türk halkı arasında bireysel mutluluğu ve yaşam memnuniyetini şekillendiren faktörler, sosyokültürel ve politik değişimin temsili bir anketi olan Dünya Değerler Araştırması (WVS) kullanılarak belirlenmiştir. Tahmin modellerinde sıralı logit modeli kullanılırken modelleri yorumlamak için ayrık değişim kullanılmıştır. Ayrıca tahmin modelleri oluşturulurken yaş, din, öznel sağlık, cinsiyet, eğitim düzeyi, medeni durum, çocuk sayısı, istihdam durumu ve gelir değişkenleri kullanılmıştır. Sağlık, yanıtlayanların beş puanlık bir ölçekte kendi kendine derecelendirmesiyle ölçülürken, gelir on puanlık bir ölçek olarak ölçülür. Bu değişkenlere ek olarak modellerde ailenin önemi, arkadaşlar, boş zaman, siyaset, hayatta çalışma, milliyetten gurur, insana güven ve siyasi yönelim değişkenleri kullanılmıştır. Yaş değişkeni 15–24, 25–34, 35–44 ve 45+ olmak üzere dört yaş grubuna ayrılırken, eğitim değişkeni alt, orta ve üst eğitim

olmak üzere üç düzeyde kategorize edilmiştir. Ek olarak, medeni durum değişkenine ilişkin kategoriler evli, hiç evlenmemiş ve boşanmış, ayrılmış veya duldur. Ayrıca, tam zamanlı, yarı zamanlı, serbest meslek sahibi, emekli, ev hanımı, öğrenciler, işsizler ve diğerleri istihdam türü değişkenleridir. Son olarak, gelir seviyeleri değişkeni sekiz gruba ayrılmıştır. Tahmin modellerinin ölçümünde tahmin katsayısı ve marjinal etki kullanılmıştır. Elde edilen bazı sonuçlar, olumsuz bir yaş etkisi, gelir ve sağlık durumunun olumlu etkileri ve işsizliğin olumsuz etkisi gibi tipik bulgularla benzerdir. Beklentilerin aksine, orta eğitim kadınlarda yaşam doyumunu olumsuz yönde doğrudan etkiliyor ve yaşam doyumunu modelinde üst eğitim düzeyi önemsiz. Farklı yıllar boyunca mutluluk ve yaşam doyumunu ilişkilerini karşılaştıran bu araştırma, Türk halkının algılanan yaşamlarını iyileştirmek için politika yapıcılara ve profesyonellere içgörü sağlamayı amaçlamaktadır.

Gunvor Marie Dyrdal ve arkadaşlarının [7] 2010 yılında yapmış oldukları çalışmada, genel yaşam memnuniyeti ve ilişki tatmini arasındaki bağlantı, Norveç Halk Sağlığı Enstitüsü tarafından yürütülen Norveç Anne ve Çocuk Kohort Çalışmasından (MoBa) elde edilen veriler kullanılarak anneler arasında boylamsal olarak araştırılmıştır. Mevcut araştırmada, Norveç Anne ve Çocuk Kohort Çalışması 1999 yılında başlayan ve 2008 yılına kadar 100,000 hamile kadının işe alındığı bir hamilelik kohortudur. Norveç'teki hamile kadınların çoğu çalışmaya katılmaya davet edilmiştir ve yaklaşık %45 yanıt oranıyla katılım sağlanmıştır. Veriler hamilelik sırasında iki kez ve doğum sonrası 6. ve 36. aylarda toplanmıştır. Verilerin ortalama ve standart sapması hesaplanmıştır, analiz yöntemi olarak ise yapısal eşitlik modellemeleri kullanılmıştır. Bulgular, çapraz gecikmeli uzunlamasına modeli kullanan yapısal eşitlik modellemesi hem genel yaşam memnuniyeti hem de ilişki tatmini için çapraz kavramlar arası çapraz zaman etkilerini kanıtlamıştır. Elde edilen sonuçlara göre, doğumdan hemen sonra ilişki tatmininin azaldığı ve genel yaşam memnuniyetinin başlangıçta bir artış göstermesine rağmen doğum sonrası bir düşüş gösterdiği tespit edilmiştir. Sonuçlar, genel yaşam memnuniyeti ve ilişki tatmini seviyelerinin, kesitsel ilişkilerinin olduğu gibi, zaman içinde oldukça istikrarlı olduğunu göstermiştir. Tatmin edici bir romantik ilişkiye sahip olmak, gelecekteki yaşam doyumunu korumak ve artırmak için önemlidir.

İraj Mirkhan ve arkadaşlarının [8] 2014 yılında yapmış oldukları çalışmada, Mutluluk düzeyi, öğretmenlerin eğitim kalitesinin artırılmasına ve öğrenciler için uygun bir ortam yaratılmasına yardımcı olmaktadır. Bu çalışmada, Urmiye şehrinin kadın öğretmenlerinin duygusal zekâ, mutluluk ve dini tutumlara dayalı olarak mutluluk düzeyinin tahminini araştırmak amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında, Urmiye liselerinden rastgele seçilen 262 öğretmen katılımcıya Khodayarifard dini tutum anketini, Oxford Mutluluk, Duygusal zekâ Bar-On Envanteri ve Diener Yaşam Ölçeği ile memnuniyet anketi yapılmıştır. Araştırma değişkenleri olarak yaş, öğretim geçmişi, yaşam doyumunu, dini tutumlar, mutluluk ve duygusal zekâ kullanılmıştır. Anketten elde edilen verilerin ortalama ve standart sapma değerleri, Pearson korelasyon ve regresyon testi kullanılarak SPSS yazılımı ile

analiz edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, kadın öğretmenlerde duygusal zekâ ile yaşam doyumu ve mutluluk ile yaşam doyumu arasında pozitif bir ilişki olduğu ancak dini tutum ile yaşam doyumu arasında bir ilişki olmadığı gözlemlenmiştir. Sonuçlar ayrıca mutluluğun yaşam doyumunu tahmin etmekte tek belirleyici olduğunu göstermektedir. Çalışmadan elde edilen bulgular, duygusal zekâ ve mutluluk bileşenlerinin kadın öğretmenlerin yaşam doyumlarında önemli bir rol oynadığını göstermektedir.

Noei Iran ve Mahmoud Alilou'nun [9] 2015 yılında yapmış oldukları çalışmada bağlanma stilleri, farklı önemli psikolojik yapıların tahmin edilmesinde önemli rol oynayan en önemli psikolojik değişkenler arasındadır. Bu çalışmanın amacı, Tebriz-İran'daki evli çiftlerde bağlanma stillerine göre yaşam kalitesi ve mutluluğu tahmin etmektir. 1393 yılında Tebriz şehrinde yaşayan 100 evli çift (50 kadın ve 50 erkek) katılımcıya, Dünya Sağlık Örgütü Yaşam Kalitesi (WHOQOL BREF), Oxford Mutluluk Anketi (OHQ) ve Hazan ve Shaver Yetişkin Bağlanma ölçeğinin kısaltılmış formu ile anket uygulanmıştır. Verilerin geçerliliği ve güvenilirliği Pearson korelasyon katsayısı ve çoklu regresyon kullanılarak SPSS programı ile analiz edilmiştir. Elde edilen regresyon analizi sonuçları bağlanma stilinin yaşam kalitesi ve mutluluğu tahmin edebilir olduğunu ortaya koymuştur. Çalışmanın sonucu; Bağlanma stilleri insanların yaşam kalitesini ve mutluluğunu tahmin etmede önemli bir rol oynamaktadır, bu nedenle yaşam kalitesini ve mutluluğunu artırmaya yönelik programların geliştirilmesinde katılımcıların bağlanma stilleri dikkate alınmalıdır.

Natasha Jaques ve arkadaşlarının [10] 2015 yılında yapmış oldukları çalışmada, öğrencilerin mutluluğunu modellemek için, her biri bir ay boyunca izlenen lisans öğrencilerinden toplanan verilere makine öğrenimi yöntemleri uygulanmıştır. Bunlar Destek Vektör Makineleri, Rasgele Ormanlar, Sinir Ağları, Doğrusal Regresyon, k-En Yakın Komşu arama (kNN), Naive Bayes ve Adaboost yöntemleridir. En iyi sınıflandırıcıyı bulduktan sonra, sınıflandırıcının parametre alanı aranmış ve doğrulama setindeki performansını optimize eden parametreler seçilmiştir. Toplanan veriler arasında fizyolojik sinyaller, konum, akıllı telefon günlükleri ve davranışsal sorulara anket yanıtları bulunmaktadır. Katılımcılar her gün stres, sağlık ve mutluluk gibi önlemler hakkındaki durumlarını bildirmişlerdir. Mutluluk ve depresyon arasındaki ilişki, mutluluğu modellemek, depresyon riski taşıyan bireyleri tespit edilmesine ve katılımcılara yardım edecek müdahaleleri önermeye yardımcı olabildiği için önemlidir. Ayrıca bu çalışma davranışsal faktörlerin (uyku ve sosyal aktivite gibi) mutluluğu nasıl olumlu ve olumsuz etkilediğiyle de ilgilenmektedir. Gauss Karışım Modelleri ve topluluk sınıflandırması dahil olmak üzere çeşitli makine öğrenimi ve özellik seçme teknikleri karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, test verilerinde bildirilen mutluluğun %70 sınıflandırma doğruluğuna ulaşılmıştır.

Asena Caner'in [11] 2016 yılında yapmış olduğu çalışmada, Türkiye'de son yıllardaki mutluluk ve yaşam doyumunun belirleyicilerini incelemeyi amaçlanmıştır. 2007 ve 2011 yıllarında ulusal düzeyde temsili hane halkı üzerinde

yapılan Türkiye Yaşam Memnuniyeti Anketi ve Türkiye için Dünya Değerler Anketi'nden elde edilen mikro verilere dayalı regresyon analizlerini kullanılmıştır. Bu çalışmada, iki anket tarafından toplanan veriler ve sonuç değişkeninin korelasyonları kullanılmıştır. Sonuçlardan bazıları hem literatürdeki öncekilerle hem de bu çalışmada kullanılan veri kümeleriyle tutarlı olsa dahi, bazı sonuçlar zaman periyoduna, kontrol değişkenleri kümesine ve kullanılan örneğe bağlıdır; bu nedenle bulguların verimliliği şüphe uyandırmaktadır. Bu çalışmada, doğru bir karşılaştırma yapmak için bireyin mutluluk düzeyini belirlerken, bireyin demografik ve ekonomik özelliklerinin bir fonksiyonu olarak geliştirilen mutluluk denklemleri kullanılarak tahmin işlemi yapılmıştır. Tahminler marjinal etki ve standart hata metrikleri kullanılarak ölçülmüştür. Tahminler sırasında benzer bulunan değişkenler işsizlik durumu, medeni durum, gelir ve cinsiyettir. Yaş, mutlak gelir ve eğitim tahminlerinde farklılıklar görülmektedir. Çalışmanın sonucunda, mutluluğu hangi faktörlerin belirlediği sorusuna dair daha detaylı verilerle çalışılması gerektiği vurgulanmıştır. Ayrıca, veri kalitesini iyileştirmenin yolları için öneriler yapılmıştır.

Malathie Dissanayake ve arkadaşlarının [12] 2017 yılında yapmış oldukları çalışmanın amacı, bireylerin yaşam algılarının öznel mutluluk ve yaşam doyumu üzerindeki etkisini incelemektir. Katılımcılar 18-28 yaşları arasında (yaş ortalaması 23 yaşın standart sapması 1.60) %62'si erkek, %38'i kadından oluşan 200 Hintli bireyden oluşmaktadır. Katılımcılara uygulanan anket; yaş, cinsiyet, medeni durum, din, etnik köken, eğitim, istihdam, yaşam alanı ile ilgili maddeleri içeren sosyodemografik soruları içermektedir. Güvenirlik testi çalışmasında kullanılan değişkenler, yaşamdaki amaç, olumlu duygulanım, öznel mutluluk ve yaşam doyumudur. Regresyon analizi ve güvenirlik testi ile elde edilen sonuçlar, hayattaki amacın kişinin mutluluğunu ve yaşam doyumunu önemli ölçüde tahmin ettiğini ortaya koymuştur. Ayrıca olumlu duygulanım, yaşamdaki amaç ile öznel mutluluk arasındaki ilişkiye aracılık etmektedir. Yaşam amacı ile yaşam doyumunu arasındaki bağlantının olumlu duygulanım aracılığıyla gerçekleştiği ortaya koymuştur. Bu durum, hayatlarını daha anlamlı ve maksatlı algılayan bireylerin daha olumlu bir etki, dolayısıyla mutlu ve tatmin hissettiklerini göstermektedir.

Bu çalışmada, literatürden farklı olarak daha güncel yaşam memnuniyeti verileri kullanılmıştır. Ayrıca Türkiye'nin il bazında yapılan YMA çalışmasının verilerini kullanarak mutluluk düzeyini yoğun istatistiksel hesaplamalara gerek kalmadan, makine öğrenme ve nitelik seçme algoritmaları kullanarak etkin bir şekilde tahmin edebilen modeller önerilmiştir.

3 Materyal ve metod

Bu çalışmada kullanılan veri seti, TÜİK tarafından yapılan 2015 yılı İYE çalışmasının verileridir. Bu veriler, endeks objektif ve subjektif göstergelerinden oluşmaktadır. Subjektif göstergelerinin temel veri kaynağı il düzeyinde uygulanması planlanan Yaşam Memnuniyeti Araştırmasının (YMA) sonuçlarıdır. Objektif göstergeler ise il düzeyinde TÜİK verileri ve diğer kurum ya da kuruluşlardan derlenen verilerden oluşmaktadır [13]. YMA, 2015 yılı 4500 cevaplı

örnek hanede 9397 cevaplı bireyle gerçekleştirilen araştırmasından elde edilmiştir. YMA'nın amacı TÜİK tarafından "Türkiye'deki bireylerin öznel mutluluk algısı, sağlık, sosyal güvenlik, örgün eğitim, çalışma hayatı, gelir, kişisel güvenlik ve adalet hizmetleri, kişisel gelişim gibi temel yaşam alanlarındaki memnuniyetleri ölçmek ve bunların zaman içindeki değişimi takip etmek" şeklinde açıklanmıştır [14]. YMA'nın kapsamı, Türkiye Cumhuriyeti sınırları içinde bulunan hanelerde yaşayan 18 ve daha yukarı yaşta T.C. vatandaşları ile yabancı uyruklu kişilerdir. Araştırmada, kurumsal nüfus (üniversite öğrenci yurdu, huzurevi, bakımevi, ceza ve tutukevi, ıslahevi, yetiştirme yurdu, askeri birlik ve kışla vb.) kapsam dışı tutulmuştur. YMA ilk kez 2003 yılı Kasım ayında hane halkı Bütçe Anketi'ne ek bir modül olarak gerçekleştirilmiştir. Araştırma 2003 yılından itibaren her yıl düzenli olarak yapılmaktadır [15].

Mutluluk düzeyini tahmin etmek üzere dört farklı veri grubuna ait çeşitli değişkenler kullanılmıştır. Birinci veri grubu çalışma hayatına ilişkin olarak istihdam oranı (ISHO), işsizlik oranı (ISSO), ortalama günlük kazanç (OGK) ve işinden memnuniyet oranı (IMO) değişkenlerini içermektedir. İkinci veri grubu gelir ve servet düzeyi ile ilgili olarak kişi başına düşen tasarruf mevduatı (KTM), orta ve üstü gelir grubundaki hanelerin oranı (OUG) ve temel ihtiyaçlarını karşılayamadığını beyan eden hanelerin oranı (TIK) değişkenlerini içermektedir. Üçüncü veri grubu sağlık konuları ile alakalı olarak bebek ölüm hızı (BOH), doğuştan beklenen yaşam süresi (DBY), hekim başına düşen müracaat sayısı (HDM), sağlığından memnuniyet oranı (SMO) ve kamunun sağlık hizmetlerinden memnuniyet oranı (KSH) değişkenlerinden oluşmaktadır. Dördüncü veri grubu ise eğitim konularına ilişkin okul öncesi eğitimde (3-5 yaş) net okullaşma oranı (OOE), TEOG sistemi yerleştirmeye esas puan ortalaması (TEOG), YGS puan ortalaması (YGS), fakülte veya yüksekokul mezunlarının oranı (FYM), kamunun eğitim hizmetlerinden memnuniyet oranı (KEM) değişkenlerini kapsamaktadır. Ayrıca ID değişkeni Türkiye'nin 81 ilini içermekte olup tüm veri gruplarında ortaktır. Veri setinin betimsel istatistiği Tablo 2'de gösterilmiştir.

Relief-F algoritmasının bir sıralayıcı arama yöntemi ile çalıştırılmasıyla veri seti içerisindeki her bir tahmin değişkeninin önem puanı hesaplanmış ve değişkenler puanlarına uygun olarak en önemliden en önemsiz doğru sıralanmıştır. Relief-F tarafından hesaplanan tahmin değişkenlerinin puanları ve önem sıraları Tablo 3'te gösterilmiştir. Değişkenler arasındaki korelasyon ilişkilerini incelemek üzere her aşamada en düşük puana sahip değişken iteratif olarak tüm değişkenler kümesinden çıkarılarak toplamda 18 farklı mutluluk düzeyi tahmin modeli oluşturulmuştur. Daha detaylı olarak, ilk model çalışmada kullanılan tüm girdi değişkenlerin tam setini içermektedir. İkinci model, en düşük Relief-F sıralamasına sahip olan HDM dışında birinci modelin içerdiği aynı değişken kümesi kullanılarak oluşturulmuştur. Benzer şekilde, üçüncü model ikinci en düşük Relief-F sıralamasına sahip olan ID dışında ikinci modelin içerdiği aynı değişken grubunu içermektedir. Bu metodoloji, en yüksek puana sahip tek bir değişken

(KSH) son modeli oluşturana kadar tekrarlanmıştır. Tahmin modelleri ve her modelin içerdiği tahmin değişkenleri Tablo 4'te gösterilmiştir.

Tahmin modellerini geliştirmek için SVM, MLP ve TB olmak üzere 3 farklı makine öğrenme yöntemi kullanılmıştır.

Tablo 2. Veri setinin betimsel istatistiği

Değişkenler	Min.	Mak.	Ortalama	Standart Sapma
ID	1.00	81.00	41.00	23.52
ISHO	27.80	59.10	46.21	6.20
ISSO	4.20	23.40	8.80	3.87
OGK	46.90	85.60	57.68	6.57
IMO	64.00	91.60	78.78	6.47
KTM	616.00	18.131.00	4.342.11	2.821.42
OUG	16.30	58.90	34.38	8.63
TIK	32.80	75.00	50.95	10.18
BOH	5.30	25.70	10.99	3.39
DBY	75.00	80.50	78.13	1.03
HDM	2.763.00	8.067.00	5.834.38	1.245.11
SMO	59.20	80.80	72.00	4.44
KSH	54.60	89.10	77.47	7.30
OOE	23.50	53.20	35.27	6.25
TEOG	215.30	338.00	295.93	27.67
YGS	178.60	207.90	197.64	5.51
FYM	8.60	22.70	13.12	2.34
KEM	48.20	88.90	74.09	8.45
MD	41.98	77.66	61.15	7.53

Tablo 3. Relief-F ile sıralanmış nitelikler

Nitelik	Relief-F Skoru	Önem Sırası
KSH	1.6 ± 0.66	1
SMO	1.7 ± 0.64	2
KEM	3.3 ± 1.27	3
ISSO	5.7 ± 2.19	4
TIK	5.8 ± 1.08	5
IMO	5.9 ± 2.07	6
ISHO	6.2 ± 1.78	7
OUG	7.5 ± 1.28	8
YGS	8.4 ± 2.33	9
TEOG	9.4 ± 1.28	10
OOE	11.7 ± 1.85	11
FYM	12.0 ± 1.10	12
DBY	13.5 ± 1.43	13
OGK	14.1 ± 1.45	14
KTM	14.5 ± 1.69	15
BOH	15.2 ± 0.98	16
ID	16.5 ± 1.20	17
HDM	18.0 ± 0	18

Tablo 4. Tahmin modellerinin içerdikleri değişkenler

Model No	İçerdiği Değişkenler
Model 1	KSH, SMO, KEM, ISSO, TIK, IMO, ISHO, OUG, YGS, TEOG, OOE, FYM, DBY, OGK, KTM, BOH, ID, HDM
Model 2	KSH, SMO, KEM, ISSO, TIK, IMO, ISHO, OUG, YGS, TEOG, OOE, FYM, DBY, OGK, KTM, BOH, ID
Model 3	KSH, SMO, KEM, ISSO, TIK, IMO, ISHO, OUG, YGS, TEOG, OOE, FYM, DBY, OGK, KTM, BOH
Model 4	KSH, SMO, KEM, ISSO, TIK, IMO, ISHO, OUG, YGS, TEOG, OOE, FYM, DBY, OGK, KTM
Model 5	KSH, SMO, KEM, ISSO, TIK, IMO, ISHO, OUG, YGS, TEOG, OOE, FYM, DBY, OGK
Model 6	KSH, SMO, KEM, ISSO, TIK, IMO, ISHO, OUG, YGS, TEOG, OOE, FYM, DBY
Model 7	KSH, SMO, KEM, ISSO, TIK, IMO, ISHO, OUG, YGS, TEOG, OOE, FYM
Model 8	KSH, SMO, KEM, ISSO, TIK, IMO, ISHO, OUG, YGS, TEOG, OOE
Model 9	KSH, SMO, KEM, ISSO, TIK, IMO, ISHO, OUG, YGS, TEOG
Model 10	KSH, SMO, KEM, ISSO, TIK, IMO, ISHO, OUG, YGS
Model 11	KSH, SMO, KEM, ISSO, TIK, IMO, ISHO, OUG,
Model 12	KSH, SMO, KEM, ISSO, TIK, IMO, ISHO
Model 13	KSH, SMO, KEM, ISSO, TIK, IMO
Model 14	KSH, SMO, KEM, ISSO, TIK
Model 15	KSH, SMO, KEM, ISSO
Model 16	KSH, SMO, KEM
Model 17	KSH, SMO
Model 18	KSH

SVM görüntü tanıma, konuşma tanıma, metin sınıflandırması, yüz algılama ve hatalı kart algılama gibi birçok problem çeşidine uygulanabilmektedir [16]. Bir SVM modelinin performansı, C değeri, çekirdek fonksiyonunun tipi ve ilgili parametreleri ve ϵ değeri gibi çeşitli parametrelere bağlıdır. Çekirdek fonksiyonu olarak radyal tabanlı fonksiyon (Radial Basis Function – RBF) seçilmiştir. RBF çekirdeği, γ fonksiyon parametresinin optimizasyonunu gerektirmektedir.

Bir SVM modeli oluşturmadan önce, belirli bir problem için hangi C, ϵ ve çekirdek parametre değerlerinin en uygun olduğu önceden bilinemez. Bu anlamda, test verilerinin minimum hata ile tahmin edilebilmesi için C, ϵ , ve çekirdek parametrelerinin optimal değerlerini bulmak amacıyla bir tür parametre arama ve optimizasyon işlemi yapılmalıdır. Izgara arama yöntemi, orta büyüklükteki problemler için C, ϵ ve çekirdek parametrelerinin optimal değerlerini bulmak için kullanılan etkili bir yöntemdir. Yöntemin çalışma prensibi, parametrelerin değerlerini bir dizi değer aracılığıyla önceden belirlenebilen adım boyutlarıyla değiştirmektir.

Geliştirilen tahmin modellerinin geliştirilebilmesini sağlamak için veri setini eğitim ve test setlerine bölmek üzere 10 kat çapraz doğrulama kullanılmıştır. SVM tabanlı bir modelin akış şeması Şekil 1'de 10 katlı çapraz doğrulamanın tek katı için verilmiştir. Başlangıçta, eğitim ve test alt kümelerindeki girdi değişkenler, daha büyük sayısal aralıklardaki girdi değişkenlerin daha küçük sayısal aralıklardakilere baskın çıkmasını önlemek için sıfır ortalama ve birim varyansa sahip olacak şekilde standardizasyon kullanılarak ön işleme tabi tutulmuştur. Daha sonra C, ϵ ve γ parametrelerinin optimal değerlerini bulmak için eğitim seti üzerinde 10 katlı çapraz doğrulama

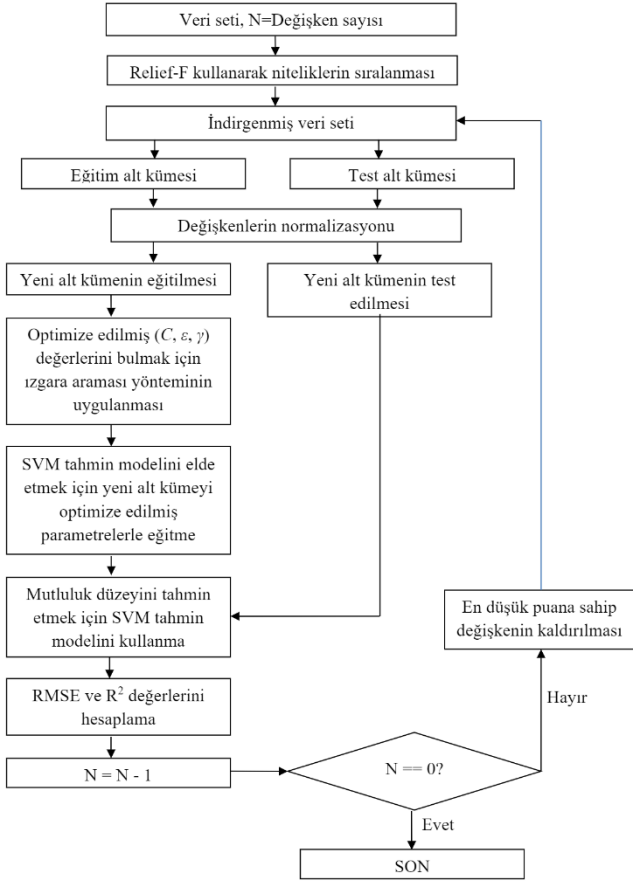
yapılmıştır. 10 katlı çapraz doğrulamada, eğitim seti rastgele on eşit büyüklükte alt kümeye bölünür. On alt kümeden, modeli test etmek için doğrulama verileri olarak tek bir alt küme tutulur ve kalan dokuz alt küme eğitim verileri olarak kullanılır. Çapraz doğrulama işlemi, doğrulama verileri olarak on alt kümenin her biri ile on kez tekrarlanmıştır. Daha sonra, tek bir tahmin üretmek için elde edilen on sonucun ortalaması alınmıştır. Eğitim setini eğitmek ve tahmin modelini oluşturmak için en düşük RMSE değerine yol açan üçlü parametre değerleri seçilmiştir.

Çok Katmanlı Algılayıcı İleri Beslemeli bir Yapay Sinir Ağı (YSA) yapısıdır. İleri beslemeli ağlarda veriler giriş katmandan çıkış katmana doğru iletilmektedir. Her bir katman yalnızca kendinden sonraki katman ile bağlanmaktadır. YSA sistemine gelen bilgiler öncelikle giriş katmanına sonrasında sırasıyla ara katmanlardan ve çıkış katmanından işlenerek geçer ve çıktı değerleri elde edilir [17].

Son olarak, ağaç yapılı regresyon yöntemleri kategorisinin popüler bir temsilcisi olan TB, performansını diğer iki kategoriyle karşılaştırmak için kullanılmıştır.

Tablo 5'te SVM, MLP ve TB tabanlı tahmin modellerinin sonuçlarını iyileştirmek için kullanılan parametre değerlerinin aralıkları verilmiştir.

Tahmin modellerinin performansı, Kök Ortalama Kare Hatası (Root Mean Square Error - RMSE) ve R^2 değerleri hesaplanarak değerlendirilmiştir. RMSE, kareler toplamının bölünmüş tahmin sayısının karekökü olarak tanımlanır ve bir model tarafından öngörülen değerler ile gerçekte gözlenen değerler arasındaki farkları ölçer. Düşük RMSE değeri, modelin daha doğru tahmin ürettiğini ifade eder. R^2 değeri ise bağımsız değişkenlerden tahmin edilebilen



Şekil 1. Tek bir kat için mutluluk düzeyini tahmin etmek için SVM tabanlı modelin akış şeması

bağımlı değişkendeki varyansın oranıdır. Sıfıra yakın bir R^2 değeri, gözlem verileriyle regresyon modeli arasında bir ilişki olmadığını gösterirken, bire yakın bir değer, mükemmel bir uyum gösterir. RMSE ve R^2 formülleri (1) ve (2)'de gösterilmiştir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y - Y')^2} \quad (1)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Y - Y')^2}{\sum (Y - \bar{Y})^2} \quad (2)$$

Denklem (1) ve (2)'de, Y gerçek mutluluk düzeyi değerini, Y' tahmin edilen mutluluk düzeyi değerini, \bar{Y} gerçek mutluluk düzeyi değerlerinin ortalamasını, n ise test edilen alt küme örneklerinin sayısını göstermektedir.

Tüm deneyler, çeşitli veri madenciliği tekniklerini barındıran ve ticari bir modelleme yazılımı olan DTREG¹ kullanılarak gerçekleştirilmiştir. DTREG, sınıflandırma ve regresyon modellerinin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır ve gelecekteki gözlemler için değerleri tahmin edebilmektedir.

Tablo 5. Makine öğrenme yöntemlerinin parametre değerleri

Yöntem	Parametre	Değer
SVM	Cost (C)	[0.1-5000]
	Epsilon (ε)	[0.0001-0.6]
	Gamma (γ)	[0.001-50]
MLP	Gizli katmandaki nöron sayısı & adım sayısı	[2-80 & 1-5]
	Gizli katman aktivasyon fonksiyonu	Lojistik
	Çıktı katmanı aktivasyon fonksiyonu	Doğrusal
	Seride kullanılan maksimum ağaç sayısı	[50-600]
TB	Bireysel ağaçların derinliği	5
	Bölünme için minimum boyut düğümleri	10

4 Sonuçlar

Geliştirilen tüm tahmin modelleri üzerinden elde edilen RMSE ve R^2 değerleri Tablo 6'da gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre aşağıdaki tartışmalar yapılabilir:

- Relief-F algoritmasıyla en önemli değişken KSH, en etkisiz değişken ise HDM olarak sıralanmıştır.
- KSH, SMO, KEM, ISSO, TIK, IMO, ISHO, OUG, YGS ve TEOG değişkenlerini içeren Model 9 kullanılan yöntemden bağımsız olarak en düşük RMSE ve en yüksek R^2 değerlerini üretmiştir. Eğitim aşamasında Model 9'a ait gerçek ve tahmin edilen mutluluk düzeyi değerleri için dağılım grafikleri Şekil 2'de sunulmuştur.
- En iyi performansı sergileyen Model 9 incelendiğinde 4 veri grubundan da en az 2'ser değişken içermekte olduğunu gözlemlenmektedir. Dolayısıyla farklı veri gruplarından bazı değişkenleri birleştirmenin sonuçları önemli derece iyileştirdiği görülmüştür.
- Kullanılan yöntemden bağımsız olarak Model 11'den OUG ve Model 17'den SMO değişkenleri çıkarıldığında RMSE değerlerinin arttığı ve R^2 değerlerinin düştüğü görülmektedir. Bu nedenle bu değişkenlerin mutluluk düzeyi tahmininde önemli rol oynadığı gözlemlenmiştir.
- Kullanılan yöntemden bağımsız olarak Model 2'den ID, Model 7'den KTM ve Model 8'den OOE değişkenleri çıkarıldığında RMSE değerlerinin büyük oranda düştüğü ve R^2 değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle mutluluk düzeyi tahmininde bu değişkenlerin olumsuz etkisi olduğu görülmektedir.
- Mutluluk düzeyi tahmininde kullanılan 3 yöntem karşılaştırıldığında tüm modeller için SVM yönteminin en düşük RMSE değerlerini ve en yüksek R^2 değerlerini verdiği, MLP tabanlı modellerin ise genelde TB tabanlı

¹ DTREG Predictive Modelling Software, <http://www.dtreg.com>

modellere göre daha düşük RMSE değerleri ve daha yüksek R^2 değerleri ürettiği gözlemlenmiştir. SVM tabanlı modellerin MLP ve TB tabanlı modellere göre RMSE değerlerini iyileştirme oranları Şekil 3'te görselleştirilmiştir.

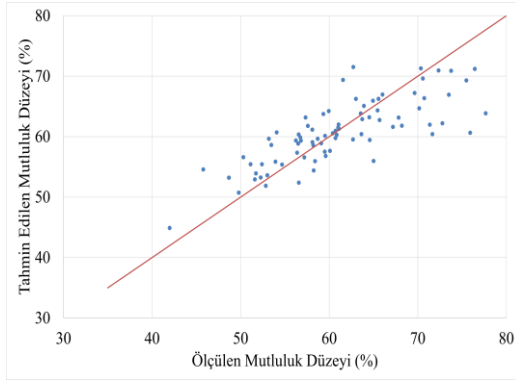
- En iyi yöntem olan SVM tabanlı modellerin ortalama RMSE değeri, MLP tabanlı modellerin ortalama RMSE

değerine göre %7.69, TB tabanlı modellerin ortalama RMSE değerine göre ise %8.88 daha düşüktür.

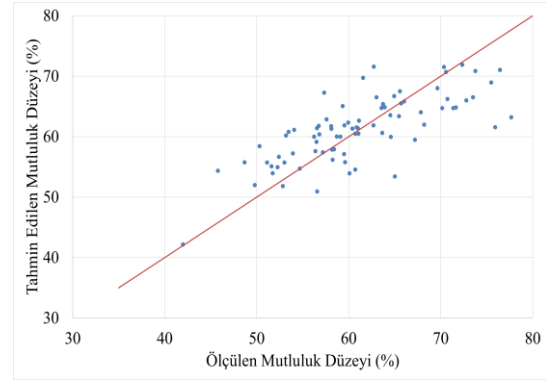
- Kullanılan yöntemler arasında en hızlı sonuçlar SVM tarafından elde edilmiştir. Eğitim süresi derlenen modele bağlı olarak SVM yöntemi için 1 ve 2 s arasında, MLP yöntemi için 3-5 s arasında ve TB yöntemi için 2-6 s arasında değişmektedir.

Tablo 6. SVM, MLP ve TB tabanlı tahmin modellerinin RMSE ve R^2 değerleri

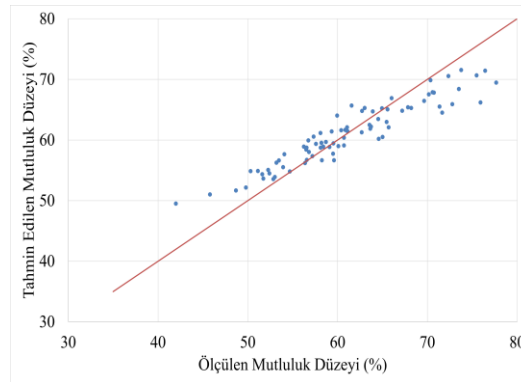
Model No	SVM		MLP		TB	
	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2
Model 1	5.55	0.44 (44.94%)	6.26	0.29 (29.98%)	6.17	0.32 (32.16%)
Model 2	6.09	0.33 (33.88%)	6.14	0.32 (32.67%)	6.16	0.32 (32.19%)
Model 3	5.79	0.40 (40.09%)	5.99	0.36 (36.07%)	6.02	0.35 (35.42%)
Model 4	5.46	0.46 (46.73%)	6.16	0.32 (32.32%)	6.24	0.30 (30.47%)
Model 5	5.43	0.47 (47.48%)	5.90	0.37 (37.79%)	5.92	0.37 (37.41%)
Model 6	5.45	0.47 (47.08%)	5.71	0.41 (41.81%)	5.91	0.37 (37.58%)
Model 7	5.54	0.45 (45.23%)	5.71	0.41 (41.83%)	5.88	0.38 (38.41%)
Model 8	5.46	0.46 (46.72%)	6.03	0.35 (35.13%)	6.17	0.31 (31.97%)
Model 9	5.32	0.49 (49.53%)	5.70	0.41 (41.97%)	5.84	0.39 (39.20%)
Model 10	5.37	0.48 (48.57%)	5.79	0.40 (40.11%)	5.91	0.37 (37.63%)
Model 11	5.40	0.47 (47.97%)	6.10	0.25 (25.16%)	6.12	0.33 (33.26%)
Model 12	5.50	0.45 (45.98%)	6.48	0.29 (29.62%)	6.54	0.23 (23.63%)
Model 13	5.60	0.43 (43.98%)	6.28	0.33 (33.01%)	6.29	0.29 (29.50%)
Model 14	5.64	0.43 (43.15%)	6.13	0.35 (35.64%)	6.14	0.32 (32.75%)
Model 15	5.85	0.38 (38.89%)	6.01	0.29 (29.50%)	6.13	0.32 (32.90%)
Model 16	5.64	0.43 (43.27%)	6.32	0.28 (28.83%)	6.33	0.28 (28.59%)
Model 17	5.78	0.40 (40.38%)	5.93	0.37 (37.28%)	6.12	0.33 (33.14%)
Model 18	5.96	0.36 (36.58%)	6.17	0.32 (32.15%)	6.48	0.25 (25.14%)



(a) SVM

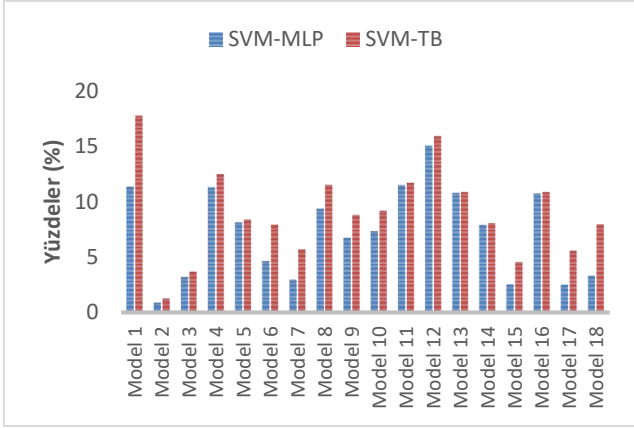


(b) MLP



(c) TB

Şekil 2. Eğitim aşamasında Model 9 için gerçek ve tahmin edilen mutluluk düzeyi değerleri için dağılım grafikleri



Şekil 3. SVM tabanlı modellerin MLP ve TB tabanlı modellere göre RMSE değerlerini iyileştirme oranları

5 Özet ve öneriler

Bu çalışma kapsamında Türkiye’deki mutluluk düzeyini etkileyen faktörleri belirlemek üzere Relief-F nitelik seçme algoritması ile birleştirilmiş Destek Vektör Makinesi (SVM), Çok Katmanlı Sinir Ağı (MLP) ve Ağaç Arttırma (TB) tabanlı yeni modeller önerilmiştir. Modellerin performansı RMSE ve R^2 değerlerinin hesaplanmasıyla değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre sağlık hizmetlerinden memnuniyet oranı, sağlığından memnuniyet oranı ile orta ve üstü gelir grubundaki hanelerin oranı değişkenlerinin mutluluk düzeyi tahmininde önemli rol oynadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, SVM yönteminin mutluluk düzeyi tahmininde etkin bir yöntem olduğu ve tüm tahmin modelleri için MLP ve TB yöntemlerine göre daha düşük RMSE ve daha yüksek R^2 değerleri ürettiği gözlemlenmiştir.

Mutluluk düzeyi tahmini ile ilgili gelecek çalışmalarda derin öğrenme gibi farklı makine öğrenme yöntemleri kullanılabilir ve nitelik seçici algoritmalar çeşitlendirilebilir. Daha fazla TÜİK veri grubu kullanılarak tahmin doğruluğu daha da artırılmış yeni modeller geliştirilebilir. Bu çalışmada önerilen en doğru tahmin modellerini içeren bir uygulama geliştirilerek kullanıcılara yeni verilerle ilgili gerçek zamanlı mutluluk düzeyi tahmini üretme imkânı sağlanabilir.

Teşekkür

Bu çalışmada, TÜİK’in “İllerde Yaşam Endeksi” ve “Yaşam Memnuniyeti Araştırması” kapsamında elde edilen veriler kullanılmıştır. Yazarlar veri setinin kullanım izni için TÜİK’e teşekkür eder.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %17

Kaynaklar

- [1] N. Ahn, J. R. Garcia and J. F. Jimeno, The impact of unemployment on individual well-being in the EU. European Network of Economic Policy Research Institutes, Working paper, No: 29, 2004
- [2] Türkiye İstatistik Kurumu TÜİK 2016. Yaşam Memnuniyeti Araştırması Tarihçe, http://tuikweb.tuik.gov.tr/MicroVeri/YMA_2016/metaveri/tarihce/index.html, Erişim Tarihi 22.05.2020
- [3] R. Veenhoven, R. The study of life satisfaction. In W. E. Saris, R. Veenhoven, A. C. Scherpenzeel, & B. Bunting (Eds.), A comparative study of satisfaction with life in Europe, 11–48, 1996
- [4] Birleşmiş Milletler 2019 Yılı Dünya Mutluluk Raporu, https://en.wikipedia.org/wiki/World_Happiness_Report, Erişim Tarihi 05.09.2020
- [5] Türkiye İstatistik Kurumu TÜİK 2016. Yaşam Memnuniyeti Araştırması Veri Tabanı, http://tuikweb.tuik.gov.tr/MicroVeri/YMA_2016/yayinlar/index.html, Erişim Tarihi 05.09.2020
- [6] S. Selim, Life satisfaction and happiness in Turkey, Social Indicators Research, 88, 531-562, 2008. <https://doi.org/10.1007/s11205-007-9218-z>
- [7] G. M. Dyrddal, E. Roysamb, R. B. Nes, and J. Vitterso, Can a happy relationship predict a happy life? A population-based study of maternal well-being during the life transition of pregnancy, infancy, and toddlerhood, Journal of Happiness Studies, 12, 947-962, 2010. <https://doi.org/10.1007/s10902-010-9238-2>
- [8] I. Mirkhan, I. Shakerinia, M. Kafi, and N. Khalilzade, Prediction of life satisfaction based on emotional intelligence, happiness and religious attitude among female teachers of Urmia city, northwest of Iran. International Journal of School Health, 3, 1-5, 2014. <https://dx.doi.org/10.17795/intjsh-25144>
- [9] L. Noei Iran and M. Mahmoud Alilou, Predicting quality of life and happiness based on attachment style. Iranian Journal of Rehabilitation Research in Nursing, 4, 59-68, 2015
- [10] N. Jaques, S. Taylor, A. Azaria, A. Ghandeharioun, A. Sano, and R. Picard, Predicting students’ happiness from physiology, phone, mobility, and behavioral data. International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction, 21-24 Eylül, Xi’an China, 325-332, 2015
- [11] A. Caner, Happiness and life satisfaction in Turkey in recent years, Social Indicators Research, 127, 361-399, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11205-015-0948-z>
- [12] M. Garaigordobil, Predictor variables of happiness and its connection with risk and protective factors for health. Frontiers in Psychology, 6, 1-10, 2015. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01176>
- [13] İllerde Yaşam Endeksi, <http://www.resmiistatistik.gov.tr/detail/subject/illerde-yasam-endeksi/>, Erişim Tarihi: 05.09.2020
- [14] Türkiye İstatistik Kurumu - TÜİK, Yaşam Memnuniyeti Araştırması amaç, <https://tuikweb.tuik.gov.tr>

gov.tr/MicroVeri/YMA_2016/metaveri/amac/index.html
Erişim Tarihi 05.09.2020

- [15] Türkiye İstatistik Kurumu - TÜİK Yaşam Memnuniyeti Araştırması, https://tuikweb.tuik.gov.tr/MicroVeri-YMA_2016/metaveri/kapsam/index.html, Erişim Tarihi: 05.09.2020
- [16] H. Yurtoğlu, Yapay sinir ağları metodolojisi ile öngörü modellenmesi: Bazı makroekonomik değişkenler için

Türkiye örneği, DPT - Uzmanlık Tezleri Yayın No: 2683, 2005

- [17] A. Pradhan, Support vector machine - A survey. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 8, 82-85, 2012. <http://dx.doi.org/10.14257/ijta.2015.8.1.18>





Retina kan damarlarını çıkarmak için eşikleme temelli morfolojik bir yöntem

A threshold-based morphological method for extraction blood vessels from retina

Buket Toptaş^{1,*} , Davut Hanbay² 

^{1*} Bandırma Onyedü Eylül Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Bandırma, Balıkesir, Türkiye

² İnönü Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 44280, Malatya, Türkiye

Özet

Son yıllarda, diyabete bağlı retina hastalığı körlüğün önde gelen nedenlerinden biri haline gelmiştir. Bu hastalığın önüne geçebilmek için retina ağ yapısının doğru bölütlenmesi gerekir. Retina ağ yapısının doğru ve hızlı bölütlenmesi için bilgisayar destekli tanı sistemlerine ihtiyaç duyulur. Bu makalede, renkli retina fundus görüntüsü üzerinde retina damarlarını otomatik olarak bölütleyen bir yöntem önerilmiştir. Retina damar ağ yapısını bölütlemek için morfolojik işlemlere dayalı bir yöntem retina görüntüleri üzerine uygulanmıştır. Morfolojik işlemlerin uygulandığı fundus görüntüsüne üç farklı eşikleme yöntemi uygulanmıştır. Bu eşikleme yöntemleri; Çoklu Eşikleme, Maksimum Entropi Tabanlı Eşikleme ve Bulanık Kümeleme Tabanlı Eşikleme yöntemleridir. Eşikleme sonucunda bölütlenmiş damar görüntüleri elde edilmiştir. Bu makalede amaç farklı eşikleme algoritmalarının aynı görüntüler üzerindeki performans karşılaştırmasını sağlamaktır. Uygulanan yöntem, herkese açık olarak sunulan retina görüntü veri seti üzerinde doğrulanmıştır. Deneysel sonuçlar, önerilen yöntemin doğru bir şekilde tespit edebildiğini göstermektedir. Eşikleme algoritmalarının 40 görüntüden oluşan veri seti üzerindeki doğruluk oranı Bulanık Mantık Tabanlı Eşikleme için 0.952, Maksimum Entropi Tabanlı Eşikleme için 0.950 ve Çoklu Eşikleme için 0.925 olarak hesaplanmıştır.

Anahtar kelimeler: Retina, Fundus, Eşikleme yöntemleri, Morfolojik işlemler

1 Giriş

Diyabete bağlı retina bozuklukları kişilerde körlüğe sebep olan ve Diyabetik Retinopati (DR) olarak adlandırılan en önemli hastalıklardan biridir. Bu hastalığın erken teşhis edilmesi, kişilerde görme yetisinin kaybolmaması açısından önemlidir. DR hastalığının erken ve doğru teşhis edilmesi için retina damarlarının doğru bir şekilde bölütlenmesi gerekir. Retina görüntülerinin tespit edilmesi için bilgisayar destekli sistemler geliştirilmiştir. Bu sistemler yenilikçi yöntemler kullanarak sürekli geliştirilmektedir.

Literatürde retina damar bölütleme işlemi için geleneksel yöntemler ve son zamanlarda popüler hale gelen derin öğrenme yöntemleri önerilmiştir. Derin öğrenme yöntemleri ile retina damar bölütleme sistemlerinin geliştirilmesi daha sağlam sonuçlar verir ancak donanım bağımlılığı gerektirir. Ancak geleneksel yöntemler olarak adlandırılan

Abstract

In recent years, the diabetes-related retinal disease has become one of the leading causes of blindness. In order to prevent this disease, the retinal network structure needs to be segmented correctly. Computer-aided diagnostic systems are required for accurate and fast segmentation of the retinal network structure. In this paper, a method is proposed to segments retinal vessels automatically in the color retinal fundus image. A method based on morphological procedures to segmentation of vessels has been applied on retinal images. Three different thresholding methods were applied to the fundus image obtained as a result of morphological processes. These thresholding methods are; Multiple Thresholding, Maximum Entropy Based Thresholding and Fuzzy Cluster Based Thresholding methods. As a result of thresholding, segmented vessel images were obtained. The aim of this paper is to show the performance comparison of different thresholding algorithms on the same images. The method applied has been validated on the retinal image data set that is publicly available. The experimental results show that the proposed method can accurately detect. The accuracy ratio of the thresholding algorithms on the data set consisting of 40 images was calculated as 0.952 for Fuzzy Logic Based Threshold, 0.950 for Maximum Entropy Based Threshold and 0.925 for Multiple Threshold.

Keywords: Retina, Fundus, Threshold Methods, Morphological processes

denetimli/denetimsiz öğrenme yöntemleri [1-9], morfolojik yöntemler [10-12], uyum süzgeci [13] gibi yöntemler daha hızlı ve daha anlaşılabilir yöntemlerdir. Bu makalede geleneksel bir yöntem olan morfolojik tabanlı bir yöntem kullanılmış olup literatürde önerilen diğer yöntemler şöyledir:

Soares vd. [2] tarafından retina görüntülerinin piksel parlaklık değerleri üzerinde farklı ölçeklerde Gabor-Dalgacık dönüşümü uygulanmıştır. Elde edilen farklı ölçekteki Gabor-Dalgacık dönüşüm çıktıları özellik olarak kullanılmıştır. Daha sonra tüm görüntüye Bayes Sınıflandırıcı uygulanarak fundus görüntüleri damar ya da damar olmayan bölgelere ayrılmıştır. Niemeijer vd. [5], piksel sınıflandırma yöntemini önermişlerdir. Önerdikleri bu sistemde Matematiksel Morfoloji, Bölge Büyütme, Eşleştirilmiş Filtre ve Doğrulama Tabanlı Yerel Eşik yaklaşımı karşılaştırılmıştır.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: btoptas@bandirma.edu.tr (B. Toptaş)

Geliş / Received: 21.03.2021 Kabul / Accepted: 13.09.2021 Yayımlanma / Published: 14.01.2022

doi: 10.28948/ngumuh.900696

Diego Marín vd. [6] tarafından fundus görüntüsündeki her pikselden yedi boyutlu bir özellik vektörü çıkarılmıştır. Çıkarılan özellikler sinir ağı kullanılarak sınıflandırılmıştır. Sınıflandırma aşamasında öncelikle tespit edilen piksellerin boşlukları doldurulmuş, daha sonra hatalı tespit edilen damar pikselleri damar olmayan olarak yeniden sınıflandırılmıştır. M. Elena Martinez-Perez vd. [14] tarafından hessian matrisinin özdeğer analizine dayanan bir çizgi geliştirme filtresi önerilmiştir. Daha sonra gradyan büyüklüğü ve temel eğrilik kullanılarak özellik çıkarılmıştır. Bu iki özellik damar veya arka plan olarak sınıflandırılması için Bölge Büyütme yaklaşımında kullanılmıştır. Sven Holm vd. [15] tarafından damar bölütleme için iki paralel yöntem önerilmiştir. Bu yöntemlerden ilki sadece fundus görüntünün piksel yoğunluğunu kullanarak damar ve damar olmayan pikselleri bölütlere ayırmaktadır. İkinci yöntem ise tamamen damar yoğunluğunu kullanarak fundus görüntülerinde yerel görüntüyü azaltıp damar bölütlemeyi sağlayan birkaç adımdan oluşmaktadır. Chengzhang Zhu vd. [16] tarafından Aşırı Öğrenme Makinesine dayalı denetimli bir yöntem önerilmiştir. Bölütleme aşamasında, bölütleme görüntüsünden çıkarılan özellik vektörü eğitim aşamasında elde edilen sınıflandırıcının girişi olarak kullanılmıştır. Eğitim aşaması için, eğitim görüntüsünün her pikselinden bir özellik vektörü çıkarılmıştır. Sınıflandırıcının çıktısı, ikili retina damar bölütleme sonucu olmuştur. Jingliang Zhao vd. [17] tarafından öncelikli olarak fundus görüntüler üzerinde görüntü iyileştirilmesi yapılmıştır. İyileştirilmiş görüntüler üzerinde Süper Piksel (SLIC) yöntemi uygulanmış ve bölütleme gerçekleştirilmiştir. Ardından otomatik olarak seçilen düğüm noktalarından damar takibine başlanmış ve belirlenen durma kriterine ulaşıldığında takip işlemi sonlanmıştır.

Retinanın oksijensiz kalması sonucu retinada istenmeyen yeni damarlar oluşur. Bu damarlar hassas bir yapıda olup DR hastalığının habercisidir. Bu istenmeyen damarları tespit etmek için retina damar ağ yapısının bilinmesi gerekir. Bu makalede, retina damar ağ yapısını otomatik olarak bölütleyen morfolojik tabanlı bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntem morfolojik işlemlere dayalı iki farklı yöntemden esinlenerek oluşturulmuştur. Bu yöntemde, ilk önce RGB renk uzayındaki görüntüler gri ölçekli görüntülere dönüştürülmüştür. Daha sonra, gri ölçekli görüntünün tersi üzerinde üst-şapka, alt-şapka ve morfolojik açma yöntemi uygulanmıştır. Morfolojik üst ve alt şapka yönteminin kullanılması ile retina damarlarının belirginleştirilmesi sağlanmıştır. Belirginleştirilmiş retina görüntülerini bölütlemek için üç farklı eşikleme yöntemi kullanılmıştır. Kullanılan eşikleme yöntemleri Çoklu Eşikleme yöntemi, Maksimum Entropi Tabanlı Eşikleme yöntemi ve Bulanık Kümeleme Tabanlı Eşikleme yöntemidir. Önerilen yöntem literatürdeki diğer geleneksel yöntemlerle de kıyaslanabilir olması için halka açık olarak sunulan DRIVE veri seti üzerinde test edilmiştir. Bu makalede, literatürdeki mevcut çalışmalardan farklı olarak retina fundus görüntüleri üzerinde farklı eşik algoritmalarının kıyaslanması yapılmıştır.

Makalenin organizasyonu şöyledir. İkinci bölümde Materyal ve Metot anlatılmaktadır. Üçüncü bölümde

Kullanılan Yöntemden bahsedilir. Dördüncü bölümde Bulgular ve Tartışmadan bahsedilir. Son bölümde ise Sonuçlar bölümü bulunmaktadır.

2 Materyal ve metot

Bu bölüm, önerilen yöntemin arkasındaki ilgili teorik materyal ve metotların kısa bir incelemesini içerir. İlgili her çalışma sonraki alt bölümlerde detaylandırılmıştır.

2.1 Morfolojik işlemler

Morfolojik işlemlerin temel amacı, görüntünün temel özelliklerini korumak ve görüntüyü basitleştirmektir. Bu çalışmada, üst-şapka ve alt-şapka dönüşümleri kan damarlarına belirginlik kazandırmak için kullanılır. Üst-şapka dönüşümü, bir giriş görüntüsüne morfolojik açma işlemi uygulandıktan sonra uygulama sonucunun orijinal giriş görüntüsünden çıkarılması işlemidir. Bu işlemin matematiksel ifadesi Denklem (1)'de verilmiştir. Alt-şapka dönüşümü, bir giriş görüntüsüne morfolojik bir kapama işlemi uygulandıktan sonra uygulama sonucunun orijinal giriş görüntüsünden çıkarılması işlemidir. Bu işlemin matematiksel ifadesi Denklem (2)'de verilmiştir.

$$T_{har}(g) = g - (g \circ SE) \quad (1)$$

$$B_{har}(g) = (g \bullet SE) - g \quad (2)$$

Burada, \circ operatörü morfolojik açma işlemi, \bullet operatörü ise morfolojik kapama işlemi temsil etmektedir. SE parametresi ise, bir yapı elemanıdır. Bu çalışmada, açılma operatörü için 21×21 'lik bir disk yapı elemanı, alt ve üst-şapka dönüşümleri için ise uzunluğu 21 olan bir çizgi yapı elemanı kullanılmıştır.

Denklem (1) 'e göre, açma operatörü görüntünün arka planına etki ettiğinden, üst-şapka dönüşümünün görüntünün arka planını çıkarması beklenir. Bu dönüşüm, yüksek geçiren bir filtre gibi davranır ve görüntünün maskeden daha küçük olan parlak alanlarını çıkarır. Denklem (2) 'ye göre, alt-şapka dönüşümü görüntünün arka planını etkiler ve görüntünün arka plandaki maskeden daha küçük olan bazı karanlık alanları üzerinde etkili olur. Parlak alanları (açma operatörünün sonuçları) görüntüye eklemek ve karanlık alanları (kapama operatörünün sonuçları) görüntüden çıkarmak mümkündür. Sonuç olarak, aydınlık ve karanlık alanlar arasındaki kontrastta bir iyileşme olacaktır.

2.2 Eşikleme yöntemleri

Görüntü eşikleme sadeliği ve sağlamlığı nedeni ile en sık kullanılan görüntü bölütleme yöntemlerinden biridir. Eşikleme işlemi, gri ölçekli bir görünümün yoğunluk seviyesine göre sınıflara ayrıldığı bir işlemdir. Bu sınıflandırma işlemi için tanımlanmış kurallara uygun bir eşik değeri seçmek gerekir. Bu çalışmada kullanılan eşikleme yöntemleri şöyledir;

2.2.1 Çok seviyeli eşikleme

Gri ölçekli görüntüyü birkaç farklı bölgeye ayırabilen bir işlemdir [18]. Bu işleme ait uyulması gereken kural Denklem (3)'de matematiksel olarak ifade edilmiştir.

$$\begin{aligned} C_1 &\leftarrow p \text{ if } 0 \leq p < t_h \\ C_2 &\leftarrow p \text{ if } t_h \leq p < L-1 \end{aligned} \quad (3)$$

Burada, p parametresi L gri tonlama seviyeleri $L = \{0, 1, 2, \dots, L-1\}$ ile temsil edilebilen gri tonlama görüntüsünün piksellerinden biridir. $C1$ ve $C2$ parametreleri, p pikselinin atanacağı sınıflardır, t_h parametresi ise eşik değeridir.

2.2.2 Maksimum entropi tabanlı eşikleme

Entropi yöntemlerine bağlı eşikleme işlemi araştırmacılar tarafından tercih edilen bir yöntemdir [19]. Otsu'nun eşikleme algoritmasından farklı olarak sınıflar arasındaki varyansı maksimize etmek ya da sınıf içi varyansı minimize etmek yerine sınıflar arası entropi maksimize edilir. Bu yöntemde göre, bir görüntüdeki yoğunluk değerlerinin olasılık dağılımına katkı veren ön ve arka plan görüntüsüne ait entropi değerleri ayrı ayrı hesaplanır ve toplamları maksimize edilir. Ardından, entropinin toplamını maksimize eden bir optimum eşik değeri hesaplanır [20]. Arka ve ön plan görüntüsüne ait entropi değeri Denklem (4) ve Denklem (5)'de verilmiştir. Denklem (6) arka ve ön plan görüntüsüne ait entropi değerlerinin maksimize edilmiş halidir.

$$H_b(t) = -\sum_{i=0}^t \frac{P_i}{P_t} \log_e \left(\frac{P_i}{P_t} \right) \quad (4)$$

$$H_w(t) = -\sum_{i=t+1}^{L-1} \frac{P_i}{1-P_t} \log_e \left(\frac{P_i}{1-P_t} \right) \quad (5)$$

$$t^* = \underset{t \in G}{\text{ArgMax}} \{H_b(t) + H_w(t)\} \quad (6)$$

Burada, t eşik değerini temsil eder, P_t parametresi $P_t = \sum_{i=0}^t P_i$ olarak hesaplanır. P_i parametresi görüntüdeki i gri düzeyinin olasılığıdır.

2.2.3 Bulanık mantık tabanlı eşikleme

Bulanık kümeleme bir yumuşak kümeleme tekniğidir. Bu kümeleme yöntemi, nesnelerin kümelere olan aitliğini ifade etmek için bir derece kavramı kullanır [21]. Her nesne için, toplam derece 1'dir. Denklem (7) her pikselin üyelik değerini hesaplamak için kullanılır.

$$u_{i,j} = \frac{1}{\sum_{k=1}^c \left[\frac{\|x_i - c_j\|}{\|x_i - c_k\|} \right]^{m-1}} \quad (7)$$

Burada, u_{ij} parametresi üyelik fonksiyonunu, x_i parametresi bireysel piksel değerini, c_j ve c_k parametreleri küme merkezini ve m parametresi 1'den fazla gerçek değeri temsil etmektedir.

Bölütleme görüntülerini ikili görüntülere dönüştürmek için kullanılacak eşik hesaplaması Denklem (8) ve Denklem (9) da verildiği gibidir.

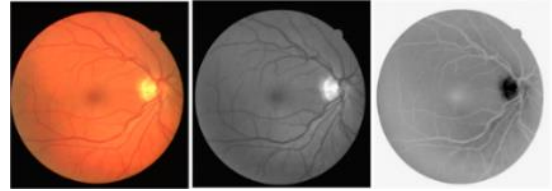
$$\text{Seviye } 0 = \frac{\max(I(c1 == 1)) + \min(I(c2 == 2))}{2} \quad (8)$$

$$\text{Seviye } 1 = \frac{\max(I(c2 == 1)) + \min(I(c3 == 3))}{2} \quad (9)$$

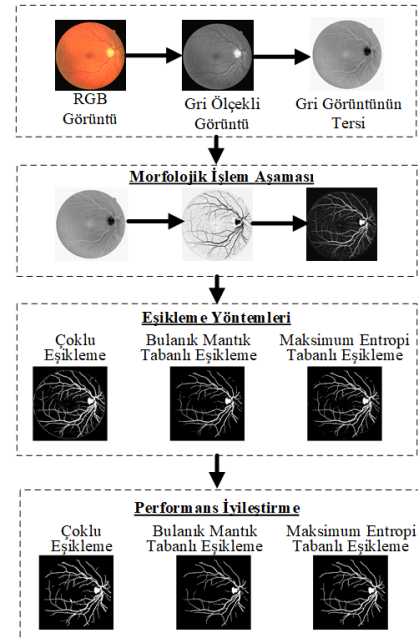
Burada, c parametresi sınıfı, I parametresi görüntüyü ve $Seviye$ parametresi denklemden gelen eşik değeridir.

3 Kullanılan yöntem

Önerilen yöntemde, veri setinde bulunan fundus görüntülerine ait damarların bölütlenmesi sağlanmıştır. Öncelikle, veri setinde bulunan görüntüler RGB renk uzayından gri ölçekli görüntülere dönüştürülür. Gri ölçekli görüntülerin tersi üzerinde önerilen sistem uygulanır. Şekil 1'de veri setine ait bir görüntü ve bu görüntüye ait gri ölçekli görüntü ile gri ölçekli görüntünün tersi verilmiştir. Önerilen sistemin genel yapısı ise Şekil 2'de verildiği gibidir.



Şekil 1. Örnek veri seti görüntüsü, Sırasıyla, orijinal RGB görüntü, Gri-Ölçekli görüntü, Gri-Ölçekli görüntünün tersi



Şekil 2. Akış şeması

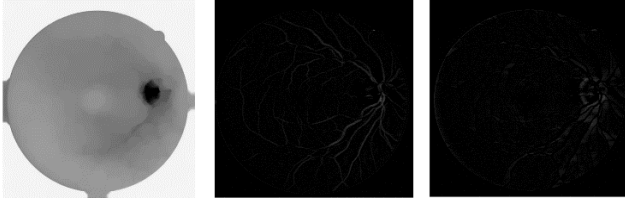
3.1 Veri seti

Önerilen yöntem diğer yöntemlerle kıyaslanabilir olması açısından halka açık olarak sunulan DRIVE veri seti üzerinde test edilmiştir. DRIVE veri setindeki görüntüler 45°

görüş alanında Canon 3CCD ile çekilmiştir. Görüntülerin her biri 565×584 piksel boyutunda 20 eğitim ve 20 test görüntüsünden oluşmaktadır. Veri setindeki damar pikselleri, deneyimli bir göz doktoru tarafından eğitilmiş üç gözlemci tarafından manuel olarak bölümlere ayrılmıştır. Test seti iki farklı gözlemci tarafından iki kez bölütlendirilmiş görüntülerden oluşur.

3.2 Morfolojik işlemler

Retina kan damarları, retina arka planına göre daha koyu görünürler. Ancak, bazı durumlarda kan damarlarının merkez çizgisi bölgesinde parlaklık görünür. Bu görünüm yansımalarından kaynaklanmaktadır. Bu durumu ortadan kaldırmak için ilk önce morfolojik açma işlemi uygulanır. Morfolojik açma işlemi için yarıçapı 21 olan bir disk oluşturulur. Oluşturulan bu disk gri ölçekli görüntünün tersine uygulanarak morfolojik açma işlemi yapılmış olur. Daha sonra uzunluğu 21 olan bir çizgisel yapı elemanı oluşturulur. Oluşturulan bu çizgisel yapı elemanı gri ölçekli görüntünün tersine uygulanarak üst-şapka ve alt-şapka dönüşümleri tamamlanmış olur. Şekil 3’de bu aşamaya kadar anlatılan işlemler görsel olarak ifade edilmiştir.



Şekil 3. Morfolojik işlemler. Sırası ile morfolojik açma, üst şapka ve alt şapka işlemleri

Belirli bir açıda yönlendirilmiş çizgisel bir yapılandırma elemanı fundus içerisinde tutulmadığında bir damarı veya damarın bir kısmını yok edebilir. Bu problem genelde yapılandırma elemanı dikey yönlere sahip olduğunda ve yapılandırma elemanı damar genişliğinden daha büyük olduğu durumlarda ortaya çıkmıştır. Oysa yapılandırma elemanının yönü ile damar paralel olduğunda bir yok olma olayı meydana gelmeyecektir. M. Fraz vd. [11], bu probleme çözüm olması için 21 piksel uzunluğunda bir çizgisel yapılandırma elemanı belirlemiştir. Bu yapısal elemanı 22.5° ’lik açılarla döndermiş ve en büyük çapa sahip damarı çıkarmak için bir toplam üst şapka dönüşümü kullanmıştır. M. Fraz vd. [11] tarafından önerilen toplam üst şapka dönüşümünden esinlenerek her biri 21 piksel uzunluğunda bir çizgiyi temsil eden ve her 22.5° ’de döndürülen bir çizgi yapılandırma elemanı sadece üst şapkaya değil ayrıca alt şapka ve morfolojik açma işlemine uygulanmıştır. Denklem (10)’da toplam üst şapka işlemine dahil edilen toplam alt şapka ve toplam morfolojik açma işlemi matematiksel olarak ifade edilmiştir. Şekil 4’te bu aşamaya ait işlem sonuçları görsel olarak verilmiştir.

$$\begin{aligned} I_{S_{th}} &= \sum_{\theta \in A} I_{th}^\theta \\ I_{S_{bh}} &= \sum_{\theta \in A} I_{bh}^\theta \\ I_{S_o} &= \sum_{\theta \in A} I_o^\theta \end{aligned} \quad (10)$$

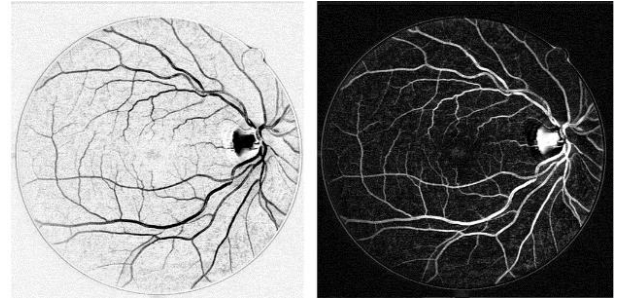
Burada, $I_{S_{th}}$, $I_{S_{bh}}$ ve I_{S_o} parametreleri sırasıyla θ derecelerde yapısal elemanın üst-şapka, alt-şapka ve morfolojik açma işlemlerinin toplamıdır. A parametresi, $\{x | 0 \leq x \leq 180 \text{ ve } x \bmod(22.5) = 0\}$ olarak tanımlanır.



Şekil 4. Morfolojik işlem döngü sonucu. Sırasıyla morfolojik açma, üst-şapka ve alt-şapka sonuçları. (Bkz. Denklem (10))

Daha sonra, M. D. Saleh vd. [12] tarafından önerilen matematiksel ifade kullanılmış ve Denklem (10)’da elde edilen sonuçlar bu matematiksel ifadeye göre nihai sonuca ulaşmıştır. M. D. Saleh vd. [12]’de verilen matematiksel ifadeye morfolojik açma işleminin üzerine üst-şapka sonucu eklenerek elde edilen sonuç alt-şapka sonucundan çıkarılır. Önerilen yöntemde Denklem (10)’dan elde edilen toplam morfolojik açma, toplam üst şapka ve toplam alt şapka sonuçları Denklem (11)’de ifade edildiği gibi işleme alınmıştır. Uzunluğu 21 piksel olan ve 22.5° ’lik açılarla dönererek her açı için oluşturulan toplam morfolojik açma işlemi toplam üst şapka dönüşümüne eklenmiş ve elde edilen sonuç toplam alt şapka dönüşümünden çıkarılmıştır. Bu aşamaya ait görsel sonuçlar Şekil 5’de sunulmuştur.

$$I = (I_{S_o} + I_{S_{th}}) - I_{S_{bh}} \quad (11)$$



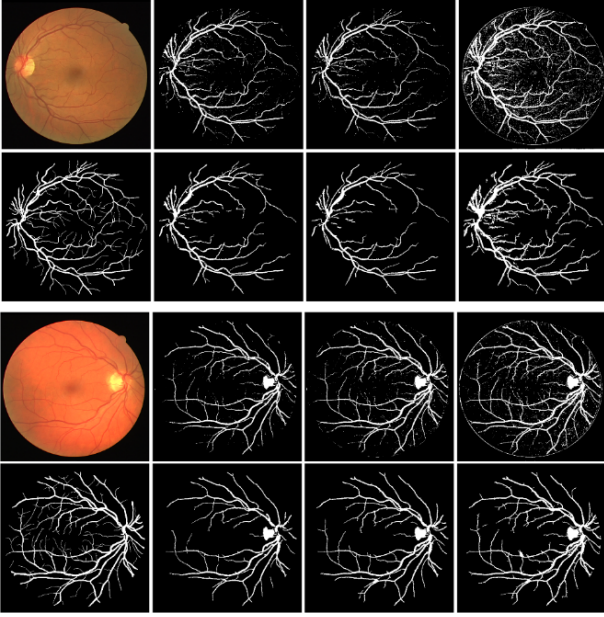
Şekil 5. Önerilen yöntem sonucu. İlk görüntü Denklem (11) sonucu, İkinci görüntü ilk görüntünün tersi alınmış halidir.

4 Bulgular ve tartışma

4.1 Bölütleme sonuçları

Üç farklı eşikleme algoritması iyileştirilmiş fundus görüntüleri üzerinde uygulanarak damar piksellerinin bölütlenmesi sağlanmıştır. İyileştirilmiş görüntüler eşikleme

işlemine tabi tutulduktan sonra çıktı görüntüleri üzerinde performans iyileştirilmesi yapılmıştır. Performans iyileştirme yönteminde damara ait olmayan damar benzeri görüntüler morfolojik işlemler kullanılarak yok edilmiştir. Bu aşama bağlı bileşen analizi kullanılarak önce küçük nesnel silinmiş daha sonrada damardan kopuk küçük boşluklar doldurulmuştur. Şekil 6’da eşikleme algoritmalarının performans iyileştirme sonuçları görsel olarak sunulmuştur. Şekil 6’da ilk sütunda orijinal görüntüler, ikinci sütunda Bulanık Mantık Tabanlı Eşikleme yöntem sonuçları, üçüncü sütunda Maksimum Entropi Tabanlı Eşikleme yöntem sonuçları, son sütunda Çoklu Eşikleme yöntem sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 6. Performans İyileştirme Sonuçları. Birinci satırlar eşikleme sonuçlarını, ikinci satırlar iyileştirme sonuçlarını göstermektedir. Orijinal görüntünün altındaki görüntüler 1.manuel bölütlenmiş gerçek zemin görüntüleridir.

Uygulanan yöntemin başarı ölçütünü hesaplamak için Doğruluk Oranı ölçüsü kullanılmıştır. Denklem (12)’de Doğruluk Oranı ölçütünün matematiksel ifadesi verilmiştir.

$$ACC = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad (12)$$

Burada, TP parametresi doğru pozitif, FP parametresi yanlış pozitif, TN parametresi doğru negatif ve FN parametresi yanlış negatif pikselleri temsil eder. ACC parametresi doğruluk oranını temsil eder. Hem bölütlenmiş görüntüde hem de gerçek zemin görüntüsünde aynı piksele ait ve piksel değerleri “1” olan piksellerin toplamı TP parametresinin değerini oluşturur. Hem bölütlenmiş görüntüde hem de gerçek zemin görüntüsünde aynı piksele ait ve piksel değerleri “0” olan piksellerin toplamı TN parametresinin değerini oluşturur. Hem bölütlenmiş görüntüde hem de gerçek zemin görüntüsünde aynı piksele ait ve piksel değerleri bölütlenmiş görüntü için “0”, gerçek zemin görüntüsü için “1” olan piksellerin toplamı FN

parametresinin değerini oluşturur. Hem bölütlenmiş görüntüde hem de gerçek zemin görüntüsünde aynı piksele ait ve piksel değerleri bölütlenmiş görüntü için “1”, gerçek zemin görüntüsü için “0” olan piksellerin toplamı FP parametresinin değerini oluşturur.

Tablo 1’de uygulanan yöntem de kullanılan üç eşikleme yönteminden elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Uygulanan yöntem, DRIVE veri seti üzerinde hem test hem eğitim veri kümesi üzerinde denenmiş olup toplamda 40 görüntü üzerinde çalıştırılmıştır.

Tablo 1. Eşikleme yöntemlerinin doğruluk oran sonuçları

Görüntü ismi	Bulanık Mantık Tabanlı Eşikleme	Maksimum Entropi Tabanlı Eşikleme	Çoklu Eşikleme Yöntemi
01_test	0.9610	0.95864	0.9550
02_test	0.9511	0.95653	0.9579
03_test	0.9522	0.93426	0.9301
04_test	0.9491	0.95705	0.9570
05_test	0.9526	0.94855	0.9450
06_test	0.9485	0.94221	0.9136
07_test	0.9505	0.94895	0.9444
08_test	0.9510	0.94043	0.9148
09_test	0.9530	0.94627	0.9345
10_test	0.9586	0.95376	0.9518
11_test	0.9494	0.94976	0.9479
12_test	0.9550	0.95244	0.9072
13_test	0.9500	0.94601	0.9460
14_test	0.9617	0.95821	0.9344
15_test	0.9636	0.96398	0.9493
16_test	0.9562	0.95520	0.9536
17_test	0.9574	0.95023	0.9290
18_test	0.9569	0.95723	0.9454
19_test	0.9713	0.96701	0.9561
20_test	0.9582	0.95505	0.9110
21_training	0.9582	0.95968	0.9630
22_training	0.9533	0.95464	0.9524
23_training	0.9173	0.95349	0.8338
24_training	0.9382	0.94285	0.9435
25_training	0.9459	0.92455	0.9161
26_training	0.9545	0.94524	0.8448
27_training	0.9479	0.95131	0.9504
28_training	0.9493	0.95311	0.9523
29_training	0.9589	0.95624	0.9478
30_training	0.9447	0.93437	0.5305
31_training	0.9464	0.94877	0.9505
32_training	0.9609	0.95895	0.9602
33_training	0.9588	0.95740	0.9563
34_training	0.9213	0.92242	0.8836
35_training	0.9574	0.95969	0.9567
36_training	0.9400	0.93858	0.9420
37_training	0.9542	0.95534	0.9527
38_training	0.9524	0.94959	0.9481
39_training	0.9507	0.94576	0.9114

40_training 0.9624 0.96145 0.9368

Tablo 1'de verilen sonuçların alandaki birkaç yaygın yöntemden daha iyi performans gösterdiği görülebilir. DRIVE veri setindeki 40 görüntüye ait üç eşikleme yönteminin eşik değeri **Tablo 2**'de gösterilmiştir. Yapılan çalışmanın diğer geleneksel yöntemlerle karşılaştırılması **Tablo 3**'de verilmiştir.

Tablo 2. Eşikleme yöntemlerinin değerleri

Görüntü ismi	Bulanık Mantık Tabanlı Eşikleme	Maksimum Entropi Tabanlı Eşikleme	Çoklu Eşikleme Yöntemi
01_test	78	84	81
02_test	96	81	96
03_test	61	90	64
04_test	103	74	102
05_test	66	80	72
06_test	60	84	64
07_test	78	84	84
08_test	56	83	64
09_test	60	85	65
10_test	69	85	75
11_test	101	79	101
12_test	61	86	67
13_test	76	85	80
14_test	69	87	73
15_test	81	86	87
16_test	83	84	87
17_test	65	87	68
18_test	74	84	79
19_test	71	83	75
20_test	57	88	62
21_training	90	84	93
22_training	86	80	88
23_training	67	104	71
24_training	92	82	93
25_training	48	91	62
26_training	52	88	59
27_training	91	81	94
28_training	94	81	95
29_training	68	79	75
30_training	39	98	44
31_training	114	71	112
32_training	75	80	80
33_training	82	85	86
34_training	85	86	88
35_training	92	82	94
36_training	84	86	87
37_training	96	80	98
38_training	74	83	79
39_training	61	91	64
40_training	63	79	67

Tablo 3. Diğer yöntemlerle performans karşılaştırması

Literatürdeki Yöntemler	Doğruluk Oranı
BenjunYin vd. [22]	0.943
B.Barkana vd. [23]	0.950
Peter Bankhead vd. [24]	0.937
M.M. Fraza vd. [11]	0.947
J.Zhang vd. [17]	0.943
Önerilen Yöntem	
Bulanık Mantık Tabanlı Doğruluk Oranı	0.952
Maksimum Entropi Tabanlı Doğruluk Oranı	0.950
Eşikleme Tabanlı Doğruluk Oranı	0.925

5 Sonuçlar

Bu makalede, paylaşımına açık olarak sunulan DRIVE veri seti üzerinde morfolojik işlemlere dayalı bir damar iyileştirme yöntemi kullanılmıştır. Damar iyileştirme aşamasından sonra Çoklu Eşikleme, Bulanık Mantık Tabanlı Eşikleme ve Maksimum Eşikleme yöntemleri kullanılarak damar bölütlemesi yapılmıştır. Bu yöntem temelde morfolojik işlemlere dayanmış olsa da asıl amaç eşikleme algoritmalarının yöntem üzerindeki performanslarının karşılaştırılmasıdır. Eşikleme yöntemleri, doğası ne olursa olsun tüm veriler üzerinde kullanılabilir. Ancak, farklı eşikleme yöntemlerinin aynı iyileştirilmiş görüntü üzerinde farklı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bu makalede, Bulanık Mantık Tabanlı Eşikleme yönteminin ortalama doğruluk oranı 0.952 olarak hesaplanmış ve diğer iki eşikleme yönteminden daha yüksek bir değere sahip olmuştur.

Bu makalede elde edilen deneysel sonuçlar tatmin edici bir seviyededir. Önerilen yöntem geliştirilmeye açıktır. Halka açık bir veri seti kullanıldığı için karşılaştırması ve doğruluğu test edilebilir durumdadır. İleriki çalışmalarımızda, bu makalede elde ettiğimiz eşikleme yöntemleri tecrübelerimizi kullanarak popüler algoritmalar ile görüntü eşikleme üzerinde çalışmayı hedeflemekteyiz.

Teşekkür

Bu çalışma, İnönü Üniversitesi bilimsel araştırma ve koordinasyon birimi tarafından FDK-2020-2109 proje numarası ile finanse edilmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 12

Kaynaklar

- [1] J. Staal, M. D. Abramoff, M. Niemeijer, M. A. Viergever, and B. Van Ginneken, "Ridge-based vessel segmentation in color images of the retina," *IEEE Trans. Med. Imaging*, vol. 23, no. 4, pp. 501–509, 2004, doi: 10.1109/TMI.2004.825627.
- [2] J. V. B. Soares, J. J. G. Leandro, R. M. Cesar, H. F. Jelinek, and M. J. Cree, "Retinal vessel segmentation using the 2-D Gabor wavelet and supervised classification," *IEEE Trans. Med. Imaging*, vol. 25, no. 9, pp. 1214–1222, Sep. 2006, doi:10.1109/TMI.2006.879967.
- [3] U. T. V. Nguyen, A. Bhuiyan, L. A. F. Park, and K. Ramamohanarao, "An effective retinal blood vessel segmentation method using multi-scale line detection," *Pattern Recognit.*, vol. 46, no. 3, pp. 703–715, 2013, doi: 10.1016/j.patcog.2012.08.009.
- [4] C. A. Lupaşcu, D. Tegolo, and E. Trucco, "FABC: Retinal vessel segmentation using AdaBoost," *IEEE Trans. Inf. Technol. Biomed.*, vol. 14, no. 5, pp. 1267–1274, 2010, doi: 10.1109/TITB.2010.2052282.
- [5] M. Niemeijer, J. Staal, B. Van Ginneken, M. Loog, and M. . Abramoff, "Comparative study of retinal vessel segmentation methods," in *2015 IEEE International Conference on Computational Intelligence and*

- Computing Research, ICCIC 2015*, 2004, pp. 9–18.
- [6] D. Marin, A. Aquino, M. E. Gegúndez-Arias, and J. M. Bravo, “A new supervised method for blood vessel segmentation in retinal images by using gray-level and moment invariants-based features,” *IEEE Trans. Med. Imaging*, vol. 30, no. 1, pp. 146–158, 2011, doi: [10.1109/TMI.2010.2064333](https://doi.org/10.1109/TMI.2010.2064333).
- [7] M. M. Fraz *et al.*, “Blood vessel segmentation methodologies in retinal images - A survey,” *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 108, no. 1, pp. 407–433, 2012, doi: [10.1016/j.cmpb.2012.03.009](https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2012.03.009).
- [8] E. Ricci and R. Perfetti, “Retinal blood vessel segmentation using line operators and support vector classification,” *IEEE Trans. Med. Imaging*, vol. 26, no. 10, pp. 1357–1365, 2007, doi: [10.1109/TMI.2007.898551](https://doi.org/10.1109/TMI.2007.898551).
- [9] B. Toptaş and D. Hanbay, “Retinal blood vessel segmentation using pixel-based feature vector,” *Biomed. Signal Process. Control*, vol. 70, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2021.103053>.
- [10] A. M. Mendonça and A. Campilho, “Segmentation of retinal blood vessels by combining the detection of centerlines and morphological reconstruction,” *IEEE Trans. Med. Imaging*, vol. 25, no. 9, pp. 1200–1213, 2006, doi: [10.1109/TMI.2006.879955](https://doi.org/10.1109/TMI.2006.879955).
- [11] M. M. Fraz *et al.*, “An approach to localize the retinal blood vessels using bit planes and centerline detection,” *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 108, no. 2, pp. 600–616, 2012, doi: [10.1016/j.cmpb.2011.08.009](https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2011.08.009).
- [12] M. D. Saleh and C. Eswaran, “An efficient algorithm for retinal blood vessel segmentation using h-maxima transform and multilevel thresholding,” *Comput. Methods Biomech. Biomed. Engin.*, vol. 15, no. 5, pp. 517–525, 2012, doi: [10.1080/10255842.2010.545949](https://doi.org/10.1080/10255842.2010.545949).
- [13] B. Zhang, L. Zhang, L. Zhang, and F. Karray, “Retinal vessel extraction by matched filter with first-order derivative of Gaussian,” *Comput. Biol. Med.*, vol. 40, no. 4, pp. 438–445, 2010, doi: [10.1016/j.combiomed.2010.02.008](https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2010.02.008).
- [14] M. E. Martinez-Perez, A. D. Hughes, S. A. Thom, A. A. Bharath, and K. H. Parker, “Segmentation of blood vessels from red-free and fluorescein retinal images,” *Med. Image Anal.*, vol. 11, no. 1, pp. 47–61, 2007, doi: [10.1016/j.media.2006.11.004](https://doi.org/10.1016/j.media.2006.11.004).
- [15] S. Holm, G. Russell, V. Nourrit, and N. McLoughlin, “DR HAGIS—a fundus image database for the automatic extraction of retinal surface vessels from diabetic patients,” *J. Med. Imaging*, vol. 4, no. 1, p. 014503, 2017, doi: [10.1117/1.jmi.4.1.014503](https://doi.org/10.1117/1.jmi.4.1.014503).
- [16] C. Zhu *et al.*, “Retinal vessel segmentation in colour fundus images using Extreme Learning Machine,” *Comput. Med. Imaging Graph.*, vol. 55, pp. 68–77, 2017, doi: [10.1016/j.compmedimag.2016.05.004](https://doi.org/10.1016/j.compmedimag.2016.05.004).
- [17] J. Zhao *et al.*, “Automatic retinal vessel segmentation using multi-scale superpixel chain tracking,” *Digit. Signal Process. A Rev. J.*, vol. 81, pp. 26–42, 2018, doi: [10.1016/j.dsp.2018.06.006](https://doi.org/10.1016/j.dsp.2018.06.006).
- [18] S. Kotte, P. Rajesh Kumar, and S. K. Injeti, “An efficient approach for optimal multilevel thresholding selection for gray scale images based on improved differential search algorithm,” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 9, no. 4, pp. 1043–1067, 2018, doi: [10.1016/j.asej.2016.06.007](https://doi.org/10.1016/j.asej.2016.06.007).
- [19] H. Üzen and A. Karçl, “Kumaş Hatası Tespiti için Entropi ile Geliştirilmiş Otomatik Eşikleme Yöntemi Automatic Thresholding Method Developed With Entropy For Fabric Defect Detection,” pp. 14–17.
- [20] P. K. Sahoo, S. Soltani, and A. K. C. Wong, “A survey of thresholding techniques,” *Comput. Vision, Graph. Image Process.*, vol. 41, no. 2, pp. 233–260, 1988, doi: [10.1016/0734-189X\(88\)90022-9](https://doi.org/10.1016/0734-189X(88)90022-9).
- [21] K. Rajesh Babu, V. A. S. Chakravarthy, S. Sandeep Reddy, G. Phani Kumar, and M. Vamsi Kumar, “Automated brain tumour detection in MRI images using threshold based FCM,” *Int. J. Sci. Technol. Res.*, vol. 8, no. 12, pp. 224–227, 2019.
- [22] B. Yin *et al.*, “Vessel extraction from non-fluorescein fundus images using orientation-aware detector,” *Med. Image Anal.*, vol. 26, no. 1, pp. 232–242, 2015, doi: [10.1016/j.media.2015.09.002](https://doi.org/10.1016/j.media.2015.09.002).
- [23] B. D. Barkana, I. Saricicek, and B. Yildirim, “Performance analysis of descriptive statistical features in retinal vessel segmentation via fuzzy logic, ANN, SVM, and classifier fusion,” *Knowledge-Based Syst.*, vol. 118, pp. 165–176, 2017, doi: [10.1016/j.knosys.2016.11.022](https://doi.org/10.1016/j.knosys.2016.11.022).
- [24] P. Bankhead, C. N. Scholfield, J. G. McGeown, and T. M. Curtis, “Fast retinal vessel detection and measurement using wavelets and edge location refinement,” *PLoS One*, vol. 7, no. 3, 2012, doi: [10.1371/journal.pone.0032435](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0032435).





Proje aşamasında öngörülen ve mevcut durumda sağlanan verimin karşılaştırılması: Azerbaycan Nahçıvan atıksu arıtma tesisi örneği

The comparison of efficiency between project phase and current situation-case study of Azerbaijan Nakhchivan wastewater treatment plant

Ahmet Saatçı^{1,*} , Özge Hanay² 

¹ Bingöl Üniversitesi, SHMYO, Çevre Sağlığı Programı, 12000, Bingöl, Türkiye

² Fırat Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 23100, Elazığ, Türkiye

Özet

Günümüzde artan nüfus ile atıksu miktarı ve kirlenici konsantrasyonları da nüfusa paralel olarak artmaktadır. Atıksuların olumsuz etkilerini en aza indirmeyi amaçlayan arıtma tesislerinde karşılaşılan problemler araştırıldığında, sorunların bazen proje aşamasındaki hatalardan, bazen de işletme hatalarından kaynaklandığı görülmektedir. Bu hatalar beklenenin üzerinde işletme maliyetlerini beraberinde getirmektedir. Bu nedenle proje aşaması ve işletme aşamasında dikkat edilmesi gereken noktaların belirlenmesi ve geliştirilmesi önemli bir konu haline gelmiştir. Bu çalışma kapsamında A²O prosesi olarak tasarlanarak 2018 yılında işletmeye alınan Azerbaycan Nahçıvan Atıksu Arıtma Tesisinin proje aşamasında ve işletme aşamasındaki hedeflenen kirlilik giderim verimi kıyaslanmıştır. Tesisin 12 ay boyunca BOI₅, KOİ, AKM, TN ve TP parametreleri incelenmiştir. Tesise gelen ortalama BOI₅ ve KOİ konsantrasyonunun 1. kademe proje hesaplarından yaklaşık %33 düşük olduğu gözlemlenmiştir. Kirlilik yüklerinin yüksek hesaplanması sonucu C:N:P oranı değişmiş, karbon kaynağı eksikliğinden kaynaklı çeşitli işletme problemleri ve verim kaybı oluşmuştur. Bu örnek tesis üzerinden projelendirme aşamasında yerinde ölçümler yapılmasının ve güncel hesap metotları kullanılmasının önemi vurgulanmıştır.

Anahtar kelimeler: Arıtma verimi, Tasarım kriterleri, Atıksu arıtma tesisi, Azerbaycan

1. Giriş

Dünyamızdaki hızlı nüfus artışı ve teknolojik gelişmeler ile ekolojik sistemin en önemli parçası olan su kaynakları hızla kirlenmekte ve oluşan atıksu miktarları artmaktadır [1]. Dünyada her on kişiden ikisinin güvenli içme suyuna erişimi bulunmamakta ve kuraklık nedeniyle pek çok ülkede su kısıtlamaları yaşanmaktadır. Bu nedenle kullanılmış suların arıtım sürecinden geçerek aynı sisteme geri döndürülmek ya da başka bir amaç için kullanılmak üzere yeniden kullanımı ve su tasarrufu için azami gayret gösterilmesi giderek daha fazla önem kazanmaktadır [2].

Abstract

Today, with the increasing population, the amount of wastewater and concentrations of pollutants are increasing in parallel with the population. When investigating problems at treatment plants aimed at minimizing the negative impact of wastewater, it is observed that problems are sometimes caused by mistakes at the project stage and sometimes by operating errors. These errors lead to higher operating costs than expected. Therefore, the determination and development of points to be considered both during the project and operation phase has become an important issue. In this study, the efficiency of pollution removal targeted at the project stage and the efficiency of pollution removal at the operating stage of the Azerbaijan Nakhchivan Wastewater Treatment Plant, which was designed as an A²O process and started to operate in 2018, were compared. The wastewater treatment plant parameters of BOD₅, COD, MLSS, TN and TP were examined for 12 months. When these parameters were analyzed, it was observed that the average concentration of BOD₅ and COD arriving at the WWTP was approximately 33% lower than the 1 stage project calculations. As a result of high calculation of pollution loads, the C:N:P ratio changed, various operating problems and loss of efficiency occurred due to carbon deficiency. The importance of using on-site measurements and ideal calculation methods at the project design stage was emphasized through this WWTP.

Keywords: Treatment efficiency, Design criteria, Wastewater treatment plant, Azerbaijan

Atıksu arıtma tesisleri (AAT) gerek yatırım maliyeti, gerekse işletme maliyeti yüksek tesislerdir. Yüksek maliyetli bu tesislerin tasarım aşamasında analizler titizlikle yapılmalı ve tesis devreye alındığında doğru işletme ile hedeflenen çıkış suyu kalitesine ulaşılmalıdır. Tesisin yapılacağı yerleşim biriminin atık suyunun içerdiği kirlenicilerin dikkatli bir şekilde tespit edilmesi, tesis yatırımı ve işletme maliyetini mümkün olduğunca düşürecek ve işletme kolaylığı sağlayacaktır. Doğru prosenin seçilmesi için gelecek nüfus, debi ve kirlilik yüklerinin yüksek doğrulukla hesaplanması ve tesis performansını belirleyecek tüm faktörlerin proje aşamasında dikkatlice değerlendirilmesi

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: asaatci@bingol.edu.tr (A. Saatçı)

Geliş / Received: 06.03.2020 Kabul / Accepted: 16.07.2021 Yayımlanma / Published: 14.01.2022

doi: 10.28948/ngumuh.699574

gerekir. Bu değerlendirmelerin uygun bir şekilde yapılmaması arıtma tesislerinin işletmesini yapan kuruluşlarda sorunlara neden olmaktadır. Bu sorunlar tesislerin ilk kuruluş ve işletme maliyetlerine büyük yük getirmektedir. Arıtma tesislerinin öngörülen verimi sağlaması ne derece rasyonel olarak projelendirildiği ile alakalıdır. Atıksu arıtma tesislerinin projelendirilmesi ve işletilmesi ile ilgili çok sayıda çalışma mevcuttur.

Amerika Çevre Koruma Ajansı (EPA) [3] yayınladığı bildiriye herhangi bir atıksu akışının etkin yönetimi için özellikleri hakkında makul derecede doğru bir bilgi gerektiğini belirtmiştir. Bu atıksularla ilgili ayrıntılı karakterizasyon verilerinin yalnızca atıksu arıtma ve bertaraf sistemlerinin etkili tasarımını kolaylaştırmak için değil, aynı zamanda su koruma ve atık yükü azaltma stratejilerinin geliştirilmesini ve uygulanmasını sağlamak için de gerekli olduğunu vurgulamıştır.

Reynolds ve Richards [4] arıtma tesislerinin uygun şekilde çalışmasını sağlamak için bakılması gereken parametreler ve testleri incelemişlerdir. Yine aynı çalışmada aktif çamur süreçlerinde karşılaşılan işletme problemlerini ele almıştır.

Qasim [5] bir su kirliliği problemini belirlemek, tasarım verilerini geliştirmek, alternatifleri değerlendirmek ve bir çözüm önermek için bir tesis planı hazırlanmıştır. Tesis planında geliştirilen veriler, atıksu arıtma tesislerinin tasarım planlarının, şartnamelerinin ve maliyet tahminlerinin hazırlanmasında kullanılmaktadır.

Değirmenci vd. [6] tarafından yapılan çalışmada atıksu miktarı ve BOİ₅ kirlilik yükünün, havalandırma havuzu ilk yatırım ve enerji maliyetlerine olan etkileri incelenmiş, yapılan çalışmalar sonucunda; BOİ₅, debi, F/M ve UAKM miktarındaki değişimlerin ilk yatırım ve enerji maliyetlerini önemli ölçülerde değiştirdiği belirlenmiştir.

Tchnobanoglous vd. [7] arıtma tesisi tasarım süreçlerinin önemini belirtmiş, tesis tasarım ve hesaplamalarını açıklayan bir çalışma gerçekleştirmiştir.

Alpaslan vd. [8] tarafından hazırlanan “Atıksu Arıtma Tesislerinin Tasarım ve Proje Kontrol Esasları” isimli çalışmada atıksu arıtma tesisleri tasarımında dikkat edilecek parametreler hakkında bilgi verilmiş ve atıksu arıtma tesislerinde kullanılan ekipmanların çalışma prensipleri, kullanım şartları, tesis prosesleri açıklanmıştır.

Topal vd. [9] Elazığ Belediyesi Atıksu Arıtma Tesisi'nin 2010-2011 kış sezonunda mevcut durumu değerlendirilmiş ve tesisin pH, sıcaklık, debi, Çözünmüş Oksijen (ÇO), Askıda Katı Madde (AKM) ve Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ) parametrelerinin değişimini incelenmişlerdir.

Tatar ve Sağlam [10] Kızıltepe İleri Biyolojik arıtma tesisinin 24 saatlik kompozit numuneler ile KOİ, BOİ₅ ve AKM parametrelerini analiz edip giderim verimliliğini gözlemlemişlerdir.

Bu çalışmanın amacı yapılması planlanan evsel atıksu arıtma tesislerinin tasarım parametrelerinde yaşanabilecek hataları bir tesis üzerinden ele almak ve karşılaştırmalı değerlendirme ile sonuçlarını tartışarak projelendirme aşamasında nüfus tahmin metodlarında doğruluk payı yüksek hesaplamaların kullanılmasının, debi, kirlilik yükü gibi parametrelerinin yerinde ölçümünün yapılmasının önemini

vurgulayarak literatüre katkı sağlamaktır. Bu amaçla Azerbaycan Nahçıvan AAT örneği üzerinden bir çalışma gerçekleştirilerek, proje aşamasında hedeflenen verim ve işletme parametreleri ile yapım sonrası işletme verimi kıyaslanarak projenin ne derece isabetli ve rasyonel olduğu değerlendirilmiş, tasarım aşamasında hassas olarak yapılması gereken hesaplamalara dikkat çekilmiştir.

2. Materyal ve metot

Yerel yönetimler halkın ihtiyaçlarını karşılamak ve çevre koruma politikaları gereğince atıksuları arıtarak alıcı ortama deşarjını sağlamakla yükümlüdür. Bu çerçevede, atıksuların deşarj edildiği ortama olumsuz etkilerini en aza indirmeyi amaçlayan Azerbaycan Nahçıvan AAT 2010 yılında projelendirilmiş ve 2018 yılında tamamlanarak işletmeye alınmıştır. Azerbaycan Nahçıvan AAT'nde, ileri biyolojik arıtma sistemi olan A²O (anaerobik/anoksik/aerobik) prosesi seçilmiştir. Bu sistem, atıksuyun deşarj limitlerini sağlamak ve alıcı ortamı korumak amacıyla eş zamanlı karbon, azot ve fosfor giderimini hedeflemektedir. Çalışmada tesisin tasarım kriterleri ele alınarak sonuçlar ile karşılaştırma yapılmıştır.

2.1. Nahçıvan atıksu arıtma tesisi tasarım kriterleri

Nahçıvan AAT, Nahçıvan şehir merkezi ve çevresindeki 5 beldeye hizmet vereceği için nüfus projeksiyonu belirlenirken, Nahçıvan şehri ve çevresindeki 5 beldenin nüfusları toplanarak hesaplamalar yapılmıştır. Nahçıvan AAT için nüfus projeksiyon analizi **Tablo 1**'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Nahçıvan nüfus projeksiyonu

Hesap Yöntemi	2022 Yılı Nüfusu (kişi)	2034 Yılı Nüfusu (kişi)
En Küçük Kareler Yöntemi	100514	116739
Aritmetik Artış Metodu	102523	120860
Üssel Yöntem	92548	101740
*Öngörülen Artış (%2)	106768	135408

*Azerbaycan Resmi İstatistik Kurumu tarafından öngörülen nüfus artış hızı

Tablo 1'de görüldüğü gibi farklı yöntemlerle hesaplanan nüfus tahminlerinde Azerbaycan Nahçıvan nüfusunun 2022 yılı için 92548 – 106768 kişi; 2034 yılı için 101740 – 135408 kişi olarak değişen değerler elde edilmektedir. Burada Azerbaycan resmi istatistik kurumu “Azərbaycan Respublikasının Dövlət Statistika Komitəsi” nin belirlediği nüfus artış hızı esas alınarak bulunan; $N_{2022} = 106768$ kişi, $N_{2034} = 135408$ kişi nüfus değerleri hesaplara esas alınmıştır.

2.1.1. Debi hesapları

Nahçıvan AAT proje kabullerinde evsel debiler için günlük kişi başı su tüketimi şebeke sayaçlarından 30 günlük verilerin ortalaması alınarak 167 L/kişi-gün kabul edilmiştir. Su tüketiminin %90'ının kanalizasyon şebekesine intikal edeceği kabul edilmiştir. Yağmur suyu debisi olarak evsel atıksu debisinin %10'u maksimum debi hesaplarında dikkate alınmıştır. **Tablo 2**'de Nahçıvan AAT debi miktarları proje müellifi tarafından hesaplanarak yıllara göre verilmiştir.

Tablo 2. Nahçıvan AAT debi hesabı

Debi Hesabı	2011	2022	2034
¹ Nüfus	85870	106768	135408
² Evsel Su İhtiyacı (L/sn)	165.98	206.37	261.73
³ Kurumların İhtiyacı (L/sn)	8.30	10.32	13.09
⁴ Ticari İhtiyaç (L/sn)	16.60	20.64	26.17
⁴ Endüstri İhtiyacı (L/sn)	16.60	20.64	26.17
Toplam Yerleşim Dışı İhtiyaç (L/sn)	41.49	51.59	65.43
Toplam Alıcı İhtiyacı (L/sn)	207.47	257.96	327.16
⁵ Sızıntı (L/sn)	20.75	25.80	32.72
⁶ Kayıp (L/sn)	10.37	12.90	16.36
TOPLAM (L/sn)	238.59	296.66	376.23
TOPLAM (m ³ /gün)	20614.1	25631.0	32506.4

¹ Yıllık ortalama nüfus artışı % 2 kabul edilmiştir.

² Kişi başı su tüketimi 167 L/kişi/gün olarak alınmıştır.

³ Evsel Su ihtiyacının % 5'i alınmıştır.

⁴ Evsel Su ihtiyacının % 10'u alınmıştır.

⁵ Toplam Alıcı ihtiyacının % 10'u alınmıştır.

⁶ Toplam Alıcı ihtiyacının % 5'i alınmıştır.

Atıksu arıtma tesisi tasarımı için proje müellifi tarafından hesaplanan tasarım debisi, ortalama debi, minimum ve maksimum debiler **Tablo 3**'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Nahçıvan AAT kabul edilen debiler

Tasarım Debileri (m ³ /gün)	Yıllar		
	2011	2022	2034
Q _{tasarım}	38730	43293	53337
Q _{24 ort}	20614	25631	32506
Q _{min}	14221	16529	19051
Q _{max}	42417	51317	65513

2.1.2. Kirlilik yükü hesapları

Proje müellifi tarafından kirlilik yükü hesaplamalarında 2011 ve 2022 yılı BOİ₅ konsantrasyonu 60 g/kişi-gün, 2034 yılı için BOİ₅ konsantrasyonu 65 g/kişi-gün alınmıştır. AKM, toplam azot (TN) ve toplam fosfor (TP) yükleri de 2011 ve 2022 yılları için aynı alınmış olup AKM: 70 g/kişi-gün, TN: 10 g/kişi-gün ve TP: 3 g/kişi-gün olarak alınmıştır. Şehirde yer alan mezbaha kaynaklı atıksular için literatürde verilen kirlilik konsantrasyonları kullanılmıştır (BOİ₅= 2500 mg/L, AKM= 1000 mg/L, TKN= 300 mg/L, P= 6.5 mg/L). Projelendirme geri devir oranı R=1.1 ve işletmeye esas F/M=0.3 olarak alınmıştır. Kabul edilen kirlilik yükleri **Tablo 4**'te ayrı ayrı gösterilmiştir.

Tesisin arıtım verimi 91/271/EEC No'lu Avrupa Birliği Kentsel Atıksu Arıtımı Direktifine göre verilmiş olan KOİ, BOİ, AKM, TN ve TP değerlerinin alıcı ortama deşarj standartları esas alınarak değerlendirilmiştir. Tesis performansı ve kirlenici parametreleri bu yönetmelik ve proje raporundaki hedefler kıyaslanarak yapılmıştır. **Tablo 5**'de AB Kentsel Atıksu Arıtımı direktifinde belirlenen deşarj limitleri gösterilmektedir.

Tablo 4. Nahçıvan AAT hesaplamalarında kabul edilen birim kirlilik yükleri (g/kişi-gün)

Evsel Atıksu Karakterizasyonu	2011	2022	2034
BOİ ₅ (g/kişi-gün)	60	60	65
KOİ (g/kişi-gün)	100	100	110
AKM (g/kişi-gün)	70	70	70
TN (g/kişi-gün)	10	10	11
TP (g/kişi-gün)	3	3	3

Tablo 5. 91/271/EEC No'lu AB Direktifine göre kentsel atıksu deşarj limitleri

PARAMETRE	*Deşarj Limitleri (mg/L)	Min. Arıtma Verimi (%)
BOİ ₅	25	70-90
KOİ	125	75
AKM	35	90 (Nüfus>10000)
TN	15	80
TP	2	70-80

Proje müellifi tarafından hazırlanan 1. kademe yılı kirlilik yükleri ve 2. kademe yılı kirlilik konsantrasyonları ve hedeflenen arıtma verimleri **Denklem (1)** ve **(2)**'ye göre hesaplanarak **Tablo 6**'da gösterilmiştir. Tesisin deşarj limitleri 91/271/EEC No'lu Avrupa Birliği Kentsel Atıksu Arıtımı Direktifine göre kabul edilmiştir.

$$Kirlilik\ Y\ddot{u}k\left(\frac{kg}{g\ddot{u}n}\right) = \frac{Birim\ y\ddot{u}k\left(\frac{gr}{ki\ddot{s}i.g\ddot{u}n}\right) \times Mevcut\ n\ddot{u}fus\ (ki\ddot{s}i)}{1000} \quad (1)$$

$$Konsantrasyon\left(\frac{mg}{L}\right) = \frac{Kirlilik\ y\ddot{u}k\left(\frac{kg}{g\ddot{u}n}\right)}{Debi\left(\frac{m^3}{g\ddot{u}n}\right)} \quad (2)$$

Tablo 6. Proje kademelerine göre kirlilik konsantrasyonları (mg/L) ve minimum arıtma verimleri

PARAMETRE	*Deşarj limitleri (mg/L)	1.Kademe nüfuslarına göre		2.Kademe nüfuslarına göre	
		Hesaplanan kirlilik kons. (mg/L)	Hedef min. arıtma verimi (%)	Hesaplanan kirlilik kons. (mg/L)	Hedef min. arıtma verimi (%)
BOİ ₅	25	201.01	87.56	270.76	90.76
KOİ	125	335.02	62.69	458.21	72.72
AKM	35	234.52	85.08	291.59	87.99
TN	15	33.50	55.22	45.82	67.26
TP	2	10.05	80.10	12.50	83.99

* 91/271/EEC No'lu Avrupa Birliği Kentsel Atıksu Arıtımı Direktifine göre

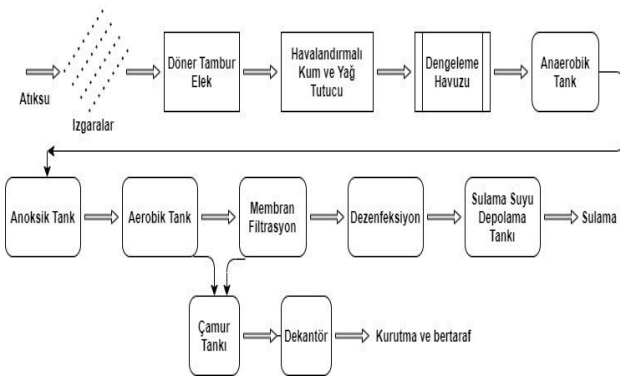
2.1.3. Nahçıvan atıksu arıtma tesisi proses seçimi

Nahçıvan Su Temini Komitesi tarafından AAT çıkış suyunun tarımsal sulama amaçlı kullanımı düşünülmektedir. Sulama suyu olarak kullanılacak sulara ileri arıtım (karbon, azot ve fosfor giderimi) uygulanması gerekmektedir [7]. Tasarım hesaplarının değerlendirilmesi sonucunda tesisin BOİ/P oranınının 20 olduğu kabul edilerek, eş zamanlı

nitrikasyon-denitrifikasyon ve fosfor giderimine olanak sağlayan A²O prosesi uygulanabileceği belirlenerek tesiste son çöktürme tankı yerine membran entegreli A²O prosesi tercih edilmiştir.

Arıtma tesisini oluşturan üniteler; otomatik temizlemeli kaba ve ince ızgaralar, havalandırmalı kum ve yağ tutucu, döner tambur elek, dengeleme havuzu, anaerobik havuzlar (biyofosfor havuzu), anoksik havuzlar, aerobik aktif çamur havuzları, membran reaktörler, geri devir merkezi, çamur yoğunlaştırma ve çamur susuzlaştırma ünitesidir. Tesis akım şeması Şekil 1’de gösterilmiştir.

Tesiste sırasıyla sisteme gelen atıksular kaba ve ince ızgara ünitelerine iletilir. Kaba ızgarada 40 mm’den iri maddelerden, ince ızgarada 5 mm’den büyük çaplı katı maddelerden arındırılan atıksu daha sonra döner tambur eleğe gelir. Burada 0.3 mm’den büyük çaplı katı maddeler tutulur. Ardından atıksu kum tutucu ünitelerine, aktarılır ve burada atıksu içinde bulunan ve mekanik ekipmanlara zarar vermesi muhtemel olan kumlardan ve yağdan arındırılarak pompalar vasıtasıyla dengeleme havuzuna gönderilir. Dengeleme ünitesinden çıkan atıksular biyolojik arıtma başlar ve fosfor arıtımının da öngörüldüğü tesislerde anaerobik ve anoksik havuzlara oradan da aerobik şartların sağlanacağı havalandırma havuzlarına gönderilir. Havalandırma havuzlarında karbonlu organik madde ve fosfor gideriminin sağlanmasının ardından atıksuda askıda bulunan mikroorganizmalar harici membranlar aracılığıyla atıksudan ayrıştırılarak arıtılmış atıksu sulamada kullanılmak üzere sulama havuzuna deşarj edilir. Arıtılan atıksular tarımsal sulamada kullanılacak ise dezenfeksiyona veya diğer ileri arıtma yöntemlerine tabi tutulması gerekmektedir. Dezenfeksiyon amacıyla tesiste ozonlama işlemi tercih edilmiştir. Membranlarda tutulan mikroorganizmalar çamur susuzlaştırma ünitelerinden geçirilerek katı hale dönüştürülür ve uygun bertaraf yöntemleri ile bertaraf edilir.



Şekil 1. Nahçıvan AAT proses akım şeması

2.1.4. Analiz metotları

Atıksuya ait kirlilik parametrelerinin analizi arıtma tesisine ait laboratuvarda yapılmıştır. TS ISO 5667-10 standardına göre numuneler alınmıştır. TS EN ISO 5667-3 standardına göre numuneler korunmuştur. BOİ₅ analizi SM 5210 B standardına göre, KOİ analizi TS 2789 standardına göre ve AKM analizi TS EN 872 standardına göre, TN

analizi TS EN 12260 standardına göre ve TP analizi SM 4500 PB standardına göre yapılmıştır.

3. Bulgular ve tartışma

Nahçıvan AAT Kasım 2017’de işletmeye alınmıştır. Bu çalışmada; Ocak 2018 - Aralık 2018 tarihleri arasında tesis girişi ve çıkışından alınan 2 saatlik kompozit numunelerin laboratuvar analiz sonuçlarına göre değerlendirmeler yapılmıştır.

3.1. BOİ₅, KOİ ve AKM giderim verimlerinin kıyaslanması

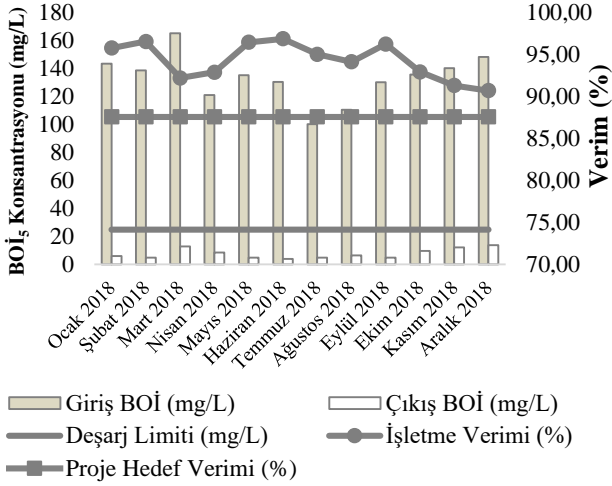
Arıtma tesisinin hedeflenen arıtma verimini sağlayabilmesi için sistemin otomasyonunun sağlanması ve işletme parametrelerinin düzenli bir şekilde izlenerek rutin olarak analizlerin yapılması gerekmektedir [9]. Şekil 2’de verilen grafikte 2018 yılının Ocak-Aralık periyodunda Nahçıvan AAT’nin giriş ve çıkışından alınan 2 saatlik kompozit numunelerin BOİ₅ konsantrasyonlarının değişimi ve deşarj standardı olarak kabul edilen Avrupa Birliği Kentsel Atıksu Arıtımı Direktifinde belirtilen BOİ₅ deşarj limiti gösterilmektedir. Çıkış numunesinin BOİ₅ konsantrasyonlarının 12 ay süresince yönetmelik deşarj sınırı olan 25 mg/L’den düşük olduğu görülmektedir. En fazla kirlilik konsantrasyonunun olduğu ay Mart 2018’de 165.2 mg/L, en düşük olduğu ay ise Temmuz 2018’de 100.2 mg/L olarak ölçülmüştür. Analiz süresince ortalama giriş BOİ₅ konsantrasyonu 133.23 mg/L, çıkış konsantrasyonu 7.78 mg/L’dir. Sonuçların kabul edilen yönetmelikte belirlenen BOİ₅ deşarj limitlerine uygun olduğu görülmektedir.

Toplam giriş BOİ₅ konsantrasyonlarına bakıldığında, 12 ay süresince tesise gelen ortalama BOİ₅ konsantrasyonu, tesisin projelendirme hesaplarında 1. kademe BOİ₅ kirlilik konsantrasyonu olan 201.01 mg/L’ye kıyasla yaklaşık %33 daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Aynı grafikte BOİ₅ giderim verimindeki değişim ve proje aşamasında hedeflenen verim de gösterilmektedir.

Proje aşamasında 1. kademe için BOİ₅ giderim verimi hedefi % 87.56’dır. Arıtma verimleri analiz edildiğinde BOİ₅ arıtma veriminin yıl boyunca yönetmelikte kabul edilen sınır değerlerin üstünde olduğu görülmektedir. Yıllık ortalama BOİ₅ arıtma verimi % 94.25 olarak hesaplanmıştır ve proje aşamasında hedeflenen 1. kademe arıtma veriminin üzerinde olduğu gözlemlenmektedir.

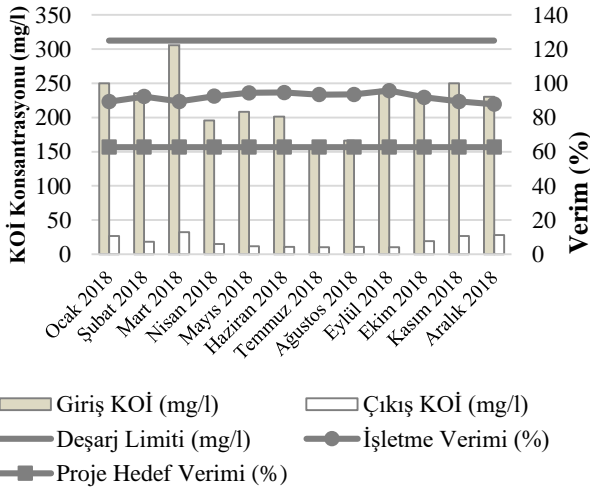
Şekil 3’te verilen grafikte 2018 yılının Ocak-Aralık periyodunda Nahçıvan AAT’nin giriş ve çıkışından alınan 2 saatlik kompozit numunelerin KOİ konsantrasyonlarının değişimi ve deşarj standardı olarak kabul edilen Avrupa Birliği Kentsel Atıksu Arıtımı Direktifinde belirtilen KOİ deşarj limiti gösterilmektedir. Çıkış atıksuyuna ait KOİ konsantrasyonlarının 12 ay süresince yönetmelik deşarj sınırı 125 mg/L’den düşük olduğu görülmektedir. En fazla kirlilik konsantrasyonunun olduğu ay Mart 2018’de 305.62 mg/L, en düşük olduğu ay ise Temmuz 2018’de 158.2 mg/L olarak ölçülmüştür. Analiz süresince ortalama giriş KOİ konsantrasyonu 223.07 mg/L, çıkış konsantrasyonu 18.33 mg/L’dir. Sonuçların kabul edilen yönetmelikte belirlenen KOİ deşarj limitlerine uygun olduğu görülmektedir. Toplam giriş atıksuyuna ait KOİ konsantrasyonlarına bakıldığında, 12 ay süresince tesise gelen ortalama KOİ konsantrasyonu,

tesisin projelendirme hesaplarında 1. kademe KOİ kirlilik konsantrasyonu olan 335.02 mg/L'ye kıyasla yaklaşık %33 daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Aynı grafikte KOİ giderim verimindeki değişim ve proje aşamasında hedeflenen verim de gösterilmektedir.



Şekil 2. AAT giriş ve çıkış atıksu BOİ₅ konsantrasyonları ve BOİ₅ giderim verimi

Proje aşamasında 1. kademe için KOİ giderim verimi hedefi % 62.69'dur. Arıtma verimleri analiz edildiğinde KOİ arıtma veriminin yıl boyunca yönetmelikte kabul edilen sınır değerlerin üstünde olduğu görülmektedir. Yıllık ortalama KOİ arıtma verimi % 92.01 olarak hesaplanmıştır ve proje aşamasında hedeflenen 1. kademe arıtma veriminin üzerinde olduğu gözlemlenmektedir.

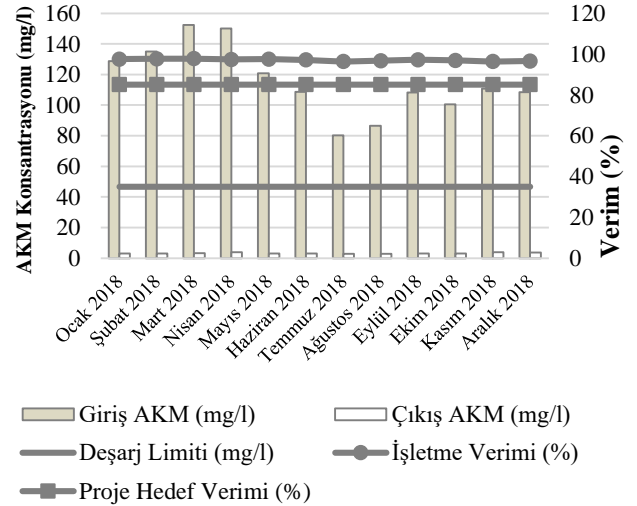


Şekil 3. AAT giriş ve çıkış atıksu KOİ konsantrasyonları ve KOİ giderim verimi

Şekil 4'te verilen grafikte 2018 yılının Ocak-Aralık periyodunda Nahçıvan AAT'nin giriş ve çıkışından alınan 2 saatlik kompozit numunelerin AKM konsantrasyonlarının değişimi ve deşarj standardı olarak kabul edilen Avrupa Birliği Kentsel Atıksu Arıtımı Direktifinde belirtilen AKM deşarj limiti gösterilmektedir. Çıkış atıksuyuna ait AKM

konsantrasyonlarının 12 ay süresince yönetmelik deşarj sınırı 35 mg/L'den düşük olduğu görülmektedir. En fazla kirlilik konsantrasyonunun olduğu ay Mart 2018'de 152.3 mg/L, en düşük olduğu ay ise Haziran 2018'de 80.2 mg/L olarak ölçülmüştür. Analiz süresince ortalama giriş AKM konsantrasyonu 115.87 mg/L, çıkış konsantrasyonu 3.27 mg/L'dir. Sonuçların kabul edilen yönetmelikte belirlenen AKM deşarj limitlerine uygun olduğu görülmektedir. Toplam giriş AKM konsantrasyonlarına bakıldığında, 12 ay süresince tesise gelen ortalama AKM konsantrasyonu, tesisin projelendirme hesaplarında 1. kademe AKM kirlilik konsantrasyonu olan 234.52 mg/L'ye kıyasla yaklaşık %51 daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Aynı grafikte AKM giderim verimindeki değişim ve proje aşamasında hedeflenen verim de gösterilmektedir.

Proje aşamasında 1. kademe için AKM giderim verimi hedefi % 85.08'dir. Arıtma verimleri analiz edildiğinde AKM arıtma veriminin yıl boyunca yönetmelikte kabul edilen sınır değerlerin üstünde olduğu görülmektedir. Yıllık ortalama AKM arıtma verimi de % 97.11 olarak hesaplanmıştır ve proje aşamasında hedeflenen 1. kademe arıtma veriminin üzerinde olduğu gözlemlenmektedir.

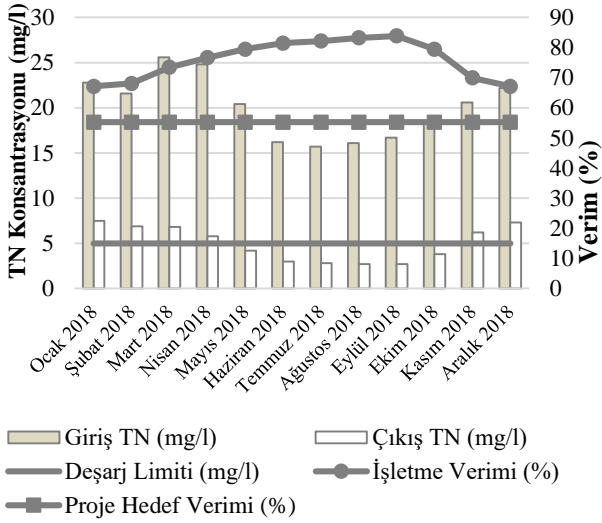


3.2. Toplam azot ve toplam fosfor giderimi

Şekil 5'te verilen grafikte 2018 yılının Ocak-Aralık periyodunda Nahçıvan AAT'nin giriş ve çıkışından alınan 2 saatlik kompozit numunelerin TN konsantrasyonlarının değişimi ve deşarj standardı olarak kabul edilen Avrupa Birliği Kentsel Atıksu Arıtımı Direktifinde belirtilen TN deşarj limiti gösterilmektedir. Çıkış numunesinin TN konsantrasyonlarının 12 ay süresince yönetmelik deşarj sınırı 15 mg/L'den düşük olduğu görülmektedir. En fazla kirlilik konsantrasyonunun olduğu ay Mart 2018'de 25.6 mg/L, en düşük olduğu ay ise Temmuz 2018'de 15.7 mg/L olarak ölçülmüştür. Analiz süresince ortalama giriş TN konsantrasyonu 20.10 mg/L, çıkış konsantrasyonu 4.98 mg/L'dir. Sonuçların kabul edilen yönetmelikte belirlenen TN deşarj limitlerine uygun olduğu görülmektedir. Toplam giriş TN konsantrasyonlarına bakıldığında, 12 ay süresince tesise gelen ortalama TN konsantrasyonu, tesisin projelendirme hesaplarında 1. kademe TN kirlilik

konsantrasyonu olan 33.50 mg/L'ye kıyasla yaklaşık %40 daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Aynı grafikte TN giderim verimindeki değişim ve proje aşamasında hedeflenen verim de gösterilmektedir.

Proje aşamasında 1. kademe için TN giderim verimi hedefi %55.22'dir. Arıtma verimleri analiz edildiğinde TN arıtma veriminin yıl boyunca yönetmelikte kabul edilen sınır değerlerin üstünde olduğu görülmektedir. Yıllık ortalama TN arıtma verimi de %75.98 olarak hesaplanmıştır ve proje aşamasında hedeflenen 1. kademe arıtma veriminin üzerinde olduğu gözlemlenmektedir.



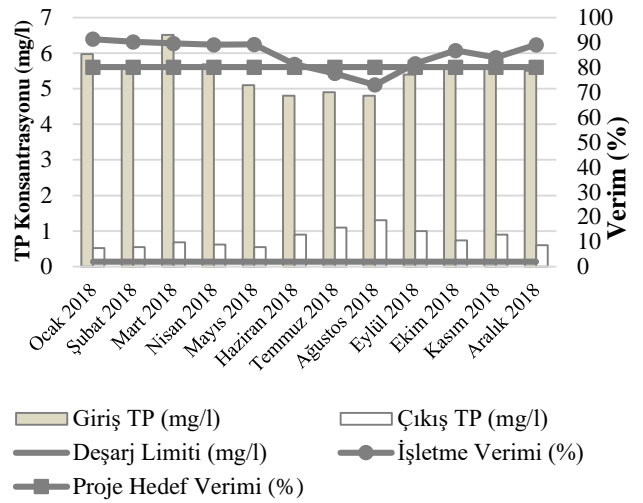
Şekil 5. AAT giriş ve çıkış atıksu TN konsantrasyonları ve TN giderim verimi

TN arıtma veriminin kış aylarında düştüğü gözlemlenmiştir. Düşük sıcaklıklarda denitrifikasyon bakterilerinin çalışma hızları da büyük oranda düşer. Yapılan literatür araştırmalarına göre denitrifikasyon için gereken bekleme süresi suyun sıcaklığına bağlıdır ve denitrifikasyon işleminin süresini artırmaktadır [9]. Özellikle ortalama sıcaklığın 0°C 'nin altına düştüğü Aralık ve Ocak aylarında TN arıtma veriminde düşüş gözlemlenmesinin sebebi iklimsel veriler ile ilişkilendirilebilir. Azot giderim mekanizmasında özellikle soğuk havalarda yüksek çamur yaşı gerekmektedir. Tesiste yüksek çamur yaşı ile çalışılması ise anaerobik havuza nitrat girdisine sebep olarak TP giderim verimini düşürmektedir. Ayrıca giriş kirlilik yükleri hesaplanan 1. kademe kirlilik yüklerinden düşük olduğundan, denitrifikasyon havuzunda denitrifikasyonun gerçekleşmesi için yeterli karbon kaynağının bulunmaması da TN giderim verimini etkilemektedir.

Şekil 6'da verilen grafikte 2018 yılının Ocak-Aralık periyodunda Nahçıvan AAT'nin giriş ve çıkışından alınan 2 saatlik kompozit numunelerin TP konsantrasyonlarının değişimi ve deşarj standardı olarak kabul edilen Avrupa Birliği Kentsel Atıksu Arıtımı Direktifinde belirtilen TP deşarj limiti gösterilmektedir. Buna göre çıkış numunesinin TP konsantrasyonlarının 12 ay süresince yönetmelik deşarj sınırı 2 mg/L'den düşük olduğu görülmektedir. Analiz süresince ortalama giriş TP konsantrasyonu 5.46 mg/L, çıkış

konsantrasyonu 0.79 mg/L'dir. Sonuçların kabul edilen yönetmelikte belirlenen TP deşarj limitlerine uygun olduğu görülmektedir. Toplam giriş TP konsantrasyonlarına bakıldığında, 12 ay süresince tesise gelen ortalama TP konsantrasyonu, tesisin projelendirme hesaplarında 1. kademe TP kirlilik konsantrasyonu olan 10.05 mg/L'ye kıyasla yaklaşık %45 daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Aynı grafikte TP giderim verimindeki değişim ve proje aşamasında hedeflenen verim de gösterilmektedir.

Proje aşamasında 1. kademe için TP giderim verimi hedefi % 80.10 olarak belirlenmiştir. Yıllık ortalama TP arıtma verimi %85.20 olarak bulunmuştur ve proje aşamasında hedeflenen 1. kademe arıtma veriminin üzerinde olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 6. AAT giriş ve çıkış atıksu TP konsantrasyonları ve TP giderim verimi

Grafikte görüldüğü üzere giriş TP konsantrasyonları hesaplanan 1. kademe kirlilik konsantrasyonuna göre düşük olmasına rağmen temmuz ve ağustos aylarında tesis TP arıtımında hedeflenen arıtma verimini sağlayamamıştır. Giriş suyundaki besi maddelerinin düşük konsantrasyonda bulunması, bekleme sürelerinin uzun olduğu havalandırılmalı aktif çamur sistemlerinde içsel çözünüm hızını artırmaktadır. Ortamdaki besin maddelerini tüketen bakteriler birbirlerini tüketmeye başlamakta ve bu şekilde de oksijen tüketimi artmaktadır. Azalan oksijen ve sıcak iklim şartları bakterilerin bünyelerindeki fosforu suya salmalarına sebebiyet vermektedir.

A²O proseslerinde fosfor gideriminin yanı sıra azot giderim mekanizması da eş zamanlı olarak çalışır. Eş zamanlı nitrifikasyon-denitrifikasyon prosesinin azot giderimi %80 ile sınırlı olduğundan azotun tamamı giderilmez. Anaerobik havuza nitrat gelmesi sonucu nitrata bağlı O₂ anaerobik şartları bozar ve sistemin P giderim verimi düşer. Bu duruma önlem olarak A₂O, Bardenpho prosesi gibi eş zamanlı nitrifikasyon-denitrifikasyon ve fosfor giderim mekanizmalarında projelendirme aşamasında anoksik havuz tek olarak teşkil edilmemeli, birden fazla anoksik havuz teşkil edilmelidir. Geri devir edilen çamur anoksik

tanklardan birine verilerek burada çamurdaki nitrattan arındırılarak anaerobik havuza verilmelidir.

3.3. F/M oranı, geri devir oranı, çamur yaşı ve diğer parametreler

Nahçıvan AAT projelendirilirken F/M=0.3, MLVSS=3000 mg/L ve geri devir oranı R=0.7 olarak kabul edilmiştir. MLVSS, F/M, MLSS, çamur yaşı, geri devir oranı hesaplanırken literatürdeki standart metotlar kullanılmıştır. Proje kirlilik yükünün gereğinden yüksek seçilmesi ve nüfus verileri ile mevcut nüfusun yerleşik yaşamaması dolayısıyla tesise düşük debi girişinin olması projelendirme aşamasındaki F/M oranının, MLVSS konsantrasyonunun düşmesine sebep olmuş ve çeşitli işletme sorunları ortaya çıkmıştır. Tesis için MLSS/MLVSS>0.85 olduğundan F/M hesaplarında MLSS kullanılmış olup gerekli F/M oranını sağlamak için geri devir oranı R=0.9 olarak düzenlemeler yapılmıştır. Geri devirin artırılması ile çamur yaşı ayarlaması yapılarak MLSS konsantrasyonu ve F/M oranı istenilen seviyelere ulaşmış olup hem filamentli mikroorganizma sorunu çözülmüş hem de denitrifikasyonun artırılması amaçlanmıştır. Sistemin çamur yaşı proje aşamasında 23 gün olarak belirlenmiş olup, belirlenen çamur yaşı değerinde işletilmektedir. Tesisteki havuzların oksidasyon redüksiyon potansiyeli (ORP) ise anaerobik havuz ORP= -150mV, anoksik havuz ORP= -45mV, aerobik havuz ORP= +80mV olarak belirlenmiştir ve bu değerlere yakın değerlerde tesis işletilmektedir. Tesis giriş atıksuyunun pH değeri 6.5-7 arasında değişmekte olup, tesis çıkışında pH değeri 7-7.5 aralığında olmaktadır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada Nahçıvan AAT'nin 12 aylık işletme verimi analizi yapılarak, proje aşamasında hedeflenen verim ile karşılaştırılması yapılmıştır. Organik madde bazında atıksu karakterizasyonu zayıf atıksu olarak değerlendirilmiştir.

Tesise ulaşan atıksuyun debisi ve kirlilik yükü, projede öngörülen debiden ve kirlilik yükünden yüksek oranda düşüktür. Ortalama BOİ₅, KOİ, AKM, TN ve TP konsantrasyonları değerlendirildiğinde, 1. kademe proje kirlilik konsantrasyonlarına kıyasla BOİ₅ ve KOİ konsantrasyonunun yaklaşık %33, AKM konsantrasyonunun %51, TN konsantrasyonunun %40 ve TP konsantrasyonunun yaklaşık %45 düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ortalama giderim verimlerine bakıldığında BOİ₅, KOİ, AKM, TN giderim verimleri hedeflenen verimleri sağlamakta, TP giderim verimi ise bazı aylarda hedeflenen verimi sağlamamaktadır. Kirlilik yüklerinin yüksek hesaplanması sonucu C:N:P oranı değişmekte ve karbon kaynağı eksikliğinden kaynaklı çeşitli işletme problemleri ve verim kaybı oluşmaktadır. Bunun yanı sıra tesisin yüksek kirlilik konsantrasyonuna göre tasarlanması sonucu denitrifikasyon aşamasında karbon kaynağı yetersiz kalmakta ve ilave karbon kaynağı ek maliyet olarak geri dönmektedir.

Değirmenci vd. [6] tarafından yapılan çalışmada tesis hesaplamaları yapılırken yerinde atıksu analizi yapılmamasının ve gereğinden fazla bırakılan emniyet paylarının tesisin ilk yatırım ve işletme maliyetlerini artırdığı belirtilmiştir. Tesis tasarımı aşamasında yapılan bu hata tesisin boyutlarının ve makine teçhizatının gerekenden daha

büyük kapasitelerde seçilmesine dolayısıyla olumsuz ekonomik sonuçlara sebep olmuştur.

Atıksu arıtma tesisleri projelendirilirken, hesaplamalar mevcut nüfus üzerinden gelecek nüfusun tahmini yapılarak sürdürülmekte ve bu verilere bağlı olarak tasarımın ilk adımı olan kirlilik yükleri, debi hesabı yapılmaktadır. Yatırım maliyeti oldukça yüksek olan bu tesisler hayata geçirilmeden önce, proje bölgesindeki ortama debinin ve kirlilik yükünün varsa mevcut kanalizasyondan ölçülmesi ve proje hesaplarının bu veriler de göz önüne alınarak yapılması gerekmektedir. Ayrıca seçilen prosesin oluşturabileceği işletme sorunları araştırılmalı varsa mevcut uygulamalarda yapılan modifikasyonlar göz önüne alınarak tasarımlar yapılmalıdır. Yerinde ölçümler analiz edilerek proje tasarım verileri ile yüksek bir farklılık durumunda yapım işleri ihalesi yapılmamalıdır. Farklılığın sebebi araştırılarak nüfusa kıyasla rasyonel veriler elde edildikten sonra arıtma tesisi yapımı işleme konulmalı ve mühendisliğin gereklerinden birisi olan ekonomik bir tasarım yapılmalıdır.

Teşekkür

İnceleme ve araştırma yapmak için ihtiyacımız olan bilgi ve verileri bizimle paylaşarak bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde büyük katkı sağlayan Nahçıvan Muxtar Respublikası Dövlət Meliorasiya və Su Təsərrüfatı Komitəsi'ne teşekkür ederiz.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %6

Kaynaklar

- [1] H. Yayli, Çevre etiği bağlamında kalkınma, çevre ve nüfus. Süleyman Demirel Üniversitesi Sos. Bilim. Enstitüsü Dergisi, 15 (1), 151–169, 2012.
- [2] M. Tanyol ve G. Uslu, Tunceli evsel atıksu arıtma tesisinin arıtma etkinliğinin değerlendirilmesi. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 4 (1), 24–29, 2013.
- [3] U.S.E.P.A, Design Manual: Onsite Wastewater Treatment and Disposal Systems. U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), Washington DC, 1980.
- [4] T. D. Reynolds and P. A. Richards, Unit Operations and Processes in Environmental Engineering. PWS Publishing Company, Boston, 1996.
- [5] S. R. Qasim, Wastewater Treatment Plants: Planning, Design, and Operation, Second Edition. CRC Press, Florida, 1998.
- [6] M. Değirmenci, A. Altın, ve S. Altın, Atıksu miktarı ve BOİ₅ kirlilik yükünün, havalandırma havuzu ilk yatırım ve enerji maliyetlerine olan etkilerinin incelenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 2(1), 1-12, İzmir, 2000.
- [7] I. Metcalf & Eddy, G. Tchobanoglous, F. Burton, and H. D. Stensel, Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. McGraw-Hill Education, New York, 2002.
- [8] N. Alpaslan ve D. Dölgen, Atıksu Arıtma Tesislerinin Tasarım Ve Proje Kontrol Esasları. TMMOB Çevre Mühendisleri Odası, İzmir, 2004.

[9] M. Topal ve E. I. Topal, 2010-2011 Kış sezonunda Elazığ belediyesi atıksu arıtma tesisinin bazı parametrelerle değerlendirilmesi. Cumhuriyet Üniver sitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi, 32 (1), 1-12, 2012.

[10] Ş. Tatar ve M. Sağlam, Kızıltepe ileri biyolojik atıksu arıtma tesisinin KOİ, BOİ₅ ve AKM yönünden işletme verimliliğinin değerlendirilmesi. Avrupa Bilim ve Teknol. Dergisi, 20 (1), 265-269, 2020, <http://doi:10.31590/ejosat.770260>.





The effect of supporting electrolyte type and concentration on the phosphate removal from water by electrocoagulation method using iron electrodes

Elektrokoagülasyon yöntemi ile demir elektrotlar kullanılarak sulardan fosfat giderimi üzerine destek elektrolit türü ve konsantrasyonunun etkisi

Şahset İrdemez^{1,*}, Züleyha Bingül², Sinan Kul³, Fatma Ekmekyapar Torun⁴,
Nuhi Demircioğlu⁵

^{1,4,5}Atatürk University, Engineering Faculty, Department of Environmental Engineering, Erzurum, Turkey

²Iğdır University, Engineering Faculty, Department of Environmental Engineering, Iğdır, Turkey

³Bayburt University, Faculty of Applied Sciences, Emergency Aid and Disaster Management, Bayburt, Turkey

Abstract

In this study, the effect of the type and concentration of the supporting electrolyte given to the water to increase the conductivity in the electrocoagulation process on the phosphate removal from synthetically prepared waters was investigated. In addition, experiments were carried out without electrolyte and the results were compared. The effect of support electrolyte type and concentration on phosphate removal efficiency, energy consumption and reaction rate was analyzed. Experiments have shown that electrolyte use has no significant effect on phosphate removal efficiency. However, it has been found that the addition of electrolyte reduces energy consumption and increases the removal rate. From the results obtained, it was determined that NaCl as the most suitable electrolyte type and 5 mM electrolyte was sufficient as the optimum dose. Under these conditions, for 100 mg L⁻¹ PO₄-P at 0.5 mA cm⁻² current density, the phosphate removal efficiency was 96.98%, the energy consumption was 1.13 kWh m⁻³ and the first order reaction rate constant was 0.0593 min⁻¹.

Keywords: Electrocoagulation, Phosphate removal, Supporting electrolyte, Iron electrode

1 Introduction

One of the parameters used in monitoring environmental water resources in industrialized countries is amount of phosphate in the natural waters. One of the main causes of eutrophication, which is one of the environmental problems occurring in aquatic environments, is phosphorus released into the environment without treatment [1]. Eutrophication, which means excessive growth of algae in aquatic environments, is caused by the concentration of nitrogen and phosphorus in wastewater released from various industries to the receiving environment [2-5]. The main source of phosphorus in wastewater is agricultural, industrial and domestic uses [6].

Phosphorus removal techniques include adsorption [7], chemical precipitation [8], ion exchange [9], electrodialysis [10], membrane filtration [11], electrocoagulation [12] and

Özet

Bu çalışmada elektrokoagülasyon prosesi kullanılarak atıksuyun iletkenliğini artırmak için suya verilen destek elektrolitin türü ve konsantrasyonunun sulardan fosfat giderimine etkisi araştırılmıştır. Ayrıca elektrolitsiz deneyler yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Destek elektrolit tipi ve konsantrasyonunun fosfat giderme verimliliği, enerji tüketimi ve reaksiyon hızı üzerindeki etkisi analiz edilmiştir. Deneyler, elektrolit kullanımının fosfat giderme verimliliği üzerinde önemli bir etkisi olmadığını göstermiştir. Ancak elektrolit ilavesinin enerji tüketimini azalttığı ve uzaklaştırma oranını artırdığı bulunmuştur. Elde edilen sonuçlardan en uygun elektrolit türü olarak NaCl ve optimum doz olarak 5 mM elektrolitin yeterli olduğu belirlenmiştir. Bu koşullar altında, 0.5 mA cm⁻² akım yoğunluğunda 100 mg L⁻¹ PO₄-P için fosfat giderme verimi %96.98, enerji tüketimi 1.13 kWh m⁻³ ve birinci dereceden reaksiyon hızı sabiti 0.0593 dk⁻¹ olarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrokoagülasyon, Fosfat giderme, Destek elektrolit, Demir elektrot

biological phosphate removal [13, 14]. The most important process used in the phosphate removal from wastewaters is to convert the soluble phosphate compounds into an insoluble solid phase and separate them from water by solid-liquid separation methods such as precipitation and filtration. The most widely used chemical method in wastewater treatment and phosphate removal is precipitation of phosphate in the form of Al³⁺, Ca²⁺ and Fe³⁺ compounds.

Electrochemical treatment methods and especially electrocoagulation process have begun to be widely used in domestic and industrial wastewaters treatment today. Electrocoagulation is a process in which some soluble metals such as iron and aluminum are used as anodes and this anode material dissolves into water by electric current. The dissolved anode material performs the treatment by forming metal hydroxides that are insoluble in water. The most important difference that distinguishes electrocoagulation

Corresponding author, e-mail: sirdemez@atauni.edu.tr (Ş. İrdemez)

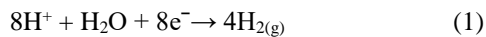
Geliş / Received: 11.08.2021 Kabul / Accepted: 22.10.2021 Yayınlanma / Published: 14.01.2022

doi: 10.28948/ngumuh.981716

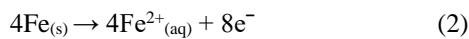
from chemical coagulation is the way the coagulant is given to water [15]. In electrocoagulation, flocs occur not by adding chemicals to the system, but by dissolving aluminum and iron electrodes in the reactor [16]. Electrocoagulation is based on the principle that undissolved suspended solids and emulsions in water are unstable by changing their electrical charges. In this way, the surface charge of the particles is neutralized and colloids come together to form flocs that can collapse [17]. Electrode selection is one of the most important parameters of the electrocoagulation process. Therefore, choosing the right material is very important [18]. The main reason why aluminum and iron are widely used for electrocoagulation is that they are cheap and easily available. They are also preferred because hydroxides of aluminum and iron are poorly soluble in water. In the case of using iron as anode, two different mechanisms occur in the formation of Fe(OH)_n, depending on the environment pH, with the condition that n = 2 or 3 [12].

First mechanism;

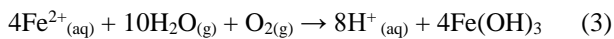
The cathode reactions;



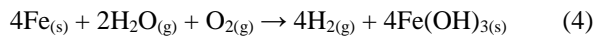
The anode reactions;



In solution;

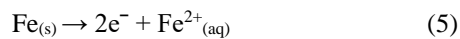


Finally, total reaction can be summarized as;

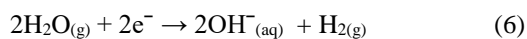


Second mechanism

The cathode reactions



The anode reactions;



Finally, total reaction can be summarized as;



In this study, the effect of the type of supporting electrolyte added to the system in order to increase the conductivity of the wastewater in the electrocoagulation process in the removal of phosphate compounds in high concentrations in wastewater was examined and the most appropriate electrolyte dosage was tried to be determined. In the study, the suitable electrolyte type was examined in terms of both phosphate removal efficiency, energy consumption and reaction rate.

2 Material and method

Phosphate solutions used in the experiments were synthetically prepared from solid KH₂PO₄ with analytical purity. pH adjustments were made using 5M HNO₃ and

NaOH. Electrocoagulation experiments were carried out in the setup shown in Figure 1. The reactor used in the experiments is made of plexiglass material, its volume (100x110x100) is 1100 ml and has a cooling jacket. In the experiments, 850 ml phosphate solution was used. In the experiments, 6 anodes and 6 cathode Fe electrodes of 100x75x3 mm were used. The dimensions of the submerged part of these electrodes are 80x75x3 mm and they are placed at 5 cm intervals.

The experiments were conducted in batch mode. The potential difference applied to the cell and the current flowing through the cell were obtained by using a digitally controlled direct current source (Shenzhen-Mastech HY3005-3) and these parameters were measured with the help of two digital multimeters (Brymen-201). The wastewater in the electrocoagulation reactor was mixed at a constant speed of 150 rpm using a Heidolph MR-3004 brand magnetic stirrer. During the experiments, the temperature, pH and conductivity values of the solution were measured using a WTW Multiline P-4-F-Set-3 multi-parameter device.

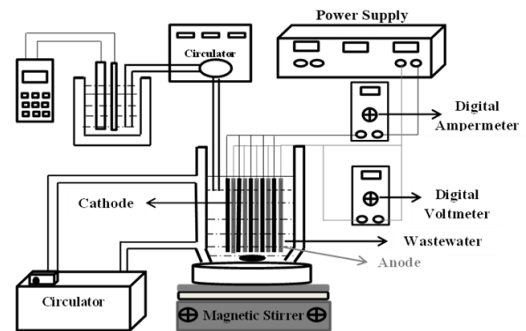


Figure 1. Schematic view of the experimental system used in the study

During the experiments, phosphate analyzes were performed spectrophotometrically (Shimadzu UV 160A) at 400 nm wavelength using ammonium vanadomolybdate reagent.

3 Results and discussion

3.1 The effect of supporting electrolyte type on system variables

Studies examining the effect of supporting electrolyte type on phosphate removal from wastewater by electrocoagulation method, I=0.75 A (CD=0.5 mA cm⁻²), initial pH value of wastewater was chosen as pH_i=3 and supporting electrolyte concentration CSE=5 mM [19].

Na₂SO₄, NaNO₃, NaCl and KCl salts, which are abundant and have high water solubility, were used as support electrolytes and the effects of these electrolytes on phosphate removal efficiency, energy consumption and reaction rate were investigated. The variation of phosphate removal efficiency and energy consumption of the system versus time for different types of supporting electrolytes are given in Figure 2 and Figure 3, respectively.

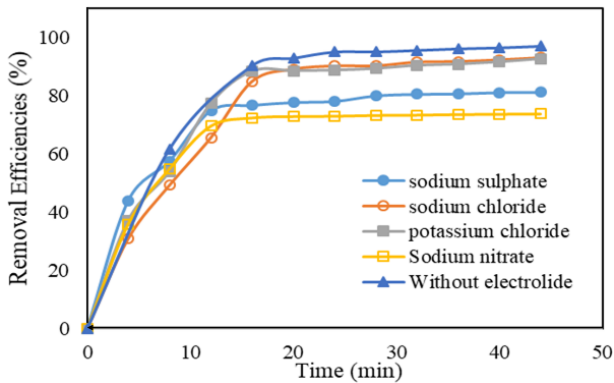
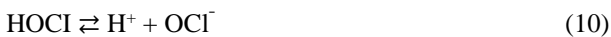


Figure 2. The change of removal efficiencies vs time for PO₄-P ions in different types of supporting electrolyte

When Figure 2 is examined, it is seen that relatively higher removal efficiency is obtained in experiments without using any electrolyte. This is thought to be due to the competition between PO₄³⁻ ions in the environment and Cl⁻, NO₃⁻ and SO₄²⁻ ions added to the water. It has been determined that this decrease in the removal efficiency is less in Cl⁻ ions because of the oxidation of chlorine in water to Cl₂ and other forms. Reactions of chlorine in water are shown Equation (8), (9) and (10) [20]. In studies, NaCl and KCl showed almost the same effect in terms of phosphate removal efficiency. The highest removal efficiencies were obtained with NaCl and KCl, while the lowest removal efficiency was obtained with NaNO₃ [21]. In addition, a decrease in efficiency is observed as a result of forming a complex with Fe³⁺ in the presence of SO₄²⁻ ions and affecting the current efficiency by adhering to the electrode surface [22]. At the end of the reaction period of 20 minutes, the phosphate removal efficiencies of the system for Na₂SO₄, NaNO₃, NaCl and KCl were found to be 78%, 73.2%, 93.03% and 92.58%, respectively.



As can be understood from these equations, the reactions that occur in the presence of Cl⁻ ions in the environment are equilibrium reactions and change according to the pH of the wastewater. At low pHs, the HOCl molecule is dominant, while at high pH, the OCl⁻ molecule is dominant. Since the oxidation power of HOCl is much higher than that of OCl⁻, it is desirable that the pH of the wastewater be low in order for the oxidation to occur in the water to occur faster and more effectively.

As seen in Figure 3, the highest energy consumption occurs when electrolyte is not used. NaCl and KCl showed the same effect in energy consumption as in efficiency. However, the lowest energy consumption was obtained when Na₂SO₄ was used [23]. Because while other electrolytes give water two ions, one positive and one

negative, sodium sulphate gives 3 ions, 2 positive and negative. At the end of the reaction period of 20 minutes, the energy consumptions of the system for without electrolyte, Na₂SO₄, NaNO₃, NaCl and KCl were found to be 0.815, 0.443, 0.624, 0.520 and 0.500 kWh m⁻³, respectively. Electronegativity is a relative concept that varies from compound to compound. Since the electronegativity value of SO₄²⁻ ion is higher than other anions, it increases the conductivity at a higher rate. For this reason, the Na₂SO₄ compound provides a lower energy consumption.

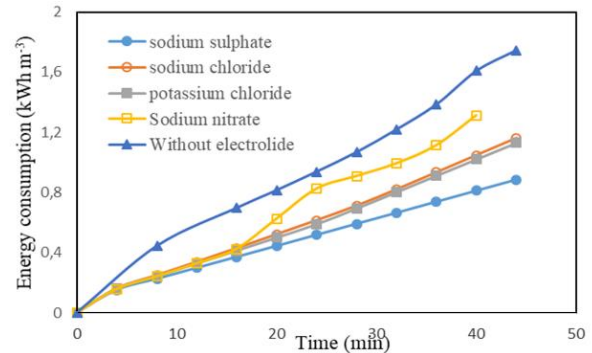


Figure 3. The change of energy consumptions vs time for PO₄-P ions in different types of support electrolyte

Although the most suitable supporting electrolyte in terms of power consumption is sodium sulphate, considering the removal efficiency, it is seen that NaCl and KCl are the most suitable electrolytes. NaNO₃ is not preferred due to both the lowest removal efficiency and the highest energy consumption. The rate constants calculated according to first and second order reaction kinetics for different support electrolyte types are shown in Table 1.

When Table 1 is examined, it is seen that the reaction proceeds according to the 2nd degree when the electrolyte is not used. The highest removal rate was achieved when no electrolyte was used. In both removal degrees, the lowest R² values were obtained in Na₂SO₄ and NaNO₃ electrolytes. In terms of reaction rate, it is seen that the most suitable electrolytes are KCl and NaCl.

3.2 The effect of supporting electrolyte concentration on system variables

While examining the effect of supporting electrolyte concentration on phosphate removal from wastewater by electrocoagulation method, current intensity was chosen as 0.75 A (current density 0.5 mA cm⁻²) and initial pH of 3. The experiments were performed at 2.5 mM, 5 mM, 7.5 mM and 10 mM electrolyte concentrations using NaCl and KCl which gave similar results with other types of support electrolyte. The change of phosphate removal efficiency for different KCl and NaCl concentrations is given in Figure 4, and the change of the energy consumption of the system is given in Figure 5

Table 1. Reaction rate constants for different types of support electrolyte according to first and second order reaction kinetics

Supporting electrolyte type	k_1 (min ⁻¹)	R ²	k_2 (L mg ⁻¹ min ⁻¹)	R ²
Without electrolyte	0.0764	0.8562	0.0073	0.9785
Na ₂ SO ₄	0.0305	0.7071	0.0008	0.8192
NaNO ₃	0.0250	0.5932	0.0005	0.6761
NaCl	0.0619	0.8547	0.0031	0.9468
KCl	0.0557	0.7985	0.0025	0.9234

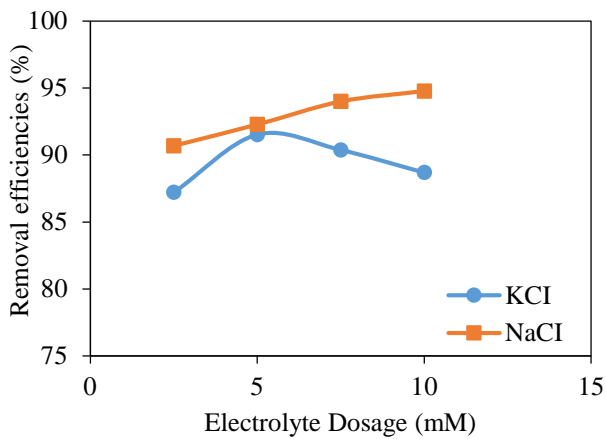


Figure 4. The change of phosphate removal efficiencies vs different supporting electrolyte concentrations

When KCl and NaCl are compared, it can be said that NaCl is a little more suitable in terms of phosphate removal efficiency. As the NaCl concentration increases, the phosphate removal efficiency increases, even if only a small amount. However, this increase is not high enough when the cost of the chemicals used is considered. Therefore, an electrolyte concentration at which both energy and chemical substance consumption will be low must be applied.

Figure 5 show that NaCl reduces energy consumption a little more compared to KCl. The increase in the electrolyte concentration does not affect the efficiency, but significantly reduces the energy consumption. At the end of the 40-minute reaction time, the energy consumption of the system 2.5 mM, 5 mM, 7.5 mM and 10 mM KCl are 1.088, 1.021, 0.8611 and 0.798 kWh m⁻³, respectively. This values for NaCl were determined as 1.052, 0.986, 0.6364 and 0.6117 kWh m⁻³. As the conductivity of the wastewater increases with the addition of electrolyte, its electrical resistance decreases, which causes a decrease in the potential difference applied to the system at constant current density. The reduction of this potential difference means that the energy consumption of the system is reduced.

The rate constants calculated according to the second order reaction kinetics are also given in Table 2. According to the data in Table 2, it is seen that NaCl is a more suitable electrolyte in terms of reaction rate.

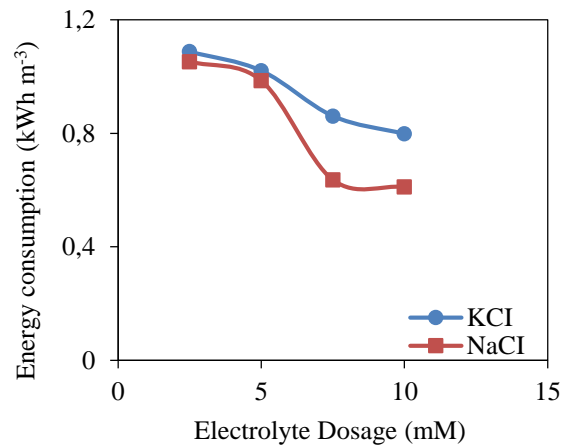


Figure 5. The change of energy consumptions vs different supporting electrolyte concentrations

Table 2. Second order reaction rate constants at different KCl and NaCl concentrations

C _{SE} (mM)	KCl		NaCl	
	k_2 (L mg ⁻¹ min ⁻¹)	R ²	k_2 (L mg ⁻¹ min ⁻¹)	R ²
0	0.002	0.91	0.002	0.91
2.5	0.0018	0.91	0.0032	0.79
5	0.0024	0.88	0.0708	0.76
7.5	0.0014	0.91	0.0791	0.63
10	0.0021	0.93	0.1417	0.90

4 Results

While examining the effect of electrolyte type and concentration in studies of removing phosphate ions by electrocoagulation, Na₂SO₄, NaCl, NaNO₃ and KCl were used as electrolytes. Studies with iron electrodes have shown that the use of electrolyte does not affect the phosphate removal efficiency much. However, since the use of supporting electrolyte increases the conductivity of the wastewater, the energy consumption of the system is greatly reduced. When the electrolyte is not used, while the energy consumption of the system to achieve 90% efficiency is 1.626 kWh m⁻³, when 5 mM NaCl and 5 mM KCl was used, these values are determined as 0.614 and 0.692 kWh m⁻³, respectively.

In studies of removal of phosphate ions from wastewater by electrocoagulation method, it is seen that the most

suitable electrolyte type is NaCl and KCl when both disposal efficiency, energy consumption and reaction rate are taken into consideration. Although Na₂SO₄ is more suitable in terms of energy consumption, it reduces phosphate removal efficiency. NaNO₃, on the other hand, is not considered suitable in terms of both energy consumption and removal efficiency. The optimum electrolyte concentration was determined as 5 mM. Although the use of more electrolyte reduces the energy consumption of the system, it is not considered appropriate in terms of removal efficiency and total cost.

Conflicts of interest

No conflict of interest was declared by the authors.

Similarity rate (iThenticate): %18

References

- [1] M. M. El-Sheekh, H. Y. El-Kassas, N. G. Shams El-Din, D. I. Eissa and B. A. El-Sherbiny, Green synthesis, characterization applications of iron oxide nanoparticles for antialgal and wastewater bioremediation using three brown algae. *International Journal of Phytoremediation*, 1-15, 2021. <https://doi.org/10.1080/15226514.2021.1915957>.
- [2] M.R. Awual, Efficient phosphate removal from water for controlling eutrophication using novel composite adsorbent. *Journal of Cleaner Production*, 228, 1311-1319, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.325>.
- [3] M. Le Moal, C. Gascuel-Oudou, A. Ménesguen, Souchon, Y., Étrillard, C., Levain, A., Moatar, F., Pannard, A., Souchu, P., Lefebvre, A. and Pinay, G. Eutrophication: A new wine in an old bottle? *Science of The Total Environment*, 651(1), 1-11, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.139>.
- [4] O. Axinte, I. S. Badescu, C. Stroe, V. Neacsu, L. Bulgariu, and D. Bulgariu, Evolution of trophic parameters from amara lake. *Environ. Eng. Manag. J.*, 14, 559-565, 2015.
- [5] J. H. Andersen, L. Schlüter and G. Ertebjerg, Coastal eutrophication: recent developments in definitions and implications for monitoring strategies. *Journal of Plankton Research*, 28(7), 621-628, 2006. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbl001>.
- [6] W. Huang, S. Wang, Z. Zhu, L. Li, X. Yao, V. Rudolph, and F. Haghseresht, Phosphate removal from wastewater using red mud. *Journal of Hazardous Materials*, 158(1), 35-42, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.01.061>.
- [7] K. S. Hashim, H. M. Ewadh, A. A. Muhsin, S. L. Zubaidi, P. Kot, M. Muradov, M. Aljefery and R. Al-Khaddar, Phosphate removal from water using bottom ash: adsorption performance, coexisting anions and modelling studies. *Water Sci. Technol.*, 83(1), 77-89, 2021. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.561>.
- [8] H. Huang, J. Liu, P. Zhang, D. Zhang and F. Gao, Investigation on the simultaneous removal of fluoride, ammonia nitrogen and phosphate from semiconductor wastewater using chemical precipitation. *Chemical Engineering Journal*, 307, 696-706, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.08.134>.
- [9] T. E. Bektaş, B. K. Ugurluoğlu and B. Tan, Phosphate removal by Ion exchange in batch mode. *Water Practice and Technology*, wpt2021072, 2021. <https://doi.org/10.2166/wpt.2021.072>.
- [10] Y. Zhang, E. Desmidt, A. Van Looveren, L. Pinoy, B. Meesschaert and B. Van der Bruggen, Phosphate Separation and Recovery from Wastewater by Novel Electrodialysis”, *Environmental Science and Technology*, 47(11):5888-5895, 2013. <https://doi.org/10.1021/es4004476>.
- [11] Y. Yang, J. Lohwacharin and S. Takizawa, Hybrid ferrihydrite-MF/UF membrane filtration for the simultaneous removal of dissolved organic matter and phosphate. *Water Research*, 65, 177-185, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.07.030>.
- [12] Ş. İrdemez, N. Demircioğlu, Y. Ş. Yildiz and Z. Bingül, The effects of current density and phosphate concentration on phosphate removal from wastewater by electrocoagulation using aluminum and iron plate electrodes. *Separation and Purification Technology*, 52(2), 218-223, 2006a. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2006.04.008>.
- [13] M. Muduli, V. Sonpal, K. Trivedi, S. Haldar, M.A. Kumar and S. Ray, 12 - Enhanced biological phosphate removal process for wastewater treatment: a sustainable approach. *Wastewater Treatment Reactors*, 273-287, 2021. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823991-9.00012-5>.
- [14] F. J. Rubio-Rincón, C. M. Lopez-Vazquez, L. Welles, M. C. M. Van Loosdrecht and D. Brdjanovic, Cooperation between Candidatus Competibacter and Candidatus Accumulibacter clade I, in denitrification and phosphate removal processes. *Water Research*, 120, 156-164, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.05.001>.
- [15] C. Barrera-Díaz, B. Bilyeu, G. Roa and L. Bernal-Martinez, Physicochemical Aspects of Electrocoagulation. *Separation and Purification Reviews*, 40(1), 1-24, 2011. <https://doi.org/10.1080/15422119.2011.542737>.
- [16] Z. Bingül, Ş. İrdemez, N. Demircioğlu, Effect of controlled and uncontrolled pH on tannery wastewater treatment by the electrocoagulation process. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2021. <https://doi.org/10.1080/03067319.2021.1925261>.
- [17] I. Kabdaşlı, I. Arslan-Alaton, T. Ölmez-Hancı and O. Tünay, Electrocoagulation applications for industrial wastewaters: a critical review. *Environmental Technology Reviews*, 1(1), 2-45, 2012. <https://doi.org/10.1080/21622515.2012.715390>.
- [18] M. Kobya, M. Bayramoglu and M. Eyvaz, Techno-economical evaluation of electrocoagulation for the

- textile wastewater using different electrode connections. *Journal of Hazardous Materials*, 148(1–2), 311-318, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.02.036>.
- [19] Ş. İrdemez, N. Demircioğlu and Y. Ş. Yıldız, The effects of pH on phosphate removal from wastewater by electrocoagulation with iron plate electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 137(2), 1231-1235, 2006b. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.04.019>
- [20] Y. Ş. Yıldız, A. S. Kopalal and B. Keskinler, Effect of initial pH and supporting electrolyte on the treatment of water containing high concentration of humic substances by electrocoagulation. *Chemical Engineering Journal*, 138(1–3), 63-72, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.05.029>.
- [21] C. J. Izquierdo, P. Canizares, M. A. Rodrigo, J. P. Leclerc, G. Valentin and F. Lapique, Effect of the nature of the supporting electrolyte on the treatment of soluble oils by electrocoagulation. *Desalination*, 255(1–3), 15-20, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.01.022>.
- [22] R. Keyikoglu, O. T. Can, A. Aygun and A. Tek, Comparison of the effects of various supporting electrolytes on the treatment of a dye solution by electrocoagulation process. *Colloid and Interface Science Communications*, 33, 100210, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.colcom.2019.100210>.
- [23] A. C. Ndjongoue-Yossa, C. P. Nanseu-Njiki, I. M. Kengne and E. Ngameni, Effect of electrode material and supporting electrolyte on the treatment of water containing *Escherichia coli* by electrocoagulation. *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 12, 2103–2110, 2015.





Sucul ortamdan amoksisilin gideriminde hibrit adsorpsiyon/oksidasyon performansının değerlendirilmesi

Removal of amoxicillin in aqueous media by hybrid adsorption/oxidation

Dilşad Öztürk^{1,*} , Hamdi Mihçioğur² 

^{1,2} Erciyes Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 38280, Kayseri Türkiye

Özet

Avrupa ve Türkiye genelinde en çok tüketilen penisilin grubu antibiyotik ilaç etken maddesi, Amoksisilin (AMX) dir. Lipofilik yapısı ve biyobozunurluğunun çok düşük olması sebebiyle AMX konvansiyonel atıksu arıtma tesislerinde arıtlamadan alıcı ortama verilmektedir. Alıcı ortamlarda mikro ve nano konsantrasyonlarda tespit edilmektedir. Ancak kullanım miktarlarına paralel olarak çevresel ortamlardaki varlıklarının artacağı düşünülmektedir. Küresel antibiyotik direnci en yüksek 6. ülke olan Türkiye için, doğal su kaynaklarının antibiyotik türü etken madde kirliliğine karşın kaynaktan engellenmesi oldukça önemlidir. Bu çalışmada, AMX'in, sentezlenen yeni bir adsorban (Fe_3O_4 &Tween-85@PEI) ve kuvvetli bir oksidant hipokloröz asit (HOCl), ile sucul ortamdan giderilmesi amaçlanmıştır. AMX adsorpsiyon ile oda sıcaklığında 30 dakikada pH: 2'de %25 giderilirken, HOCl ile 50 °C'de 0.025 mM konsantrasyonda, aynı pH'da %80 oranında giderilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, adsorpsiyon prosesi fiziksel, oksidasyon işlemi ise kimyasaldır. Adsorpsiyon ve oksidasyon prosesleri sırasıyla Freundlich izotermine ve ikinci derece kinetiğe uyum göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Amoksisilin, Adsorpsiyon, Oksidasyon

1 Giriş

Son yıllarda yapılan bilimsel çalışmalar, ilaç endüstrisine bağlı ilaç tüketimi artışının, özellikle sucul ortamlarda, küresel ölçekte yeni toksik kirletici sorununu ortaya çıkarmaktadır [1-4].

Mikroorganizmaları öldüren ya da yaşamsal faaliyetlerini engelleyen antibiyotikler, özellikle gelişmekte olan ülkelerde yanlış ya da aşırı kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar, 3000'den fazla farmasötik bileşiğin, doğal su kaynaklarında ng/L ve µg/L konsantrasyonlarda bulunduğunu göstermektedir [5]. Ayrıca yüzeysel sular ve yeraltı su kaynaklarından elde edilen içme sularının, en az 21 antibiyotik türü içerdiği belirtilmektedir [6, 7]. Ana kaynakları evler, hastaneler, sağlık ocakları, ilaç üreticileri olan antibiyotiklerin bilinçsiz kullanımının çevreye ve canlılara olan en büyük olumsuz etkisi, dirençli bakteri mutantlarının oluşmasına neden olması ve antibiyotiklerin hastalık yapıcı bakterileri yok etme etkisinin giderek azalmasıdır. Günümüzde ilaç etken maddesi türü mikro

Abstract

The most consumed penicillin group, an antibiotic active ingredient in Europe and Turkey, is Amoxicillin (AMX). Due to its lipophilic structure and low biodegradability, it is discharged into the receiving environment from conventional wastewater treatment plants without treatment. It is detected at the micro and nano concentration in receiving environments. But it is thought that their presence will increase in environment parallel to their increasing use. It is essential to prevent the contamination of natural water resources with antibiotic drug active ingredients for Turkey, a country with the 6th highest global antibiotic resistance. In this study, it was aimed to remove AMX from the aquatic media with the synthesized a new adsorbent (Fe_3O_4 &Tween-85@PEI and HOCl) and a strong oxidant hypochlorous acid (HOCl). While AMX was removed 25% by adsorption at room temperature in 30 minutes at pH: 2, was degraded 80% by HOCl at the same pH and 50°C with 0.025 mM concentration. According to obtained results, the adsorption process is physical, and the advanced oxidation is chemical. The adsorption and the oxidation processes were fitted to the Freundlich isotherm and the pseudo-second order kinetic respectively.).

Keywords: Amoxicillin, Adsorption, Oxidation

kirleticilerin, çevre matrislerindeki akıbeti hakkında sınırlı veri vardır ve dünya çapında güncel araştırma konuları arasındadır [8]. Dünya Sağlık Örgütü (WHO) 2020 yılı verilerine göre, antibiyotiğe dayanıklı enfeksiyonlar yüzünden 2050 yılına kadar on milyondan fazla kişinin ölebileceği öngörülmüştür [9]. Bu korkutucu tablo nedeniyle, bu yıl itibariyle Küresel Antibiyotik Direnci Ortaklığı (CDDEP), antibiyotik direnci en yüksek ülkeler (Hindistan, Kenya, Güney Afrika ve Vietnam) için politika önerileri ve eylem planı geliştirmeye başlamıştır. Bu kapsamda, her 1000 kişi için yapılan 'İlaça Dayanıklılık Testi' çalışmasında 24.3 doz/gün olan Vietnam'ı Türkiye 19.7 doz/gün ile takip etmiştir.

Amoksisilin (AMX), penisilin grubuna ait β-laktam antibiyotikleri içerisinde en sık kullanılan ilaç etken maddedir [10]. Bu ilaç etken maddeler, gram pozitif bakterileri etkilemenin ötesinde, gram negatif basillere karşı anti-bakteriyel enfeksiyon tedavisinde sıklıkla kullanılır [11]. AMX metabolizmaya girdikten sonra yaklaşık %10-20 arasında

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: dilsadapaydin@erciyes.edu.tr (D. Öztürk)
Geliş / Received: 16.08.2021 Kabul / Accepted: 06.12.2021 Yayınlanma / Published: 14.01.2022
doi: 10.28942/ngumuh.983307

kimyasal olarak değişime uğrar (metabolize olur) ve idrar ya da dışkı yoluyla kanalizasyona karışır [10]. Kanalizasyona karışan AMX, konvansiyonel atıksu arıtma tesislerinde çok az miktarda (%0.09) biyolojik bozunmaya uğrayarak alıcı ortamlara deşarj edilir [12].

AMX etken maddesi, çevresel risk değerlendirmesi açısından oldukça riskli etken madde grubuna girmektedir. Yapılan risk değerlendirmesi çalışmalarında PEC/PNEC (Öngörülen Çevresel Konsantrasyon/Öngörülen Etkisiz Konsantrasyon) oranı dikkate alınarak etken maddelerin riskleri belirlenmiştir. AMX'in PEC/PNEC oranı birçok çalışmada oldukça yüksektir (PEC/PNEC= 588.2>>10) [13-15].

Atıksu arıtma tesislerinde biyolojik olarak parçalanabilirliği oldukça düşük olan AMX, biyolojik arıtmaya uygun olmadığı için, konvansiyonel biyolojik arıtma tesislerinde neredeyse hiç arıtılmadan alıcı ortama deşarj edilmektedir. Bu nedenle AMX'in, çevresel etkilerini azaltmak için, yüzeysel sulara karışmadan su matrisinden uzaklaştırılması gerekmektedir.

Günümüzde nanofiltrasyon [16, 17], ters osmoz [18], oksidasyon işlemleri [19], fotokatalitik bozunma [20-22] ozonlama [23] ve adsorpsiyon [24, 25] bu mikrokirleticileri gidermek amacıyla kullanılan uygun arıtma yöntemleri arasındadır. Sucul ortamda çözünen antibiyotikler, yüksek kimyasal kararlılık, düşük biyolojik bozunma ve sorpsiyon özelliklerine sahiptir. Klasik içme suyu ve atık su arıtım yöntemlerine dirençli bu tür kirleticilerin giderim yöntemleri hem ekonomik hem de ikincil kirletici üretmeyen kolay uygulanabilir sistemler olmalıdır. Negatif yüklü kirleticilerin nispeten daha düşük basınçta nanofiltrasyonla giderimi verimli ise de nötr kirleticiler bu giderim yöntemi ile yüksek verimde giderilememektedir. Aynı zamanda karboksil grubu içeren kirleticilerin adsorpsiyon ile giderim verimleri düşüktür. Bu nedenle yüzey iyileştirilmesi yapılmış yeni adsorbanlara ve ikincil kirletici üretmeyen etkin oksidantlara ihtiyaç vardır [26]. Bu çalışmada adsorban malzeme olarak ilk defa sentezlenmiş Fe₃O₄&Tween-85@PEI ve HOCl oksidantının, sucul ortamdan AMX uzaklaştırılmasındaki etkinliği incelenmiştir. Bu nedenle adsorban karakterizasyonu, adsorpsiyonu ve oksidasyonu etkileyen fiziksel ve kimyasal parametreler değerlendirilmiştir.

2 Materyal ve metod

2.1 Kimyasallar ve cihazlar

Penisilin grubu antibiyotik AMX, %99 saflıkta Sigma Aldrich'den temin edilmiştir. Fe₃O₄&Tween-85@PEI adsorban üretimi için FeCl₃, NH₄Fe(SO₄), NH₃, Tween®85 (Polyoxyethylene Sorbitan Tripolide (C₁₄H₁₃NO₆S₂), Polyetenimin (PEI) (Merck), Gluteraldehit (Gündüz Kimya), Etanoik asit kullanılmıştır (Carlo Erba). Oksidasyon için ise analitik saflıkta kuvvetli oksidant (HOCl) kullanılmıştır. NaOH ve HCl (Merck) kimyasalları pH ayarlamak amacıyla kullanılmıştır. Tüm çözeltiler deiyonize su (Elga Purelab LabWater) ile hazırlanmıştır. Tüm tartımlar Precisa XB 220A SCS (İsviçre) marka terazi ile yapılmıştır. pH ölçümleri için Hach HQ40D (USA) marka pH metre kullanılmıştır. Karıştırma ve ısıtma işlemi Heidolph Unimax 1010 ve Heidolph inkübatör 1000 (USA) marka cihazları ile yapılmıştır.

Etken maddenin ölçümü Hach Lange DR 5000 model spektrofotometre cihazı ile 277 nm'de gerçekleştirilmiştir.

Ölçüm metodu, artan etken madde konsantrasyonuna göre absorbansın ölçülmesi ve kalibrasyon eğrisinin elde edilmesine dayanmaktadır [12, 27]. Adsorban karakterizasyonu emisyon tarama mikroskopu (FESEM, JSM-IT300LA) ve yüzey morfolojisi cihazları (ABD Nicolet Is50) ile, sıfır noktası yükünün belirlenmesi ise (pHZPC) pH kayması yöntemi ile yapılmıştır.

2.2 Adsorban sentezi

Üretim iki aşamalı deneysel prosedürleri içermektedir.

2.2.1 Manyetik özellikli demiroksit (Fe₃O₄) nanopartikül sentezi

Demir oksit sentezi için kuvvetli indirgeyici özellikteki NH₃ reaktifi kullanılmıştır. Sentez aşamasında kullanılan yöntemin esası, ferrimanyetik adsorban sentezi kapsamındaki kimyasal indirgenme prosedürünü içermektedir [28]. Sentezin bu aşamasında 0,2 M FeCl₃ ve 0,1 M NH₄Fe(SO₄), %25 NH₃ ve 10 ml Tween®85 kullanılmış, Öztürk ve Mihçioğur'un belirttiği gibi sentezlenmiştir [29].

2.2.2 Fe₃O₄&Tween-85@PEI modifikasyonu

Modifikasyon işleminden önce ağırlıkça %1 Fe₃O₄ ve %9 PEI karışımı 24 saat boyunca oda sıcaklığında gün ışında bekletilmiştir. İlk aşamada yüzey aktivasyonunu gerçekleştirmek için PEI/Fe₃O₄ karışımı %50'lik 20 ml Gluteraldehit (GA) çözeltilisine ağırlıkça %5 etanoik asit (asetik asit) eklenmiştir. Daha sonra çözelti ultrasonik banyoda 15 dakika 60 °C sıcaklıkta muamele edilmiştir. Ultrasonik banyodan çıkartılan çözelti oda sıcaklığında 4 saat boyunca 300 rpm karıştırma hızında ısıtıcı karıştırıcıda karıştırılmıştır.

Modifiye edilen malzemenin yüzeyinden fazla GA ve etanoik asiti yıkamak amacıyla 3 defa 300 ml deiyonize su ile yıkadıktan sonra, üzerindeki supernatant, mikropipetle çekilmiş ve bir gün boyunca 50 °C sıcaklıkta vakumlu etüvde kurutulmuştur [29].

2.3 Adsorpsiyon ve oksidasyon deneysel çalışması

Kesikli çalışılan sistemde öncelikle adsorpsiyon ardından oksidasyon prosedürü uygulanmıştır. Adsorbant olarak Amoksisilin, adsorbent olarak Fe₃O₄&Tween-85@PEI, oksidant olarak ise HOCl kullanılmıştır.

2.4 Adsorpsiyon prosesi

Adsorpsiyon çalışmalarının tümünde aynı deney protokolü (kesikli işletim) kullanılmıştır. Son hacim 50 ml olacak şekilde 10 mg/L'lik AMX çözeltilerine, 0.050 g adsorban eklenmiştir. Karışım 120 dakika 250 rpm sabit hızda oda sıcaklığında karıştırılmıştır. 0.45 µm gözenek çaplı PVDF filtreden geçirildikten sonra UV-VIS spektrofotometresi ile analiz yapılmıştır. Denklem (1) ve (2) kullanılarak t anındaki ve denge halindeki adsorpsiyon kapasiteleri hesaplanmıştır (qt ve qe (mg/g)) dengedeki adsorpsiyon kapasitesini, Co, Ce ve Ct ise sırasıyla başlangıçtaki, dengedeki ve t zamandaki AMX derişimi (mg/L), V çözelti hacmini (L) gösterir.).

$$qt = \frac{(Co - Ct)V}{m} \quad (1)$$

$$qe = \frac{(Co - Ce)V}{m} \quad (2)$$

2.4.1 Adsorpsiyon prosesini etkileyen parametreler

pH, başlangıç kirletici konsantrasyonu, adsorban konsantrasyonu, zaman ve sıcaklık adsorpsiyon kapasitesini etkileyen fiziksel parametrelerdir. Bu etkiler analiz edilirken pH 2/3/5 şartlarında 10 mg/L kirletici konsantrasyonda 0.050 g adsorban ile (2 saat, oda sıcaklığı) çalışılmıştır.

2.4.2 İzoterm ve kinetik modeller

Çalışmada adsorpsiyon prosesinin analizi için sucul ortamda AMX ilaç etken maddenin adsorban üzerindeki tutulumunu ifade eden Tablo 1'de verilen Langmuir, Freundlich ve Temkin izotermi oksidasyon proses analizi için Şekil 5'te verilen yalancı birinci ve ikinci derece kinetik modelleri kullanılmıştır

Tablo 1. Çalışmada kullanılan izotermi

Model	Adsorpsiyon Yüzeyi	Eşitlik
Langmuir	Homojen	$\frac{Ce}{qe} = \frac{1}{qm} * Ce + \frac{1}{qm} * \frac{1}{KL}$
Freundlich	Heterojen	$\log \frac{X}{M} = \log Kf + \frac{1}{n} * \log Ce$
Temkin	Homojen	$qe = BT * \ln KT + BT * \ln Ce$

K_L: Langmuir sabiti, q_m: Maksimum adsorpsiyon kapasitesi (mg/g), K_f: Freundlich sabiti, n: adsorpsiyon kapasitesi yoğunluğu, K_T: Temkin sabiti, B_T, B_T: RT/K_T, R: Evrensel gaz sabiti, T: Sıcaklık

2.4.3 İstatistiksel analiz

Adsorpsiyon izotermi grafikleri çizilip regresyon analizi yapıldıktan sonra (R² değeri, açıklanabilen varyasyonun (SSR) toplam varyasyona (SST) oranı olarak tanımlanır (R² = SSR/SST)). Bu çalışmada istatistiksel açıdan 4 parametre ile validasyonu yapılmıştır. Bu parametreler Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Kullanılan istatistiksel veri analiz yöntemleri

İstatistiksel Analiz	Hata Temsili	Eşitlik
ARE	Yaklaşıklık	$\sum_{i=1}^n \left(\frac{(qe,exp - qe,cal)}{1} \right)^{1/2} * 20$
RMSE	Ortalama Kare	$\sum_{i=1}^n \left(\frac{(qe,exp - qe,cal)}{N} \right)^{1/2}$
NSD	Normalize Ortalama Karekök	$\sum_{i=1}^n \left(\frac{(qe,exp - qe,cal)}{N} \right)^{1/2} * 100$
ND	Normalize Sapmalar	$\sum_{i=1}^n \left(\frac{(qe,exp - qe,cal)}{1} \right)^{20}$

ARE: Ortalama görel hata, RMSE: Kök ortalama kare hata, NSD: Normalize standart sapma, ND: Normalize Sapma

Oksidasyon çalışmalarının tümünde aynı deney protokolü (kesikli işletim) kullanılmıştır. 50 ml AMX

çözültülerine 0.025 mM ve 0.05 mM HOCl eklenmiştir. Karışım 120 dakika 250 rpm sabit hızda 25 °C ve 55 °C'de karıştırılmıştır. AMX giderim verimi Denklem (3) kullanılarak hesaplanmıştır.

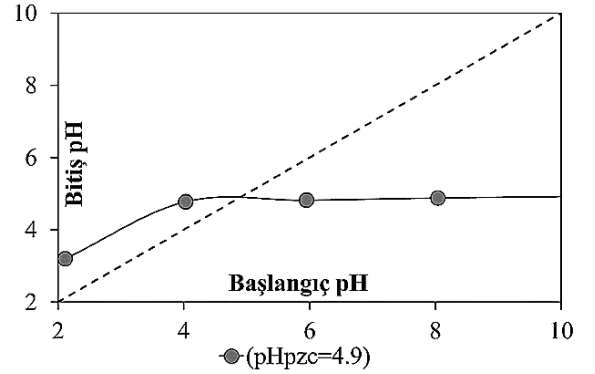
$$\%R = \frac{(Co - Ct) * 100}{Co} \quad (3)$$

(Co ve Ct başlangıçtaki ve t zamandaki AMX derişimini (mg/L) gösterir.)

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Materyal karakterizasyonu

Modifiye edilmiş adsorban ile maksimum adsorpsiyonun hangi pH'da meydana geldiğini belirlemek amacıyla, sıfır şarj noktası analizi yapılmıştır. Şekil 1'de adsorban yüzeyinin pH ≈ 4.9 civarında yüksüz, pH < 4.9 da pozitif yüklü, pH > 4.9 da ise negatif yüklü olduğunu göstermektedir.



Şekil 1. Adsorban sıfır yük noktası ([NaCl]= 10*10⁻² M, T:25 °C)

3.2 Fizikokimyasal parametrelerin AMX adsorpsiyonuna etkisi

Adsorbanın etkinliğini etkileyen unsurlar içerisinde kirleticinin moleküler konfigürasyonu ve boyutu, ortam pH ve sıcaklığı, temas süresi, kirletici konsantrasyonu ve adsorban miktarı yer almaktadır [30]. Deneysel verilerin değerlendirilmesi ve yorumlanmasına ilişkin ayrıntılı yaklaşım aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

3.2.1 pH ve karıştırma hızı

AMX'in molekül yükü, yapısındaki farklı fonksiyonel grupların varlığı nedeniyle pH'a bağlı olarak değişebilmektedir [31]. Bunun nedeni AMX organik maddesinin halkalı yapılarındaki π-π elektron etkileşimleri olabilmektedir [32]. AMX molekülünün barındırdığı fonksiyonel gruplar; -COOH (pKa1=2.68), -NH₂(pKa2=7.49) ve fenolik hidroksil gruplardır (pKa3=9.63) [33]. Karboksil grubu asidik ortamda karboksilat (-COO⁻¹), amin grubu ise -NH₃⁺ formunda olduğundan [34] en yüksek adsorpsiyon kapasitesine (%25) pH 2 düzeyinde, kirletici molekül ile adsorban arasında temas oranının artışı sağlayan 250 rpm karıştırma hızında ulaşılmıştır. Oksitetrasiklin gideriminde çok yüksek giderim

verimine (%98) sahip olan yenilikçi adsorbanın [29], AMX adsorpsiyonunda hidrojen iyonu konsantrasyonunun etki görseli Şekil 2'de verilmiştir. Temas süresi etkisi 0 ile 120 dakika arasında incelenmiş ve optimum giderim verimi 30. dakikada gerçekleşmiştir.

3.2.2 Sıcaklık

Dört farklı sıcaklıklarda incelenen adsorpsiyon kapasitesi (25, 30, 35 ve 40 °C) sıcaklık 40 °C'ye çıktığında 35.47 mg/g'dan 7.9'a düştüğü görülmüştür (Bk. Şekil 2). Elde edilen sonuca göre adsorpsiyon ekzotermiktir ve sıcaklık arttıkça AMX adsorpsiyon kapasitesi azalmaktadır.

3.2.3 İzotermeler ve istatistiksel validasyon

AMX'in adsorpsiyon denge analizinde lineer Langmuir, Freundlich ve Temkin modelleri kullanılmıştır. İzoterm modellerinden elde edilen parametreler Tablo 3'te verilmiştir. Freundlich izotermi ile 25 °C sıcaklık için en yüksek korelasyon katsayısı ve en yüksek denge konsantrasyon elde edilmiştir (Kf: 0.2603, n: 1.1253).

Tablo 3. Adsorban ile AMX izoterm modelleri ve istatistiksel analiz sonuçları

	qe	Hesap qe	R ²	ARE	RMSE	NSD	ND
Langmuir	2.09	-1.35					
	2.36	-2.99					
	3.63	-4.42	0.002	87.787	10.140	196.298	194.578
	6.16	-5.63					
	9.77	-6.65					
Freundlich	2.09	11.44					
	2.36	23.33					
	3.63	33.35	0.998	293.328	28.890	655.903	625.838
	6.16	41.63					
	9.77	48.54					
Temkin	2.09	16.29					
	2.36	19.49					
	3.63	21.09	0.647	228.606	15.639	511.180	455.908
	6.16	22.09					
	9.77	22.78					

Uygulanan izoterm modelleri, adsorpsiyonun heterojen bir yüzey üzerinde çok tabakalı şekilde gerçekleştiğine işaret etmektedir.

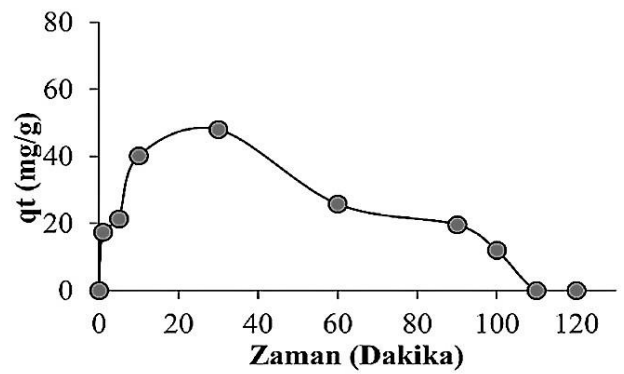
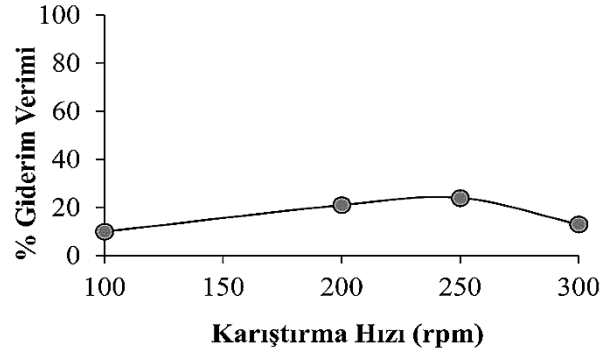
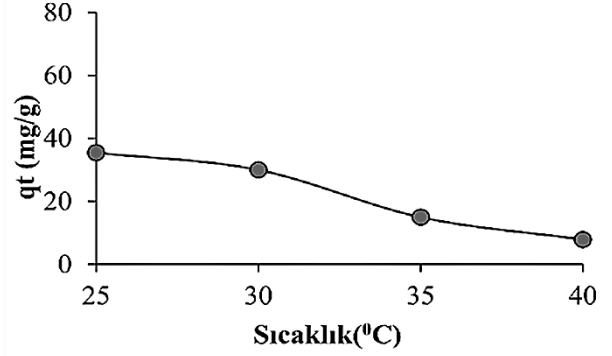
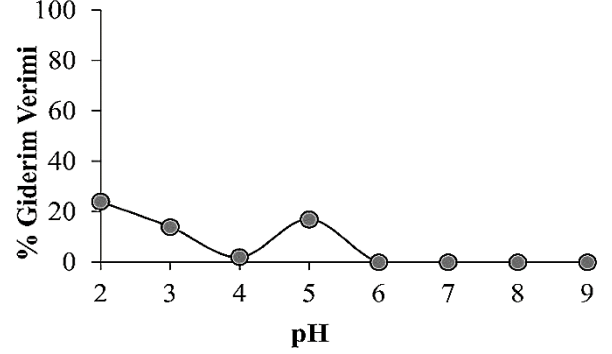
3.3 Fizikokimyasal parametrelerin oksidasyona etkisi

Oksidasyon çalışmalarında ortam pH'ı, sıcaklık ve oksidant konsantrasyonunun AMX ilaç etken maddesinin sucul ortamdan giderimi etkisi incelenmiştir.

3.3.1 pH

Şekil 3'te AMX'in farklı pH larda oksidasyon ile giderim verimleri verilmiştir. Deneysel çalışmalarla elde edilen verilere göre, ilaç etken maddenin oksidasyonla gideriminde 0.025 ve 0.05 mM HOCl oksidant derişiminin her ikisi için de 50 °C'de optimum pH'ın 2 olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni HOCl nin pH 2-6.5 aralığında Cl₂, pH 7 civarında HOCl ve OCl⁻, pH 7 üzeri ise, OCl⁻ formunda

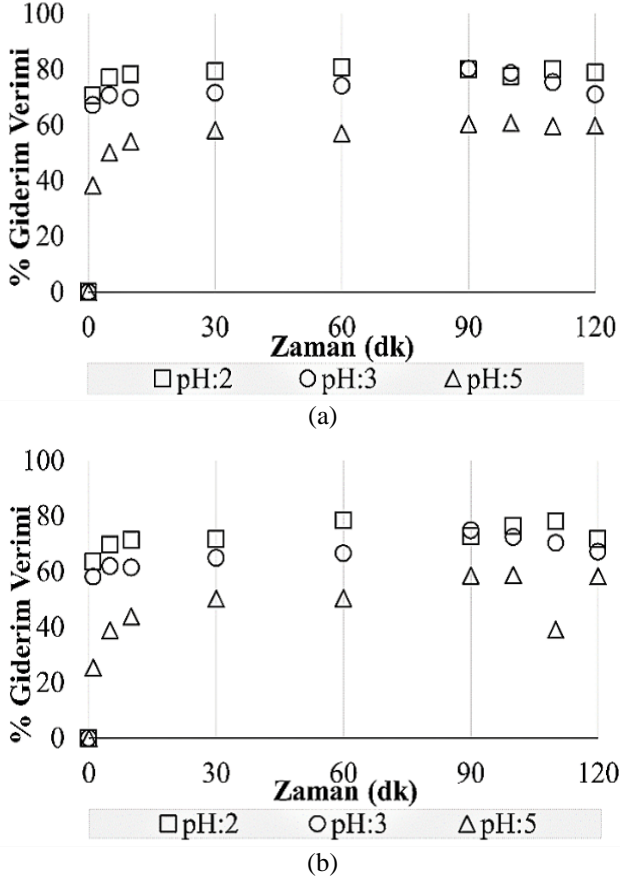
olmasıdır. Ayrıca pH ve sıcaklığa bağlı olarak iyonlaşan HOCl'nin, pH 3'ün altında serbest klor reaktivitesinin yüksek olmasıdır [35]. Ayrıca temas süresi etkisi 0 ile 120 dakika arasında incelenmiş, optimum giderim verimi 60. dakikada gerçekleşmiştir.



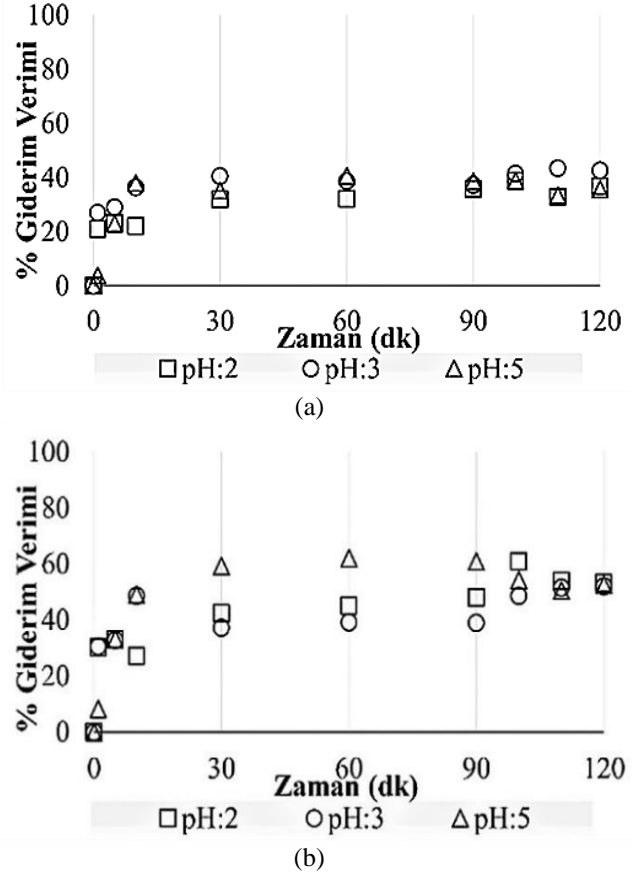
Şekil 2. pH, sıcaklık, karıştırma hızı ve adsorpsiyon kapasitesi (Co= 10 mg/L⁻¹, t= 30 dak., T= 25 °C)

3.3.2 Sıcaklık ve HOCl konsantrasyonu

Oksidasyonla giderim kapasitesi (25 ve 50 °C) Şekil 3 ve 4'te görüldüğü gibi 0.025 mM HOCl'de %39'dan %79.5'e; 0.05 mM HOCl'de %40'tan %81'e yükselmiştir. AMX giderim veriminde derişimin kritik etkisi olmadığı görülmüştür.

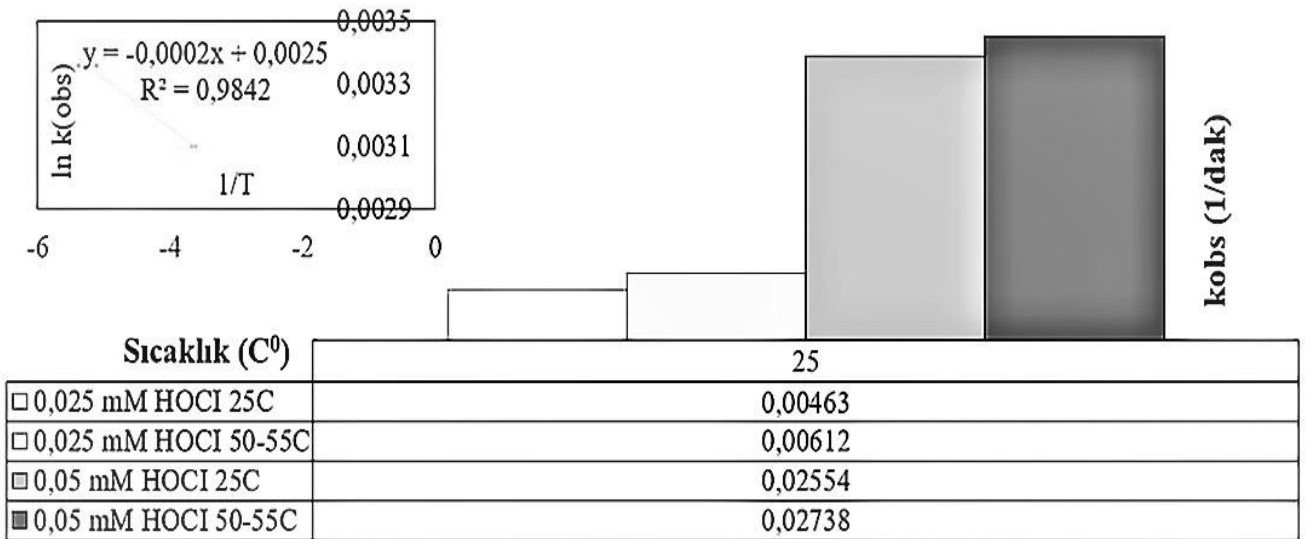


Şekil 3. Oksidasyon pH etkisi (Co= 10 mg, HOCl= 0.025 mM (a), 0.05mM (b) t= 120 dak, V= 250 rpm, T= 50 °C)



Şekil 4. Oksidasyon pH etkisi (Co= 10 mg, HOCl= 0.025 mM (a), 0.05mM (b) t=120 dak, V=250 rpm, T=25°C)

Şekil 5'te sıcaklığın oksidasyon hız sabitine olan etkisi gösterilmiştir. AMX'in HOCl ile oksidasyon prosesiyle giderimi, en iyi Pseudo first order kinetik modeli ile tanımlandığı belirlenmiştir ($R^2=0.984$).



Şekil 5. AMX oksidasyon Pseudo-first-order kinetik model

4 Sonuçlar

Bu çalışmada yeni sentezlenmiş adsorbent Fe₃O₄&Tween-85@PEI ve kuvvetli oksidant HOCl'in sucul ortamda AMX giderimindeki verimleri ve bu prosesleri etkileyen fizikokimyasal parametreler incelenmiştir. Elde ettiğimiz temel sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

- Adsorpsiyon deneysel verileri Langmuir, Freundlich ve Temkin izotermine uygunluğu analiz edilmiş ve en uygun izoterm Freundlich olduğu, ekzotermik süreçte kullanılan adsorbantın AMX gideriminde yalnız başına uygulanabilir olmadığı (giderim verimi: %25) görülmüştür.
- Oksidasyon deneysel verilerinde kritik aşamanın HOCl derişimi değil, sıcaklık olduğu ve prosesin yalancı birinci derece merteye kinetik modele uyduğu belirlenmiştir.
- Çok düşük oksidant varlığında bile (0.025 mM HOCl) 50 °C de pH 3 'de %80'e varan AMX giderim verimi elde edilmiştir ancak; oda sıcaklığı koşullarında HOCl derişiminin belirleyici etmen olmadığı görülmüştür.
- Oksidasyon deneylerinde en yüksek verim 60. dakikada elde edilse de 10. dakikada prosesin yaklaşık %95 i tamamlandığı gözlemlenmiştir.
- Oksitetrasiklin gideriminde %98 verime sahip olan Fe₃O₄&Tween-85@PEI adsorbant ile, AMX gideriminde maksimum %25 giderim verimine ulaşılmıştır. AMX'in yeni adsorbantla giderilememesinin nedeninin, yapısında bulunan – S grubunun hidrofobiteyi azaltan alifatik etkisi olduğu düşünülmektedir.
- Persülfat ve potasyum permanganat gibi oksidantların sucul ortamda Siprofloksasin gibi antibiyotik ilaç etken maddelerin gideriminde yaklaşık aynı giderim verimine sahip olmaları (%90), HOCl'in daha tercih edilebilir ve uygulanabilir olduğunu göstermektedir.
- İleri oksidasyonda yaygın olarak kullanılan Ozon (2.07V), Persülfat (2.01V), Hidrojen Peroksit (1.77V) gibi oksidantlardan daha düşük oksidasyon potansiyeline sahip Klor'un (1.38V) antibiyotik gideriminde yeterli verime sahip olduğu görülmüştür.
- Ülkemizde ve dünyada kullanımı çok yoğun olan geniş spektrumlu AMX ilaç etken maddenin, kullanımından sonra çevreye olan olası zararlı etkilerinin azaltılması için, sucul ortamdaki gideriminde uygulanabilir farklı kombinasyondaki çalışmalara örnek teşkil edebilir.

Teşekkür

Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FDK-2020-10079 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %8

Kaynaklar

- [1] I. Anastopoulos, I. Pashalidis, A.G. Orfanos, I.D. Manariotis, T. Tatarchuk, L. Sellaoui, A. Bonilla-Petriciolet, A. Mittal, A. Núñez-Delgado, Removal of caffeine, nicotine and amoxicillin from (waste)waters by various adsorbents. A review, *Journal of Environmental Management*, 261, 110236, 2020. doi:10.1016/j.jenvman.2020.110236.
- [2] C. Miossec, L. Lancelot, M. Monperrus, Multi-residue analysis of 44 pharmaceutical compounds in environmental water samples by solid-phase extraction coupled to liquid chromatography-tandem mass spectrometry, *Journal of Separation Science*, 42, 1853–1866, 2019. doi:10.1002/jssc.201801214.
- [3] P.J. Phillips, S.G. Smith, D.W. Kolpin, S.D. Zaugg, H.T. Buxton, E.T. Furlong, K. Esposito, B. Stinson, Pharmaceutical formulation facilities as sources of opioids and other pharmaceuticals to wastewater treatment plant effluents, *Environmental Science and Technology*, 44, 4910–4916, 2010. doi:10.1021/es100356f.
- [4] J.O. Tijani, O.O. Fatoba, O.O. Babajide, L.F. Petrik, Pharmaceuticals, endocrine disruptors, personal care products, nanomaterials and perfluorinated pollutants: a review, *Environmental Chemistry Letters*, 14, 27–49, 2016. doi:10.1007/s10311-015-0537-z.
- [5] N. Delgado, A. Navarro, D. Marino, G.A. Peñuela, A. Ronco, Removal of pharmaceuticals and personal care products from domestic wastewater using rotating biological contactors, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16, 1–10, 2019. doi:10.1007/s13762-018-1658-2.
- [6] Yiruhan, Q.J. Wang, C.H. Mo, Y.W. Li, P. Gao, Y.P. Tai, Y. Zhang, Z.L. Ruan, J.W. Xu, Determination of four fluoroquinolone antibiotics in tap water in Guangzhou and Macao, *Environmental Pollution*, 15, 2350–2358, 2010. doi:10.1016/j.envpol.2010.03.019.
- [7] H. Wang, N. Wang, B. Wang, Q. Zhao, H. Fang, C. Fu, C. Tang, F. Jiang, Y. Zhou, Y. Chen, Q. Jiang, Antibiotics in Drinking Water in Shanghai and Their Contribution to Antibiotic Exposure of School Children, *Environmental Science and Technology*, 50(5), 2692–2699, 2016. doi:10.1021/acs.est.5b05749.
- [8] B. Petrie, R. Barden, B. Kasprzyk-Hordern, A review on emerging contaminants in wastewaters and the environment: Current knowledge, understudied areas and recommendations for future monitoring, *Water Research*, 72, 3–27, 2015. doi:10.1016/j.watres.2014.08.053.
- [9] I. Ali, M. Asim, T.A. Khan, Low cost adsorbents for the removal of organic pollutants from wastewater, *Journal of Environmental Management*, 113, 170–183, 2012. doi:10.1016/j.jenvman.2012.08.028.

- [10] A.M. Aljeboree, A. Noor Alshirifi, Oxidative coupling of Amoxicillin using 4-Aminoantipyrine: Stability and higher sensitivity, *Journal of Physics: Conference Series*, 1294, 052001, 2019. doi:10.1088/1742-6596/1294/5/052001.
- [11] L. Liu, Q. Wang, H. Lin, R. Das, S. Wang, H. Qi, J. Yang, Y. Xue, D. Mao, Y. Luo, Amoxicillin Increased Functional Pathway Genes and Beta-Lactam Resistance Genes by Pathogens Bloomed in Intestinal Microbiota Using a Simulator of the Human Intestinal Microbial Ecosystem, *Frontiers in Microbiology*, 11, 1–14, 2020. doi:10.3389/fmicb.2020.01213.
- [12] H. Mihçioğru, Aerobik granüler aktif çamur ile bazı tıbbi ilaçların biyosorpsiyonu. Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2014.
- [13] F. Stuer-Lauridsen, M. Birkved, L.P. Hansen, H.-C. Lützhøft, B. Halling-Sørensen, Environmental Risk Assessment of Human Pharmaceuticals in Denmark after Normal Therapeutic Use, *Chemosphere*, 40, 783–793, 2000. doi:10.1016/S0045-6535(99)00453-1.
- [14] S.C. Council, Environmentally Classified, 2015.
- [15] H. Mihçioğru, M. Oguz, Removal of oxytetracycline and determining its biosorption properties on aerobic granular sludge, *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 46, 174–182, 2016. doi:10.1016/j.etap.2016.07.017.
- [16] M. Topal, G. Uslu, E.I. Arslan Topal, E. Öbek, Antibiyotiklerin tespiti ve artırılması, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 29 (2) 185–199, 2013.
- [17] M. Homayoonfal, M.R. Mehrnia, Amoxicillin separation from pharmaceutical solution by pH sensitive nanofiltration membranes, *Separation and Purification Technology*, 130, 74–83, 2014. doi:10.1016/j.seppur.2014.04.009.
- [18] M. Gholami, R. Mirzaei, R.R. Kalantary, A. Sabzali, F. Gatei, Performance evaluation of reverse osmosis technology for selected antibiotics removal from synthetic pharmaceutical wastewater, *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 9, 10–12, 2012. doi:10.1186/1735-2746-9-19.
- [19] E.M. Cuerda-Correa, M.F. Alexandre-Franco, C. Fernández-González, Advanced oxidation processes for the removal of antibiotics from water. An overview, *Water*, 12(1), 102, 2020. doi:10.3390/w12010102.
- [20] X. Wang, A. Wang, J. Ma, Visible-light-driven photocatalytic removal of antibiotics by newly designed $C_3N_4@MnFe_2O_4$ -graphene nanocomposites, *Journal of Hazardous Materials*, 336, 81–92, 2017. doi:10.1016/j.jhazmat.2017.04.012.
- [21] M.L. Tran, C.C. Fu, R.S. Juang, Removal of metronidazole and amoxicillin mixtures by UV/TiO₂ photocatalysis: an insight into degradation pathways and performance improvement, *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 11846–11855, 2019. doi:10.1007/s11356-019-04683-4.
- [22] H. Çağlar Yılmaz, E. Akgeyik, S. Bougarrani, M. El Azzouzi, S. Erdemoğlu, Photocatalytic degradation of amoxicillin using Co-doped TiO₂ synthesized by reflux method and monitoring of degradation products by LC–MS/MS, *Journal of Dispersion Science and Technology*, 41, 414–425, 2020. doi:10.1080/01932691.2019.1583576.
- [23] R. Kıdak, Ş. Doğan, Medium-high frequency ultrasound and ozone based advanced oxidation for amoxicillin removal in water, *Ultrasonics Sonochemistry*, 40, 131–139, 2018. doi:10.1016/j.ultsonch.2017.01.033.
- [24] D. Balarak, F.K. Mostafapour, E. Bazrafshan, T.A. Saleh, Studies on the adsorption of amoxicillin on multi-wall carbon nanotubes, *Water Science and Technology*, 75, 1599–1606, 2017. doi:10.2166/wst.2017.025.
- [25] D.R. Lima, E.C. Lima, C.S. Umpierrez, P.S. Thue, G.A. El-Chaghaby, R.S. da Silva, F.A. Pavan, S.L.P. Dias, C. Biron, Removal of amoxicillin from simulated hospital effluents by adsorption using activated carbons prepared from capsules of cashew of Para, *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 16396–16408, 2019. doi:10.1007/s11356-019-04994-6.
- [26] C. Zwiener, Occurrence and analysis of pharmaceuticals and their transformation products in drinking water treatment, *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 387, 1159–1162, 2020. doi:10.1007/s00216-006-0818-2.
- [27] L. Molina-García, A. Ruiz-Medina, M.L. Fernández-De Córdoba, A novel multicommutated fluorimetric optosensor for determination of resveratrol in beer, *Talanta*, 83, 850–856, 2011. doi:10.1016/j.talanta.2010.10.033.
- [28] S. Sarıbuğa, Manyetik nanopartiküllerin analitik incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2014.
- [29] D. Öztürk, H. Mihçioğru, Production of innovative magnetic adsorbent Fe₃O₄@PEI@Tween 85 and removal of oxytetracycline from aqueous media, *Separation Science and Technology*, 1–13, 2021. doi:10.1080/01496395.2021.1962911.
- [30] Z.Y. Lu, Y.L. Ma, J.T. Zhang, N.S. Fan, B.C. Huang, R.C. Jin, A critical review of antibiotic removal strategies: Performance and mechanisms, *Journal of Water Process Engineering*, 38, 101681, 2020. doi:10.1016/j.jwpe.2020.101681.
- [31] S.E. Moradi, Highly efficient removal of Amoxicillin from water by magnetic graphene oxide adsorbent, *Univ*, 60(74), 41–48, 2015.
- [32] I. Anastopoulos, I. Pashalidis, A.G. Orfanos, I.D. Manariotis, T. Tatarchuk, L. Sellaoui, A. Bonilla-Petriciolet, A. Mittal, A. Núñez-Delgado, Removal of caffeine, nicotine and amoxicillin from (waste)waters by various adsorbents. A review, *Journal of Environmental Management*, 261, 2020. doi:10.1016/j.jenvman.2020.110236.
- [33] C. Homsirikamol, N. Sunsandee, U. Pancharoen, K. Nootong, Synergistic extraction of amoxicillin from aqueous solution by using binary mixtures of Aliquat 336, D₂EHPA and TBP, *Separation and Purification*

- Technology, 162, 30–36, 2016. [doi:10.1016/j.seppur.2016.02.003](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.02.003).
- [34] E. Tümay Özer, Aktif karbon ile sulu çözeltilerden Amoksisilin giderimi: Kinetik ve denge çalışmaları, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 833–839, 2020. [doi:10.31590/ejosat.697040](https://doi.org/10.31590/ejosat.697040).
- [35] N. Rafiei, A. Fatehizadeh, M. Mehdi, H. Reza, A. Ebrahimi, E. Taheri, T.M. Aminabhavi, Application of UV / chlorine processes for the DR83 : 1 degradation from wastewater : Effect of coexisting anions, *Journal of Environmental Management*, 297, 113349, 2021. [doi:10.1016/j.jenvman.2021.113349](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113349).





COVID-19 salgını dönemindeki kısıtlamaların sera gazı salınımına etkisi

Effect of the lockdown on greenhouse gas emissions during the COVID-19 pandemic

Hülya Aykaç Özen^{1,*} 

Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 55139, Samsun Türkiye

Özet

COVID-19 salgını nedeniyle, 2020 yılının Mart ayından itibaren alınan önlemler, dünya çapında çevreyi doğrudan veya dolaylı olarak etkileyen çıktılarının görülmesine neden olmuştur. Bu bakış açısından yola çıkarak; Samsun'da, COVID-19 salgını döneminde ısınma amaçlı doğalgaz tüketiminden ve karayolu ulaşımından kaynaklı sera gazı emisyon değişimleri analiz edilmiştir. Sera gazları olan CO₂, CH₄ ve N₂O emisyon miktarları COVID-19 salgını öncesi (Mart 2019 - Şubat 2020) ve COVID-19 salgını dönemini (Mart 2020 - Şubat 2021) kapsayacak şekilde, Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından kabul edilen bir metodoloji olan Tier yaklaşımı kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan değerlendirmeye göre, salgın döneminde ısınma ve karayolu ulaşımı sonucu açığa çıkan toplam sera gazı emisyon miktarı bir önceki yıla göre 17.3 Gg azalmıştır. Bulgular, karbon ayak izi yükü açısından incelendiğinde, salgın döneminde doğalgaz kaynaklı tüketim sonucu 8.1552 Gg eşdeğer CO₂, karayolu ulaşımı kaynaklı ise 9.1412 Gg eşdeğer CO₂ emisyonunun atmosfere salınmadığı göstermektedir. Sonuç olarak, 2020 yılında COVID-19 salgınına kontrol altına almak için uygulanan önlemlerin, ısınmada ve karayolu ulaşımında kullanılan yakıt tüketimini etkilediği ve toplam yakıt miktarının azalmasına katkı sağlayarak sera gazı emisyon miktarını düşürdüğü görülmüştür.

Anahtar kelimeler: COVID-19, Sera gazı, Karayolu ulaşımı, Doğalgaz, Karbon ayak izi

Abstract

Due to the COVID-19 epidemic, the measures taken in since March 2020 have led to outcomes that directly or indirectly affect the environment worldwide. Based on this point of view, greenhouse gas emission changes due to natural gas consumption and road transportation during the COVID-19 pandemic were analyzed in Samsun province. Emissions of greenhouse gases for CO₂, CH₄ and N₂O were calculated using the Tier approach, a methodology adopted by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) before and during the COVID-19 pandemic. According to results, the total amount of greenhouse gas emissions released due to natural gas and road transportation during the pandemic decreased by 17.3 Gg compared to the previous year. When the findings are examined in terms of carbon footprint, 8.1552 Gg equivalent CO₂ emissions from natural gas consumption and 9.1412 Gg equivalent CO₂ emissions from road transportation were not released into the atmosphere during the pandemic period. In conclusion, the restrictions on mobility due to the COVID-19 epidemic have reduced the amount of greenhouse gas emissions by causing a decrease in the total amount of fuel resulting from heating and road transport.

Keywords: COVID-19, Greenhouse gas, Highway transport, Natural gas, Carbon footprint

1 Giriş

2019 yılının sonlarında tanımlanan ve Dünya Sağlık Örgütü tarafından salgın olarak ilan edilen korona virüs hastalığı (COVID-19), yirmi birinci yüzyılın en ciddi küresel sağlık durumlarından birini temsil etmektedir [1]. 31 Aralık 2019'da Çin'in Wuhan şehrindeki ilk vaka raporundan bu yana, COVID-19 hastalığı kısa sürede dünya çapında yayılmış ve halen etkisini devam ettirmektedir [2]. Semptomları; nezle ve gribe benzer olmakla birlikte, hastanın yaşı ve bağışıklık sistemine bağlı olarak daha şiddetli solunum yolu enfeksiyonları, nörolojik hastalıklar, çoklu organ disfonksiyonu ve hatta ölümcül sonuçlar görülebilmektedir. Bugüne kadar, virüsün yayılmasını

tamamen önlemek için etkili bir tedavi yöntemi bulunamamıştır. 9 Eylül 2021 itibarıyla, 223 ülkede 223441854 vaka bildirmiş ve 4610408 kişinin COVID-19 salgını nedeniyle hayatını kaybettiği kaydedilmiştir [3]. Türkiye de dahil olmak üzere çoğu ülke, salgının etkilerini azaltmak ve yeni korona virüsün bulaşmasını durdurmak için yasal kısıtlama, sosyal kural ve önlemleri uygulamaya koymuştur [4-6]. Ülke çapında sokağa çıkma yasağı kapsamında restoranlar, sinemalar, okullar, alışveriş kompleksleri, eğitim kurumları gibi tüm sosyal toplanma yerleri kapatılmış, kronik hastalığı olanlar, hamileler ile 60 yaş üstü vatandaşların evlerinden çıkmaları yasaklanmış, kamu ve özel sektör çalışanları için esnek çalışma saatleri

* Sorumlu yazar/ Corresponding author, e-posta / e-mail: hulya.aykac@omu.edu.tr
Geliş / Received: 06.10.2021 Kabul / Accepted: 17.12.2021 Yayınlanma / Published: 14.01.2022
doi: 10.28948/ngumuh.1005439

belirlenmiş, demiryolu, karayolu ve havayolu dahil olmak üzere her türlü ulaşım hizmetleri, temel hizmetler dışında askıya alınmıştır. Karantinanın uygulanmasıyla COVID-19'un yayılmasını yavaşlatmayı amaçlayan hükümet politikaları, dünyadaki çoğu insan için çalışma ve yaşam alışkanlıklarını önemli ölçüde değiştirmiştir [7]. Davranıştaki bu ani değişiklik, konut ve ticari olarak kullanılan binaların doğalgaz talebini de etkilemiştir. Örneğin, COVID-19 önlemleri sonucu İtalya, Fransa ve İspanya'da sanayi sektörü tarafından doğal gaz tüketimi sırasıyla %25, %16 ve %14 azalmıştır. Ayrıca, karantina döneminde doğalgaz dağıtımını İtalya, Belçika, Hollanda ve Polonya'nın her birinde ortalama %15 oranında net bir düşüşe neden olmuştur [8]. Bir başka çalışmada, Mart 2020 döneminde konut sektöründe doğalgaz tüketimi 2019 ve 2018 yıllarının aynı dönemleri ile karşılaştırıldığında, birinci durumda %12.79 daha yüksek, ikinci durumda %27.08 daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır [9]. COVID-19 salgınında uygulanan kısıtlamaların bir diğer etkisi de karayolu ulaşımında görülmüştür. Sokağa çıkma kısıtlaması uygulanan süre ve günlerde zorunlu haller dışında vatandaşların toplu ulaşım vasıtaları dışında şehirlerarası seyahatlerine izin verilmemiş ve şehirlerarası ulaşımında şehirlerin giriş ve çıkışlarında kontrol noktaları oluşturulmuştur. Bu önlemler sonucu; araç sayısı azalarak trafik sıkışıklığı önlenmiş ve böylece mevcut araçların emisyon miktarında olumlu yönde düşüş görülmüştür. Cüce ve Uğur [10], COVID-19 tedbirleri sonucu Nevşehir genelinde azalan insan hareketliliği nedeniyle özellikle eşdeğer CO₂ emisyonunun 2020 yılı Mart-Ekim döneminde geçmiş yılların Mart-Ekim dönemi ortalamasından düşük olduğunu raporlamışlardır. Benzer bir çalışma Çin'in Pekin şehrinde gerçekleştirilmiş, COVID-19'un etkisi nedeniyle uygulanan karantina sırasında ortalama günlük trafik hacminin 2020'de %38.2 oranında azaldığı ve birincil atmosferik kirleticilerin günlük emisyonları, 2020'de 2019'un aynı dönemine göre %29.2 azalma gösterdiği belirtilmiştir [11]. Kolombiya'da COVID-19 karantina döneminde ulaşımın kaynaklanan emisyonlardaki değişiklikleri analiz etmek için, IPCC Kılavuz İlkeleri ile uyumlu standart bir metodoloji kullanılmış ve CH₄, N₂O ve CO₂ sera gazı emisyonlarında sırasıyla %17, %21 ve %28; CO ve NMVOC gazlarında sırasıyla %21 ve %22, NOx miktarında ise %15'e kadar azalma olduğunu ifade edilmiştir [12]. COVID-19 salgını sırasında literatürde de bahsedildiği gibi, ısınma kaynaklı doğal gaz tüketimi ve karayolu ulaşımındaki değişiklikler, küresel ısınmayla mücadele noktasında hava kalitesi üzerinde olumlu katkı oluşturmuştur. Bu noktada, karbon ayak izi ile oluşan potansiyel etkilerin nedenlerini ve etkilerini anlamak mümkün olabilmektedir. Karbon ayak izi, faaliyetlerin fosil yakıtların yakılması yoluyla üretilen karbondioksit miktarı üzerindeki etkisinin bir ölçüsü olarak ifade edilmektedir [13]. İklim değişikliği ile ilgili bilimsel değerlendirmeler yapan IPCC, sera gazı emisyonlarını daha iyi yönetmek ve emisyon azaltma önlemlerini belirlemek için kuruluşların emisyonlarının nerede oluştuğunu daha iyi anlamasının yolunun karbon ayak izi hesaplanmasının olduğunu ifade etmiştir [14].

Bu çalışma, COVID-19 salgını döneminde uygulanan kısıtlamaların Samsun'da iklim değişikliği açısından yarattığı etkiyi incelemeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamda, IPCC tarafından kabul edilen bir metodoloji olan Tier yaklaşımı kullanılarak, COVID-19 salgını öncesi ve sırasında Samsun'da ısınma amaçlı doğalgaz kullanımından ve karayolu ulaşımından kaynaklanan karbon ayak izi çalışması gerçekleştirilmiştir.

2 Materyal ve metot

2.1 Veri temini

Samsun'da, COVID-19 salgını döneminde uygulanan kısıtlamaların; ısınma amaçlı doğalgaz kullanımına ve ulaşımından kaynaklanan yakıt tüketimine ve dolayısıyla sera gazı salınımına etkisini değerlendirmek için, çalışma periyodu salgın öncesi (Mart 2019 - Şubat 2020) ve salgın dönemi (Mart 2020 - Şubat 2021) olarak ikiye ayrılmıştır. Doğalgazdan kaynaklı karbon ayak izi miktarını hesaplayabilmek için Samsun Doğal Gaz Dağıtım A.Ş. (SAMGAZ) kurumundan; Mart 2019 ile Şubat 2021 tarihleri arasında mevcut aktif abone sayısı ve aktif abonelere ait doğalgaz tüketim miktarları temin edilmiştir (Şekil 1). SAMGAZ, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumunun 06.07.2004 tarih ve DAG/336-12/058 sayılı kurul kararı ile Tekkeköy, Canik, İlkadım, Atakum ve Kavak ilçelerinde kesintisiz olarak hizmet vermektedir. Dolayısıyla, Samsun'un 5 ilçesindeki veriler kullanılarak çalışma gerçekleştirilmiştir. Samsun'da salgın döneminde uygulanan kısıtlamaların karayolundan kaynaklanan karbon ayak izi miktarına etkisini hesaplayabilmek için ise, Mart 2019 - Şubat 2020 ve Mart 2020 - Şubat 2021 tarihlerinde, taşıtlarda kullanılan yakıt türleri ve yakıtların miktarları, T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) Petrol Piyasası Sektör Raporu ile Sıvılaştırılmış Petrol Gazları (LPG) Piyasası Sektör Raporu'ndan temin edilmiştir [15-20]. Buna göre Samsun'da benzin, motorin ve LPG olmak üzere üç farklı yakıt türleri ve bu yakıtların tüketim miktarları çalışmada değerlendirmeye alınan dönemi kapsayacak şekilde aylık olarak Tablo 4'te verilmiştir. Bu bilgiler ışığında Samsun'da salgın öncesinde ve salgın döneminde uygulanan kısıtlamalar sonucu hem doğalgaz hem de ulaşımından kaynaklanan yakıt tüketimine bağlı karbon ayak izi değişimi hesaplanmıştır

2.2 Karbon ayak izi hesaplama yöntemi

Karbon ayak izinin belirlenmesi, IPCC tarafından geliştirilen yöntem olan Tier-1, Tier-2 ve Tier-3 olmak üzere üç farklı yaklaşım ile yapılmaktadır. Bu çalışmada, uygulanması basit ve hızlı olan ayrıca yakıt miktarı ile oluşacak emisyonun yakıtla orantılı olarak ortaya çıkması prensibine dayanan Tier-1 yöntemi seçilmiştir. Hesaplamalar COVID-19 salgını öncesi (Mart 2019 - Şubat 2020) ve COVID-19 salgını dönemini (Mart 2020 - Şubat 2021) kapsayacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Isınma amaçlı doğalgaz kullanımından kaynaklı karbon ayak izinin belirlenmesi için gerekli olan emisyon faktörleri IPCC'nin 2006 yılında yayınlamış olduğu raporda yer almakta olup, Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kaynağa göre emisyon faktörleri [14].

Sera Gazı Emisyon kaynağı	Emisyon faktörü	Birimi
Doğalgaz	1.88496	kg/m ³ CO ₂
Doğalgaz	0.000168	kg/m ³ CH ₄
Doğalgaz	0.00000336	kg/m ³ N ₂ O

Samsun'da doğalgaz kullanımı kaynaklı karbon ayak izinin tahminlenmesi sırasında, emisyonlarının CO₂ cinsinden eşdeğerleri kullanarak hesaplanması amaçlanmaktadır. Bu amaçla, salgın öncesi ve salgın döneminde Samsun'da doğalgaz tüketim miktarları temin edilmiş (Şekil 1) ve Tablo 1'de yer alan emisyon faktörleri ile çarpılarak CO₂, CH₄ ve N₂O emisyon miktarları Denklem (1) kullanılarak hesaplanmıştır (IPCC 1996):

$$\text{Emisyon (Gg)} = \frac{\text{Toplam Tüketim Miktarı (m}^3\text{)*}}{\text{Emisyon Faktörü (kg/m}^3\text{)*10}^{-6}} \quad (1)$$

Emisyon miktarları elde edildikten sonra CO₂, CH₄ ve N₂O emisyonları için IPCC, AR-5:5 Değerlendirme Raporunda tanımlanan Küresel Isınma Potansiyeli (GWP) değerleri kullanılarak eşdeğer CO₂ miktarları hesaplanmıştır (Tablo 2). Örnek olarak; salgın öncesi dönemde ısınmadan kaynaklanan doğalgaz tüketimi sonucu oluşan CO₂ ve CH₄ emisyonları ile bu emisyonların eşdeğer CO₂ miktarları aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

CO₂ emisyonu hesabı

$$\begin{aligned} \text{Doğalgaz tüketim miktarı} &= 249449253 \text{ m}^3 \\ \text{Emisyon Faktörü} &= 1.88496 \text{ kg/m}^3 \\ \text{CO}_2 \text{ emisyonu (Gg)} &= \text{Doğalgaz tüketim miktarı} * \text{Emisyon Faktörü} \\ \text{CO}_2 \text{ emisyonu (Gg)} &= 249449253 \text{ m}^3 * 1.88496 \text{ kg/m}^3 * 10^{-6} \\ &= 470.209 \text{ Gg} \\ \text{Eşdeğer CO}_2 &= \text{CO}_2 \text{ Emisyon miktarı} * \text{GWP} \\ &= 470.209 \text{ Gg} * 1 = 470.209 \text{ Gg} \end{aligned}$$

CH₄ emisyonu hesabı

$$\begin{aligned} \text{Doğalgaz tüketim miktarı} &= 249449253 \text{ m}^3 \\ \text{Emisyon Faktörü} &= 0.000168 \text{ kg/m}^3 \\ \text{CH}_4 \text{ emisyonu (Gg)} &= \text{Doğalgaz tüketim miktarı} * \text{Emisyon Faktörü} \\ \text{CH}_4 \text{ emisyonu (Gg)} &= 249449253 \text{ m}^3 * 0.000168 \text{ kg/m}^3 * 10^6 \\ &= 0.0419 \text{ Gg} \\ \text{Eşdeğer CO}_2(\text{CH}_4) &= \text{CH}_4 \text{ Emisyon miktarı} * \text{GWP} \\ &= 0.0419 \text{ Gg} * 28 = 1.1734 \text{ Gg} \end{aligned}$$

Yukarıdaki hesaplamalara göre, Samsun ilinde ısınma amaçlı doğalgaz kullanımından kaynaklanan sera gazlarının salgın öncesi ve dönemindeki miktarları ve karbon ayak izlerinin belirlenmesi ayrıntılı olarak Tablo 3'te verilmiştir. Karayolu ulaşımında kullanılan yakıt çeşitlerine göre tüketim değerleri (ton) her bir yakıt türü için belirlendikten sonra (Tablo 4), IPCC Kılavuzu'ndan alınan dönüşüm faktörleri uygulanmıştır (Tablo 2). Bu sayede tüketilen yakıt miktarına karşılık gelen enerji içeriğine veya enerji tüketimi birimine (TJ) geçilmiştir. Bir sonraki adımda Tablo 2'de

verilmiş olan emisyon faktörleri kullanılarak, tüketilen yakıtın emisyon içeriği bulunmuştur. Burada yakıt türüne göre emisyon faktörleri kullanılarak emisyon içeriği Gg cinsinden elde edilmiştir. Çalışma kapsamında değerlendirmeye alınan gazlar olan CO₂, CH₄ ve N₂O emisyonları için IPCC, AR-5:5. Değerlendirme Raporunda tanımlanan Küresel Isınma Potansiyeli değerleri kullanılmıştır (Tablo 2).

Tablo 2. Farklı yakıt türlerinde kullanılacak emisyon faktörleri ve katsayılar [21].

Yakıt Tipi	Dönüşüm Faktörü (TJ/Gg)	Emisyon Faktörleri (kg/TJ)			Küresel Isınma Katsayısı (kg CO ₂ eşd/kg)		
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Benzin	44.3	69300	33	3.2	1	28	265
Motorin	43.0	74100	3.9	3.9	1	28	265
LPG	47.3	63100	62	0.2	1	28	265

Karayolu ulaşımından kaynaklanan emisyonlar Denklem (2) ve Denklem (3) kullanılarak hesaplanmıştır [22].

$$\text{Enerji Tüketimi (TJ)} = \frac{\text{Yakıt tüketimi (Gg)*}}{\text{Dönüşüm faktörü (TJ/Gg)}} \quad (2)$$

$$\text{Emisyon (Gg)} = \frac{\text{Enerji tüketimi (TJ)*}}{\text{Emisyon faktörü (kg/TJ)*10}^{-6}} \quad (3)$$

Örnek olarak; salgın öncesi dönemde karayolu ulaşımından kaynaklanan benzin tüketimi sonucu oluşan CO₂ ve CH₄ emisyonları ile bu emisyonların eşdeğer CO₂ miktarları aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

CO₂ emisyonu hesabı

$$\begin{aligned} \text{Benzin tüketim miktarı} &= 30704.6690 \text{ ton} \\ \text{Dönüşüm faktörü} &= 44.3 \text{ TJ/Gg} \\ \text{Enerji Tüketimi (TJ)} &= 30704.6690 \text{ ton} * 44.3 \text{ TJ/Gg} * 10^{-3} \\ &= 1360.2168 \text{ TJ} \\ \text{Emisyon faktörü} &= 69300 \text{ kg/TJ} \\ \text{CO}_2 \text{ emisyonu (Gg)} &= 1360.2168 \text{ TJ} * 69300 \text{ kg/TJ} * 10^{-6} \\ &= 94.2630 \text{ Gg} \\ \text{Eşdeğer CO}_2 &= \text{CO}_2 \text{ Emisyon miktarı} * \text{GWP} \\ &= 94.2630 \text{ Gg} * 1 = 94.2630 \text{ Gg} \end{aligned}$$

CH₄ emisyonu hesabı

$$\begin{aligned} \text{Benzin tüketim miktarı} &= 30704.6690 \text{ ton} \\ \text{Dönüşüm faktörü} &= 44.3 \text{ TJ/Gg} \\ \text{Enerji Tüketimi (TJ)} &= 30704.6690 \text{ ton} * 44.3 \text{ TJ/Gg} * 10^{-3} \\ &= 1360.2168 \text{ TJ} \\ \text{Emisyon faktörü} &= 33 \text{ kg/TJ} \\ \text{CH}_4 \text{ emisyonu (Gg)} &= 1360.2168 \text{ TJ} * 33 \text{ kg/TJ} * 10^{-6} \\ &= 0.0449 \text{ Gg} \\ \text{Eşdeğer CO}_2(\text{CH}_4) &= \text{CH}_4 \text{ Emisyon miktarı} * \text{GWP} \\ &= 0.0449 \text{ Gg} * 28 = 1.2568 \text{ Gg} \end{aligned}$$

Samsun ilinde karayolları ulaşımından kaynaklanan sera gazlarının salgın öncesi ve salgın dönemindeki değerleri Tablo 5'te ayrıntılı olarak yer almaktadır. Bu yaklaşımla; emisyon hesaplaması için tüketilen yakıt miktarı ve standart emisyon faktörlerinin belirlenmesi olmak üzere iki ana nokta yeterlidir. Çalışma kapsamında değerlendirmeye alınan dönem aralığında hem ısınma amaçlı doğalgaz kullanımı hem de ulaşım kaynaklı CO₂, CH₄ ve N₂O emisyonları hesaplanarak sera gazı emisyon miktarı belirlenmiş ve karbon ayak izi bazında karakterize edilmiştir.

2.3 İstatistiksel analiz

Isınma amaçlı doğalgaz tüketiminden ve karayolları ulaşımından kaynaklanan karbon ayak izi miktarlarını karşılaştırmak için, salgın öncesi ve salgın döneminde elde edilen veriler istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Değişkenlerin normal dağılıma uygunluğu Shapiro-Wilk testi ile incelenmiş ve değerlerin normal bir dağılım göstermesinden dolayı Paired-T testi uygulanmıştır. Verilerin analizinde %5 anlamlılık düzeyi kullanılarak SPSS (23. Sürüm) paket programı kullanılmıştır.

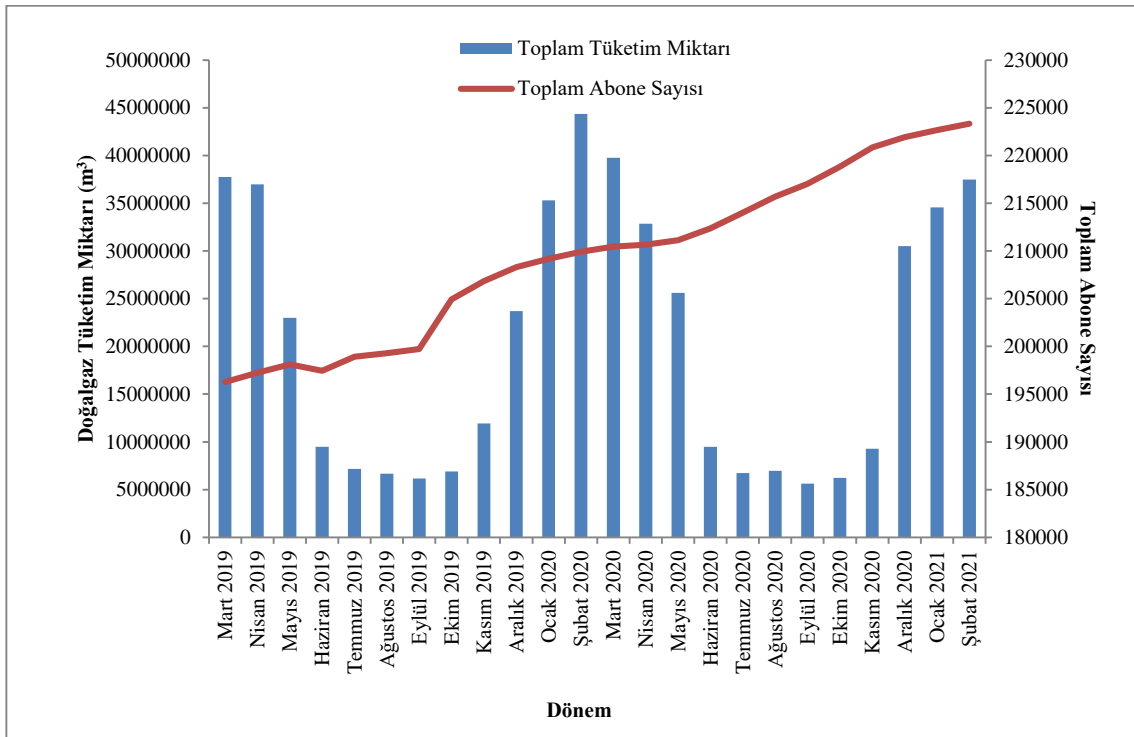
3 Bulgular ve tartışma

3.1 Isınma amaçlı doğalgaz tüketiminden kaynaklanan karbon ayak izi miktarının hesabı

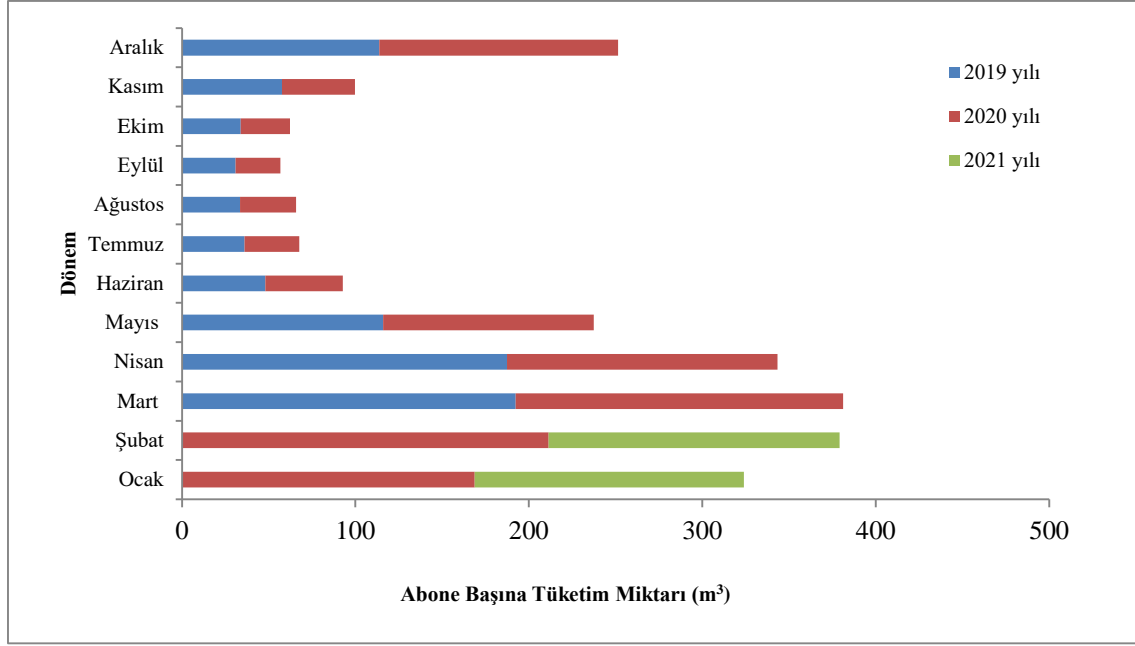
Salgın döneminde, ısınma amaçlı doğalgaz tüketiminin karbon ayak izine olan etkisini incelemek amacıyla SAMGAZ Doğal Gaz Dağıtım A.Ş. kurumundan Mart 2019 ile Şubat 2021 tarihleri arasında mevcut aktif abone sayısı ve aktif abonelere ait doğalgaz tüketim miktarları alınarak, çalışma; salgın öncesi (Mart 2019 - Şubat 2020) ve salgın dönemi (Mart 2020 - Şubat 2021) olarak iki başlık altında

irdelenmiştir. Dönemsel olarak toplam abonelik sayısı ve toplam doğalgaz tüketim miktarları Şekil 1'de gösterilmiştir. Ayrıca, aylara göre abone başına düşen doğalgaz tüketim miktarları hesaplanarak elde edilen sonuçlar, Şekil 2'de sunulmuştur. Samsun'da çalışma kapsamında değerlendirmeye alınan salgın öncesi dönemde toplam doğalgaz abone sayısı 202181, salgın döneminde ise 216578 kişidir. Buna karşılık doğalgaz toplam tüketim miktarları incelendiğinde; salgın öncesinde 249449253 m³, salgın döneminde ise 245135594 m³ tüketim gerçekleşmiştir. Yani, salgın döneminde abone sayısı artmasına rağmen doğalgaz tüketiminde azalma söz konusudur. Salgın döneminde uygulanan kısıtlamaların insanların yaşam alışkanlıklarını değiştirerek binalardaki doğalgaz ihtiyacını etkilediğini göstermektedir. Abone başına düşen doğalgaz tüketim miktarları salgın öncesi ve salgın dönemi olarak karşılaştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir: Mart 2020'de salgının başlamasıyla abone başına düşen tüketim miktarı Mart 2019 yılına göre sadece %1.79 azalma göstermiştir.

Mart ayının ortasında Türkiye'de ilk vakanın görülmesi ve ayın sonunda sadece 65 yaş üstü vatandaşların sokağa çıkmasının yasaklanması, Mart ayında doğalgaz tüketiminde etkili bir değişime sebep olmamıştır. Nisan ayından itibaren tüm okul ve üniversitelerin yüz yüze eğitim yerine uzaktan eğitim sistemi uygulaması, çalışanlar için esnek çalışma saatlerinin belirlenmesi, iki hafta kısmi kapanma olması ve hafta sonları sokağa çıkma yasağı ilan edilmesi, kişilerin evde kalma süresinin artmasına ve özellikle Mayıs 2020 döneminde doğalgaz tüketiminde artışa neden olduğu tahmin edilmektedir. 2020 yılının Mayıs ayında, önceki yılın aynı dönemine göre abone başı tüketim miktarlarında %4.53 artış söz konusudur.



Şekil 1. Mart 2019-Şubat 2021 döneminde Samsun'da ısınma amaçlı tüketilen doğalgaz miktarları



Şekil 2. Mart 2019 - Şubat 2021 döneminde aylara göre abone başına düşen doğalgaz tüketim miktarları

Salgın döneminde, Haziran ayından Aralık ayına kadar doğalgaz tüketimi azalma trendi sergilemiş ve Haziran, Temmuz, Ağustos, Eylül, Ekim, Kasım aylarında tüketimde sırasıyla %7.04, %12.71, %3.44, %16.04, %15.61, %27.06 oranında düşüş görülmüştür. Haziran ayından itibaren kontrollü normalleşme sürecine geçilmesi ve yaz döneminde kentten kırsal kesimlere göçün, salgın öncesi döneme göre doğalgaz tüketimini azalttığını düşündürmektedir. 2020 ve 2021 yılı Ocak ve Şubat ayları tüketim miktarları incelendiğinde Ocak ayında tüketim 2020 yılına göre %8, Şubat ayında ise %20.64 düşüş sergilemiştir. 2021 yılında abone başı tüketim miktarının düşük olmasının sebebi insanların COVID-19 virüsünün olası etkilerinden korunmak için kalabalık ortamlardan uzaklaşıp yazlık ve kırsal bölgelere yerleşerek, buralarda ısınma amaçlı diğer yakıtları kullanması ile doğalgaz kullanımının azalması olarak düşünülmektedir.

Samsun ilinde, doğalgaz abone sayıları ve toplam tüketim miktarları elde edildikten sonra, IPCC metodolojisine göre ısınma amaçlı doğalgaz tüketiminden

kaynaklanan karbon ayak izi miktarı belirlenmiştir. Doğalgaz tüketimi sonucu açığa çıkan CO₂, CH₄ ve N₂O emisyonlarının miktarları hesaplanarak, her bir emisyon CO₂ eşdeğeri üzerinden ifade edilmiştir. Salgın öncesi ve salgın döneminde oluşan emisyonlara ilişkin hesaplamalar Tablo 3'te verilmiştir. SAMGAZ'dan alınan veriler ve Tier-1 yaklaşımı ile yapılan hesaplamalar yardımı ile doğalgazdan kaynaklı sera gazı emisyon miktarları belirlenmiştir. Buna göre, salgın öncesi dönemde atmosfere salınan CO₂ emisyonu 470.2019 Gg, CH₄ emisyonu 0.0419 Gg ve N₂O emisyonu 0.0008 Gg olarak hesaplanmıştır. Salgın döneminde ise CO₂, CH₄ ve N₂O emisyon değerlerinin sırasıyla 462.0708 Gg, 0.0412 Gg ve 0.0008 Gg olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çalışma kapsamında değerlendirmeye alınan salgın öncesi döneminde toplam sera gazı emisyon miktarı 470.2446 Gg iken, salgın döneminde 462.1128 Gg değeri elde edilmiştir. Bulgular, Samsun'da salgın döneminde ısınma amaçlı doğalgaz kaynaklı tüketimin 359471.75 m³ azalması ile yaklaşık 8.1318 Gg sera gazı emisyonunun atmosfere salınmadığını göstermektedir.

Tablo 3. Samsun ilinde ısınma amaçlı doğalgaz kullanımından kaynaklanan karbon ayak izi hesabı

	Doğalgaz Toplam Tüketim Miktarı (m ³)	Emisyon Faktörü (kg/m ³)	Emisyon Miktarı (ton)	Emisyon Miktarı (Gg)	Küresel Isınma Potansiyeli	Eşdeğer CO ₂ (Gg CO ₂)
CO₂ Emisyonu						
Salgın öncesi	249449253	1.88496	470201.8639	470.2019	1.00	470.2019
Salgın dönemi	245135594	1.88496	462070.7893	462.0708	1.00	462.0708
CH₄ Emisyonu						
Salgın öncesi	249449253	0.000168	41.9075	0.0419	28.00	1.1734
Salgın dönemi	245135594	0.000168	41.1828	0.0412	28.00	1.1531
N₂O Emisyonu						
Salgın öncesi	249449253	0.00000336	0.8381	0.0008	265.00	0.2221
Salgın dönemi	245135594	0.00000336	0.8237	0.0008	265.00	0.2183

Ayrıca, salgın öncesi ve salgın dönemi arasında doğalgaz kullanımından kaynaklanan CO₂, CH₄ ve N₂O emisyonları için hesaplanan karbon ayak izi miktarları arasındaki ilişki istatistiksel olarak incelenmiştir. Buna göre, ısınma amaçlı doğalgaz tüketimi sonucu oluşan karbon ayak izi miktarında salgın öncesi ve salgın dönemi arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki tanımlanamamıştır (p=0.72). Salgın öncesi dönemde oluşan toplam eşdeğer CO₂ miktarı 471.5974 Gg, salgın döneminde eşdeğer CO₂ miktarı 463.4422 Gg olarak hesaplanmıştır. Salgın döneminde, doğalgaz kullanımının azalması ile toplam 8.1552 Gg eşdeğer CO₂ atmosfere verilmeyerek, CO₂ salınımlarında %1.73 oranında düşüş gözlemlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar, 2020 yılında COVID-19 salgını sebebiyle ülkemizde alınan tedbirlerin doğalgaz tüketimini etkilediği ve sosyal, ekonomik ve ticari faaliyetlerin değişimiyle ısınma amaçlı kullanılan doğalgaz kaynaklı emisyon miktarını az da olsa düşürdüğünü göstermektedir. Ancak, elde edilen sonuçlar birbirlerine yakın değerler olduklarından istatistiksel olarak anlamlı bir fark oluşturmamıştır.

3.2. Karayolları ulaşımından kaynaklanan karbon ayak izi miktarının hesabı

Samsun'da ulaşımda kullanılan yakıt türü ve miktarları, T.C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) Petrol ve LPG Piyasası Sektör Raporları'ndan elde edilmiştir [15-20]. Mevcut verilerle; IPCC metodolojisi olan Tier-1 yaklaşımına göre, salgın öncesi ve salgın dönemini kapsayacak şekilde yakıt tüketimine bağlı karbon ayak izi değişimi hesaplanmıştır. Yakıt türleri ve dönemsel olarak yakıt tüketim miktarları Tablo 4'te gösterilmiştir. Samsun'da salgın öncesi dönemde karayolu ulaşımına ait benzin tüketim miktarı 30704.669 ton, motorin tüketim miktarı 456368.056 ton, LPG tüketim miktarı 61580.124 ton iken; salgın döneminde benzin, motorin ve LPG tüketim miktarları sırasıyla 30731.259 ton, 460518.716 ton ve 54199.13 ton'dur. Toplam tüketilen yakıt miktarları çalışma kapsamında değerlendirmeye alınan her iki dönem için de incelendiğinde, salgın öncesi dönemde 548652.849 ton, salgın döneminde ise 545449.105 ton olarak hesaplanmıştır.

Salgın döneminde toplam karayolu ulaşımına ait yakıt miktarında 3203.744 ton azalma olduğunu görülmektedir. Azalmanın nedeni, COVID-19 virüsünün yayılmasını önlemek için uygulanan tedbirler olan uzaktan eğitim ve çalışma imkânlarının oluşması, sokağa çıkma yasağı ve şehirlerarası seyahat kısıtlamaları gibi doğrudan ulaşımı etkileyen yaptırımlar ile ilişkilendirilebilmektedir.

Samsun ilinde karayolu ulaşımında kullanılan yakıt türleri için tüketim değerleri belirlendikten sonra, tüketilen yakıt değerleri üzerinden IPCC kılavuzunda yayınlanan Tier-1 yaklaşımı kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Her yakıt türü için CO₂, CH₄, N₂O emisyon değerleri hesaplanarak elde edilen veriler, eşdeğer karbondioksit miktarı cinsinden ifade edilmiştir. Samsun ilinde salgın öncesi ve salgın döneminde karayolu araçlarında kullanılan yakıtlardan kaynaklanan emisyon miktarını gösteren hesaplamalar Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 4. Samsun ilinde belirlenen çalışma döneminde karayolu ulaşımına ait yakıt satış miktarları (ton)[15-20].

	Dönem	Yakıt Türü		
		Benzin	Motorin	LPG
Salgın Öncesi	Mart 2019	2160.11	36490.23	4327.00
	Nisan 2019	2234.19	37194.13	4715.47
	Mayıs 2019	2430.76	39077.24	4763.43
	Haziran 2019	3105.05	35868.57	5834.30
	Temmuz 2019	3187.33	41339.32	5804.50
	Ağustos 2019	3822.34	41668.79	7041.32
	Eylül 2019	2429.93	38898.43	5506.21
	Ekim 2019	2464.01	40190.76	5060.02
	Kasım 2019	2423.66	41443.83	4855.93
	Aralık 2019	2275.24	35516.20	4721.59
	Ocak 2020	2122.18	33833.05	4775.90
	Şubat 2020	2049.86	34847.50	4174.47
Salgın Dönemi	Mart 2020	2202.25	41707.35	3943.84
	Nisan 2020	1714.89	28474.42	3008.35
	Mayıs 2020	1926.11	31860.01	3207.45
	Haziran 2020	2937.21	41827.76	4965.80
	Temmuz 2020	3878.79	47879.99	6409.71
	Ağustos 2020	3943.54	46647.91	6741.97
	Eylül 2020	3147.33	47274.95	5298.64
	Ekim 2020	2514.50	41504.17	5239.73
	Kasım 2020	2617.29	40704.2	4590.22
	Aralık 2020	1916.01	36714.58	3582.76
	Ocak 2021	2028.72	28885.18	3711.26
	Şubat 2021	1904.62	27038.21	3499.41

Salgın öncesi dönemde Tier-1 yöntemine göre hesaplanan yakıt türleri için, CO₂, CH₄ ve N₂O emisyon değerleri sırasıyla 1732.1824 Gg, 0.302 Gg ve 0.0815 Gg bulunmuştur. Salgın döneminde benzin, motorin ve LPG kullanımı ile oluşan toplam emisyon miktarı ise CO₂, CH₄ ve N₂O gazları için sırasıyla 1723.4598 Gg, 0.281 Gg ve 0.0821 Gg hesaplanmıştır. Çalışmada COVID-19 salgını ortaya çıkmadan önce seçilen dönem aralığında ulaşımdan kaynaklanan toplam sera gazı emisyon miktarı 1732.5659 Gg iken salgın döneminde 1723.8230 Gg değerine ulaşılmıştır. Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere, salgın karantinası döneminde karayolu ulaşımında yakıt tüketiminin 3203.744 ton azalması yaklaşık 8743 ton sera gazı emisyonunun atmosfere salınmadığını göstermektedir. Ayrıca, Tablo 5'te salgın döneminde ve önceki yılın aynı dönem aralığında tüketilen yakıt türlerine ait eşdeğer CO₂ emisyon miktarları da yer almaktadır. Çalışma kapsamında değerlendirmeye alınan dönem aralığında Tier-1 yöntemine göre hesaplanan yakıt türlerine ait toplam eşdeğer CO₂ emisyon miktarı 3515.3144 Gg'dır. Bu değer 1762.2278 Gg miktarını salgından önceki dönem oluştururken, salgın döneminde ise 1753.0866 Gg eşdeğer CO₂ emisyonu oluşmuştur. COVID-19 salgın döneminde sıkı önlemlerin başında gelen seyahat kısıtlaması ve sokağa çıkma yasağının olduğu günlerde zorunlu haller dışında şehir içi toplu taşıma araçlarının kullanılmaması gibi tedbirler Samsun'da karayolları ulaşımından kaynaklanan eşdeğer CO₂ miktarına etkisi önceki yılın aynı dönemi ile karşılaştırıldığında, yakıt tüketiminde 9.1412 Gg azalma göstermiştir.

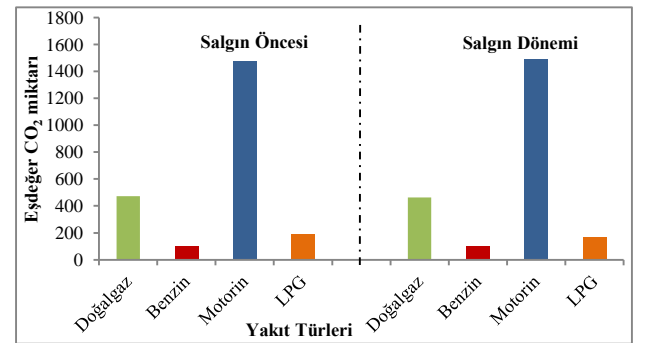
Tablo 5. Samsun ilinde karayolu ulaşımından kaynaklanan karbon ayak izi hesabı

	Yakıt Türü	Yakıt Tüketim Miktarı (ton)	Yakıt Tüketim Miktarı (Gg)	Dönüşüm Faktörü (TJ/Gg)	Enerji Tüketimi (TJ)	Emisyon Faktörü (kg/TJ)	Emisyon İçeriği (kg)	Emisyon İçeriği (Gg)	Küresel Isınma Potansiyeli	Eşdeğer CO ₂ (Gg)
CO₂ Emisyonu										
Salgın Öncesi	Benzin	30704.6690	30.7047	44.3	1360.2168	69300	94263026.8	94.2630	1	94.2630
	Motorin	456368.0560	456.3681	43	19623.8264	74100	1454125536.8	1454.1255	1	1454.1255
	LPG	61580.1240	61.5801	47.3	2912.7399	63100	183793885.5	183.7939	1	183.7939
Salgın Dönemi	Benzin	30731.2590	30.7313	44.3	1361.3948	69300	94344657.8	94.3447	1	94.3447
	Motorin	460518.7160	460.5187	43	19802.3048	74100	1467350784.8	1467.3508	1	1467.3508
	LPG	54199.1290	54.1991	47.3	2563.6188	63100	161764346.4	161.7643	1	161.7643
CH₄ Emisyonu										
Salgın Öncesi	Benzin	30704.6690	30.7047	44.3	1360.2168	33	44887.2	0.0449	28	1.2568
	Motorin	456368.0560	456.3681	43	19623.8264	3.9	76532.9	0.0765	28	2.1429
	LPG	61580.1240	61.5801	47.3	2912.7399	62	180589.9	0.1806	28	5.0565
Salgın Dönemi	Benzin	30731.2590	30.7313	44.3	1361.3948	33	44926.0	0.0449	28	1.2579
	Motorin	460518.7160	460.5187	43	19802.3048	3.9	77229.0	0.0772	28	2.1624
	LPG	54199.1290	54.1991	47.3	2563.6188	62	158944.4	0.1589	28	4.4504
N₂O Emisyonu										
Salgın Öncesi	Benzin	30704.6690	30.7047	44.3	1360.2168	3.2	4352.7	0.0044	265	1.1535
	Motorin	456368.0560	456.3681	43	19623.8264	3.9	76532.9	0.0765	265	20.2812
	LPG	61580.1240	61.5801	47.3	2912.7399	0.2	582.5	0.0006	265	0.1544
Salgın Dönemi	Benzin	30731.2590	30.7313	44.3	1361.3948	3.2	4356.5	0.0044	265	1.1545
	Motorin	460518.7160	460.5187	43	19802.3048	3.9	77229.0	0.0772	265	20.4657
	LPG	54199.1290	54.1991	47.3	2563.6188	0.2	512.7	0.0005	265	0.1359

Samsun'da karayolları ulaşımından kaynaklanan CO₂, CH₄ ve N₂O emisyonları için hesaplanan karbon ayak izi miktarları arasındaki ilişki istatistiksel olarak incelenmiştir. Buna göre, salgın öncesi ve salgın döneminde benzin (p=0.84) ve motorin (p=0.98) kullanımı istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Salgın öncesi dönemde karayolunda benzin ve motorin tüketiminden kaynaklanan karbon ayak izi miktarı sırasıyla 96.67 Gg ve 1476.55 Gg iken, salgın döneminde 96.76 Gg ve 1489.98 Gg olarak hesaplanmıştır. Çalışmada değerlendirmeye alınan salgın öncesi döneminde LPG kullanımından kaynaklanan karbon ayak izi 189.01 Gg iken salgın döneminde 166.35 Gg'dir. LPG kullanımından kaynaklanan karbon ayak izinde salgın öncesi ve salgın dönemi arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmuştur (p=0.001). Bu durum LPG kullanımından kaynaklanan sera gazı emisyonunun salgın döneminde anlamlı derecede azalarak karbon ayak izi oluşumunu azalttığını ifade etmek mümkündür.

Tier-1 yaklaşımına göre; COVID-19 salgınında Samsun'da sınırlı aktiviteler sonucu doğalgaz tüketiminden ve araçlardan kaynaklanan eşdeğer CO₂ emisyon miktarlarının yakıt türüne göre dağılımı Şekil 3'te gösterilmektedir. Salgın öncesinde doğalgaz kullanımı kaynaklı 471.60 Gg eşdeğer CO₂ emisyonu atmosfere verilirken, salgın döneminde emisyon miktarı 463.44 Gg'a düşmüştür. Karayolları ulaşımında kullanılan benzin,

motorin ve LPG yakıtları içerisinde eşdeğer CO₂ emisyonunda en fazla düşüş %12 azalma ile LPG'de görülmüştür.



Şekil 3. Samsun'da yakıt türüne göre atmosfere salınan eşdeğer CO₂ miktarları

Motorin ve benzinde ise dikkate değer bir değişiklik gözlenmemiş ve önceki yıla yakın eşdeğer CO₂ emisyon salınımı oluşmuştur. Salgın öncesi seçilen dönem aralığında toplam yakıt miktarının eşdeğer CO₂ emisyonuna katkısı 2233.83 Gg iken, salgın döneminde azalma göstererek 2216.53 Gg hesaplanmıştır. Aradaki fark, COVID-19 salgınında kısa dönem karantinanın ısınma ve ulaşım üzerindeki etkisini gösterdiği düşünülmektedir.

4. Sonuçlar

Samsun'da; COVID-19 salgını nedeniyle kısıtlanmış faaliyetlerinin sera gazı emisyonuna etkisini değerlendirmek üzere, salgın öncesi ve salgın dönemi olarak seçilen dönem aralığında elde edilen veriler karşılaştırılarak, karbon ayak izi miktarı hesaplanmıştır. Isınma amaçlı doğalgaz kullanımı ve karayolu ulaşımı kaynaklı emisyon miktarlarının hesaplanması için gerekli veri setleri ilgili kurumlardan temin edilmiş ve hesaplama aşaması IPCC Tier-1 yaklaşımına göre yapılarak sera gazı emisyon miktarları belirlenmiştir. Çalışma kapsamında değerlendirmeye alınan dönemlerde, sera gazı emisyon ve eşdeğer CO₂ miktarlarına bağlı olarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir: Çalışmada, doğalgaz kullanımından ve ulaşımdan kaynaklanan yakıt tüketimlerinde en düşük emisyon miktarları salgın döneminde gerçekleşmiştir. Doğalgaz kullanımı sonucu üretilen sera gazı emisyon miktarı geçen yılın aynı dönemine göre %1.73 azalma göstermiştir ve karbon ayak izi yükünde ise 8155 ton azalmaya katkıda bulunmuştur. Karayolları ulaşımında ise salgın döneminde oluşan sera gazı emisyon miktarı salgın öncesi döneme göre % 0.51 ile azalma trendi sergilemiştir, bu azalmanın eşdeğer CO₂ miktarına etkisi ise 9141 ton olarak hesaplanmıştır. Yapılan inceleme sonucunda, Samsun'da yakıtlar arasında en yüksek sera gazı emisyonunun karayolları ulaşımındaki yakıt tüketiminden kaynaklandığı belirlenmiştir. Çalışma kapsamında değerlendirmeye alınan salgın döneminde hem doğalgaz hem de karayollarından oluşan toplam sera gazı emisyon miktarı salgın öncesi döneme göre 16.8747 Gg azalarak, atmosfere salınan 17.3 Gg sera gazı emisyonu elimine edilmiştir. Sonuçlardan da anlaşılacağı gibi, alınan önlemler, Samsun'da hava kalitesi üzerinde fark edilebilir sonuçları olan kirlilik emisyonlarında azalma sağlamıştır. Genel olarak, COVID-19 kısıtlamaları sırasında ulaşım sektörü ve doğalgaz kullanımı gibi bazı insan faaliyetlerinin azalması sonucu küresel hava kalitesinde iyileşme görülmüştür. Bu bilgiler ışığında, özellikle akaryakıtla çalışan araçlara yönelik kısıtlamalara odaklanılmalı, hava kirliliğini etkin bir şekilde kontrol etmek için yakıtla çalışan araçların kullanımı azaltılmalı ve geleneksel yakıtla çalışan araçların yerine yeni enerji kullanan araçlar teşvik edilmelidir. Toplu taşıma araçlarını seyahat etmeye teşvik ederken, araçların toplu taşıma için kullandıkları yakıt türünün iyileştirilmesine de dikkat edilmelidir. Bu çalışma, gelecekte çevre ile ilgili altyapı ve politikaların planlanabilmesi için, politikacılar ve araştırmacılar için kirleticilerin azaltılması üzerindeki çeşitli faktörlerin etkisini analiz etmeleri ve bunlara erişmeleri için faydalıdır. Çünkü kısıtlamanın kaldırılması ve faaliyetlerin normalleştirilmesi sonucu hava kirliliği seviyelerinde artış görülmesi kaçınılmazdır. Son olarak, salgın önlemleri kısa vadede uygulanmış olsa bile, sera gazı konsantrasyon seviyesini uzun bir süre boyunca nasıl en aza indirilebileceğini anlamak için iyi bir fırsat sunmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışmaya sağladıkları katkılarından dolayı Samsun Doğal Gaz Dağıtım A.Ş. (SAMGAZ) ve Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK)'na teşekkür ederim.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %9

Kaynaklar

- [1] WHO, General's opening remarks at the media briefing on COVID-19 11 March 2020. <https://www.who.int/directorgeneral/speeches/detail/who-director-general-s-opening-remarks-at-the-media-briefing-on-covid-19--11-march-2020>, Accessed 26 May 2020.
- [2] V. J. Munster, M. Koopmans, N. van Doremalen, D. van Riel and E. de Wit, A novel coronavirus emerging in China—key questions for impact assessment. *New England Journal of Medicine*, 82(8), 692-694, 2020. <https://doi.org/10.1056/NEJMp2000929>.
- [3] Worldometers, COVID-19 Pandemic. <https://www.worldometers.info/coronavirus/>, Accessed 9 September 2021.
- [4] M.F. Bashir, B. Jiang, B. Komal, M.A. Bashir, T.H. Farooq, N. Iqbal and M. Bashir, Correlation between environmental pollution indicators and COVID-19 pandemic: A brief study in Californian context. *Environmental Research*, 187, 109652, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109652>.
- [5] M. Pasic, I. Bijelonić and M. Pasic, Air quality during SARS-CoV-2 (COVID-19) lockdown in Sarajevo. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 8 (2), 884-892, 2020. <http://dx.doi.org/10.21533/pen.v8i2.1327>.
- [6] P. Wang, K. Chen, S. Zhu, P. Wang, and H. Zhang, Severe air pollution events not avoided by reduced anthropogenic activities during COVID-19 outbreak. *Resources, Conservation and Recycling*, 158, 104814, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104814>.
- [7] M. Krarti and M. Aldubyan, Review analysis of COVID-19 impact on electricity demand for residential buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 110888, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110888>.
- [8] C. Philippe, F.M. Bréon, S.N. Dellaert, Y. Wang, K. Tanaka, L. Gurriaran and Z. Liu, Impact of lockdowns and winter temperatures on natural gas consumption in Europe. *Earth and Space Science Open Archive ESSOAr*, 2021.
- [9] D. Cvetković, A. Nešović and I. Terzić, Impact of people's behavior on the energy sustainability of the residential sector in emergency situations caused by COVID-19. *Energy and Buildings*, 230, 110532, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110532>.
- [10] H. Cüce ve O. Uğur, Nevşehir ilinde karayolu ulaşımından kaynaklanan sera gazı emisyonlarının Covid-19 salgını başlangıç döneminde değerlendirilmesi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 11(1), 118-134, 2021. <https://doi.org/10.31466/kfbd.885206>.
- [11] X. Cao, Y. Tian, Y. Shen, T. Wu, R. Li, X. Liu and A. Lian, Emission variations of primary air pollutants

- from highway vehicles and implications during the Covid-19 pandemic in Beijing, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(8), 4019, 2021. <https://doi.org/10.3390/ijerph18084019>.
- [12] Y. Camargo-Cacedo, L.C. Mantilla-Romoand T.R. Bolaño-Ortiz, Emissions reduction of greenhouse gases, ozone precursors, aerosols and acidifying gases from road transportation duringthe COVID-19 lockdown in Colombia. *Applied Sciences*, 11(4), 1458, 2021. <https://doi.org/10.3390/app11041458>.
- [13] T. Wiedmannand J. Minx, A definition of ‘Carbon Footprint’. *Ecological economics research trends*, Nova Science Publishers, 2008.
- [14] IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 2, Chapter 3, Mobil Combustion. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>, Accessed 12 August 2021.
- [15] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (2019a), Petrol piyasası 2019 yılı sektör raporu. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-107/yillik-sektor-raporu>, Accessed 2 August 2021.
- [16] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (2020a), Petrol piyasası 2020 yılı sektör raporu. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-107/yillik-sektor-raporu>, Accessed 2 August 2021.
- [17] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (2021a), Petrol piyasası 2021 yılı Ocak ve Şubat ayı sektör raporu. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-104-1008/petrolaylik-sektor-raporu>, Accessed 2 August 2021.
- [18] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (2019b), Sıvılaştırılmış petrol gazları (LPG) piyasası 2019 yılı sektör raporu. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-108-1002/lpgyillik-sektor-raporlari>, Accessed 2 August 2021
- [19] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (2020b), Sıvılaştırılmış petrol gazları (LPG) piyasası 2020 yılı sektör raporu. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-108-1002/lpgyillik-sektor-raporlari>, Accessed 2 August 2021.
- [20] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu. (2021b). Sıvılaştırılmış petrol gazları (LPG) piyasası 2021 yılı Ocak ve Şubat ayı sektör raporları. <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-105-1002/lpgaylik-sektor-raporlari>, Accessed 2 August 2021.
- [21] IPCC Fifth Assessment Report: Climate Change 2013. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>, Accessed 7 August 2021.
- [22] IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: reference manual,1996, <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.html>, Accessed 7 August 2021.





Abdominal bilgisayarlı tomografi görüntülerinde böbrek taşlarının sınırlarının ve sayılarının görüntü işleme yöntemleri kullanılarak tespiti.

The detection of the borders and numbers of kidney stones in the abdominal computed tomography images using image processing methods.

Merve Karaman^{1*} , Salim Çınar² 

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, 51240, Niğde, Türkiye

Özet

Böbrek taşlarının medikal görüntülerdeki teşhisi ve tespiti hastalığın seyri ve tedavi yönteminin belirlenmesi açısından önemlidir. Abdominal Bilgisayarlı Tomografi (BT) görüntülerinin gürültülü ve düşük çözünürlükte olması böbrek taşı teşhisini zorlaştıran faktörlerdir. Bu çalışmada abdominal BT görüntülerinde bulunan böbreklerdeki taşların sınırlarının ve sayılarının belirlenmesi amaçlanmıştır. İlk olarak BT görüntülerinin netleştirilmesi ve gürültünün yok edilmesi için Gama Düzeltmesi yöntemi kullanılmıştır. İkinci olarak böbrekler, ilgi bölgesi (ROI: Region of Interest) yöntemi ile manuel olarak seçilmiştir. Seçilen böbrek bölgelerinde eşikleme uygulanarak böbrek taşlarının tespiti gerçekleştirilmiştir. Böbrek sınırları içerisinde bulunan taşlara Morfolojik aşındırma ve genişletme işlemleri uygulanarak görüntüde bitişik algılanan taşlar ayrıştırılmış ve taşlar sayılmıştır. Çalışmanın başarımının hesaplanması için Hata Matrisi oluşturulmuştur. Önerilen yöntemin performans analizinde Doğruluk (Accuracy), Hassasiyet (Sensitivity) ve Özgüllük (Specificity) değerleri sırasıyla %97, %96, %100 şeklinde Hata Matrisi kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, kullanılan yöntemin böbrek taşı tespiti ve sayımında başarılı olduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Görüntü işleme, Böbrek taşı, ROI, Eşikleme, Morfoloji

1 Giriş

Görüntü işleme teknikleri, görüntülerin iyileştirilmesi, görüntü üzerinde bulunan insan algısının görmekte zorlandığı nesnelere tespiti, farklı nesnelere ayırt edilmesi ve nesne takibi gibi çok geniş uygulama alanına sahiptir. Medikal bir görüntünün uzman tarafından doğru değerlendirilmesinde düşük çözünürlük ve gürültü kaynaklı bozulmalar bazı problemlerin ortaya çıkmasına sebep olabilmektedir. Bu problemlerin çözümünde görüntü işleme ve iyileştirme teknikleri kullanılarak teşhisin veya tanının kolay ve doğru bir şekilde yapılması sağlanabilir. Örneğin medikal bir görüntüde bulunan lezyon oluşumu görüntü işleme teknikleri ile netleştirilebilmekte ve tespit edilebilmektedir.

Böbrekler normal anatomiye sahip insanlarda çift olarak bulunan organlardır ve görevleri kandaki zararlı maddeleri

Abstract

The diagnosis and detection of kidney stones in medical images are important in terms of determining disease progression and treatment methods. Noisy and low-resolution Abdominal Computed Tomography (CT) images are factors that complicate the diagnosis of kidney stones. The goal of this study is to determine the borders and number of stones found in the kidney on abdominal CT images. Firstly, the Gamma Correction method is used to sharpen CT images and eliminate noise. Secondly, the kidneys are selected manually using the Region of Interest (ROI) method. The detection of kidney stones is carried out by applying a threshold to the selected kidney regions. By applying morphological erosion and dilation processes to the stones within the limits of the kidney, the stones detected adjacent in the image are separated, and the stones are counted. The confusion matrix is created to calculate the performance of the study. In the performance analysis of the proposed method, the Accuracy, Sensitivity, and Specificity values using the Confusion Matrix are calculated at 97%, 96%, and 100%, respectively. The results show that the proposed method is successful in detecting and counting kidney stones.

Keywords: Image processing, Kidney stones, ROI, Thresholding, Morphology

filtreleyerek idrar ile dışarı atmaktadır. İdrar ile atılmayan ve çözilemeyen maddeler birleşerek böbrek taşı oluşumuna sebep olmaktadır. Böbrek taşı, böbreklere zarar veren ve ilerleyebilen bir hastalıktır. Bu nedenle kalıcı sorunlara yol açmadan önce böbrek taşı tespiti hayati önem taşımaktadır [1].

Böbrek taşları ultrason ya da BT gibi medikal görüntüleme teknikleri kullanılarak görüntülenebilmektedir. BT'nin artan kullanımı taş tespitini iyileştirmiş ve böbrek taşı insidansının artmasına sebep olmuştur [2]. Ancak abdominal BT görüntülerinin düşük çözünürlüğe sahip olması teşhisi ve taşların değerlendirilmesini zorlaştırmaktadır [3].

Literatürde böbrek bölgesinin çıkarılması ve taşların değerlendirilmesine yönelik çeşitli yöntemler bulunmaktadır ve bu alanda çalışmalar devam etmektedir. Saman ve

* Sorumlu yazar / Corresponding author: e-posta / e-mail: merve_karaman@ohu.edu.tr (M.Karaman)

Geliş / Received: 16.06.2021 Kabul / Accepted: 13.08.2021 Yayımlanma / Published: 14.01.2022
doi: 10.28948/ngumuh.953423

Vladimir, abdominal BT’de böbrek taşının saptanması için konum, kontrast ayarı, bölütleme, bağlı bileşen etiketleme, nesne algılama yöntemlerini önermişlerdir [4]. Akkasaligar vd., abdominal BT görüntülerine bazı temel görüntü iyileştirme teknikleri uygulamıştır. Gerçekleştirilen ön işlemin ardından gri seviye oluşumu ‘Fuzzy C- means’ yöntemi ile sınıflandırılmış ve böbrek taşı tespiti gerçekleştirilmiştir [5]. Shah ve Kadage, BT görüntülerine ön işleme-morfolojik işlemler, ikili görüntü, eşik bölütleme, taş sayısı, boyutlarının ve konumlarının belirlenmesi biçiminde beş aşamadan oluşan bir yaklaşım uygulamışlardır [3].

Önerilen bu çalışmada abdominal BT görüntülerinde böbrek bölgesinin çıkarılması ve ardından böbrekte bulunan taşlara ait sayı, konum, boyut ve taş ile böbrek merkezi arasındaki Öklid Mesafesi bilgilerinin hesaplanması amaçlanmaktadır. Bu sayede görüntüyü değerlendirecek uzman daha kaliteli bir görüntüyü inceleyerek teşhis ettiği sonuçları, algoritma sonuçları ile karşılaştırarak daha güvenilir verilere ulaşabilecektir.

Böbrek taşlarının boyutu tedavi yönteminin belirlenmesinde önemlidir. Böbrek taşının 2 cm ‘den daha büyük olması durumunda standart olarak Perkütan Nefrolitotomi (PNL) cerrahi tedavi yöntemi uygulanmaktadır [6]. Çalışma sonucunda böbrekte bulunan taşların piksel bazında boyut bilgisi hesaplanmıştır. Bu sayede uzman böbrek taşı hastalığının tedavisinde izleyeceği yol hakkında karar vermek için bir ön bilgiye sahip olabilecektir.

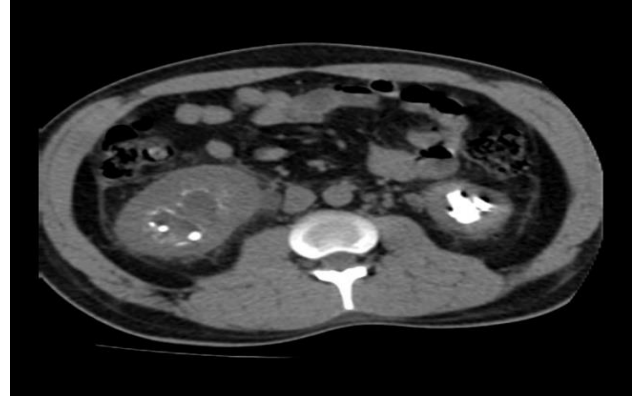
Önerilen yöntemin aşamaları sırasıyla şu şekildedir. İlk aşamada görüntünün kontrast ayarı için Gama Düzeltme yöntemi kullanılmıştır. Sadece böbrekte bulunan taşların değerlendirilebilmesi için, böbrek bölgelerinin kullanıcı tarafından seçilmesi sağlanarak ROI çıkarılmıştır. İkinci aşamada çıkarılan ROI’ler eşikleme uygulanarak ikili görüntüye dönüştürülmüş ve morfolojik işlem sonucu elde edilen görüntüde taşların ağırlık merkezi ve piksel alanı hesaplanarak böbrek taşlarının; sayı, boyut, konum ve böbrek merkezine olan Öklid mesafeleri bulunmuştur.

2 Metot

Abdominal BT görüntülerinin düşük kontrastlı ve gürültülü olması taş tespitini zorlaştırmaktadır. Bu çalışmada böbrek sınırlarının netleştirilmesi ve gürültülerin bastırılması için Gama Düzeltmesi kullanılmıştır. Gama düzeltmesi sonucu elde edilen görüntüde böbrek sınırları manuel bir serbest çizim ile takip edilerek böbrek bölgeleri ROI’ler belirlenmiştir. Orijinal görüntüden çıkarılan böbrek bölgelerine uygun eşik seviyesi uygulanarak böbrek bölgesi ikili görüntüye dönüştürülmüştür. Göz tespitinde yapışik değerlendirilen taşların ayrılması ve böbrek taşı olmamasına rağmen taş olarak algılanabilecek nesnelerin kaldırılması için ikili görüntüde morfolojik işlemler uygulanmıştır.

Şekil 1’de örnek bir abdominal BT görüntüsü verilmiştir. Görüntüde kemikler ve kalsifiye yapılar yakın ya da eşit yeğinlik (gri seviye) değerlerine sahiptir. Kemik ve kalsifiye yapıların ön plana çıkması ve böbrek sınırlarının daha belirgin olması için görüntünün yoğunluk değerleri bir gama değeri ile ayarlanmıştır. Gama Düzeltmesi γ (Gama) ve c olmak üzere iki değişken ile görüntünün genel parlaklığını

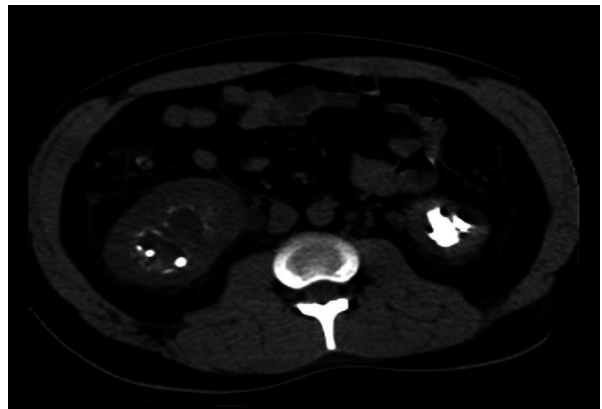
kontrol eden histogram değişimine dayalı bir dönüşümdür ve Denklem (1) ‘de verilen eşitlik ile ifade edilmektedir [8].



Şekil 1. Abdominal BT görüntüsü [7]

$$I_{in} = cI_{out}^{\gamma} \quad (1)$$

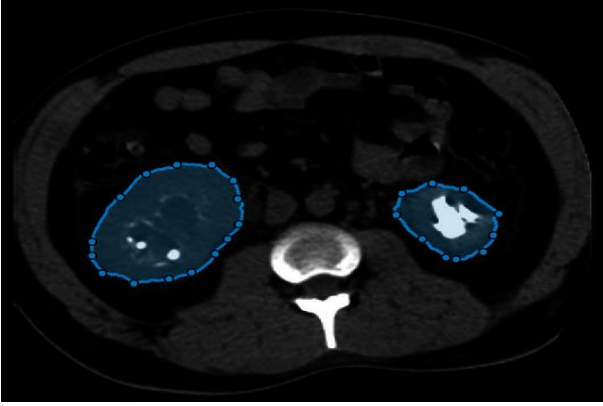
Burada I_{in} giriş görüntüsü, I_{out} çıkış görüntüsüdür. c ve γ pozitif sayılardır. Düşük kontrastlı parlak görüntülerin kontrastı arttırmak için uygulanan gama düzeltmesi yönteminde $c = 1$ olarak seçilir. Düşük kontrastlı parlak abdominal görüntülerinin karanlık bölgeye çekilmesi için yeğinlik seviyelerinin daraltılması gerekmektedir [8]. Yeğinlik seviyesinin daraltmak için $\gamma > 1$ değerleri seçilmelidir. Uygun gama değeri 1’den büyük olmak koşulu ile deneysel çalışmalar ile belirlenebilir. Bu deneysel çalışmalar ile $\gamma = 3$ seçildiğinde beklenildiği gibi taş olmayan nesnelerin bir kısmı atılmıştır ve böbrek sınırları netleştirilmiştir. Gama Düzeltmesi sonucunda giriş ve çıkış görüntülerinin yeğinlik seviyeleri arasında oluşan eğrinin kontrast sınırları [0 1] aralığına uyacak şekilde ölçeklenmiştir. Gama Düzeltmesi sonucu karanlık bölgeye çekilen abdominal BT görüntüsünün Şekil 2’de böbrek sınırlarının serbest ROI işlecinin takip edebileceği biçimde netleştirildiği ve yumuşak dokunun gri seviye yeğinlik değerinin karanlık bölgeye çekildiği görülmektedir.



Şekil 2. Gama düzeltmesi uygulanmış abdominal BT görüntüsü

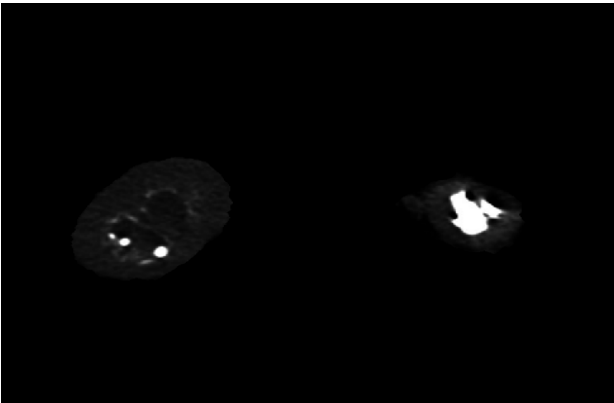
Gama Düzeltmesi uygulanan BT görüntüsünde böbrek bölgeleri, MATLAB görüntü işleme araçları ile manuel

olarak seçilerek ROI'ler çıkartılır. Bu sayede görüntüde böbrek dışında taş benzer oluşumlar değerlendirilmemekte ve sadece böbrek için incelenmesine olanak sağlanmaktadır. Böbrek bölgesinin nesnesini oluşturmak için kullanılan işlev serbest olarak belirlenen ilgi bölgesinin bir nesnesini oluşturmaktadır. Böbrek bölgesinin kullanıcı tarafından işaretlendiği pencere Şekil 3'te görülmektedir. İşlev ilk tepe noktasından kenar sınırlarını takip ederek çizim yapmaktadır ve bölge boyunca farklı tepe noktaları yerleştirilebilir. İlk tepe noktasından son tepe noktasına gelindiğinde ilgi bölgesi seçilmektedir.



Şekil 3. Böbrek bölgelerinin ROI ile seçilmesi

Böbrek bölgelerinin seçildiği alanlar kesilerek, seçilen böbrek alanlarının aydınlık, arka planın karanlık bölgeyi temsil ettiği ikili bir maske oluşturulur. Maskeleme görüntüde işlem için bir alanı izole etmek için kullanılır ve ROI işleme olarak adlandırılır ve orijinal görüntü ile maske görüntüsü çarpılarak görüntüde istenilen alan izole edilir. Görüntü çarpma işlemi iki veya daha fazla görüntü arasında piksel bazında gerçekleştirilir [9]. Oluşturulan maske ve Gama Düzeltmesi uygulanan görüntünün çarpılması ile sadece böbrekleri içeren görüntü elde edilir. Şekil 4'te abdominal BT görüntülerinde bulunan böbrek dışındaki organlar ve kemikler çıkarılmış yalnızca gri seviye böbrek bölgeleri kalmıştır. Bu sayede sadece ilgilenilen böbrek bölgeleri üzerinde işlem yapılabilmesi sağlanmıştır.



Şekil 4. Gama düzeltmesi uygulanan görüntü ile ikili maske görüntüsünün çarpımı ile elde edilen böbrek bölgeleri

Abdominal BT görüntülerinden çıkarılan böbrek alanlarında taşları temsil eden piksellerin belirlenmesi için eşik değerinin uygulanması gerekmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda [3] ve önerilen bu çalışmada deneysel sonuçlara göre 'T' eşik seviyesi olmak üzere $T \geq 200$ değerinde eşikleme sonucunun daha iyi performans sergilediği görülmüştür. Bu eşik seviyesi, çıkarılan böbrek bölgelerine uygulandığında yumuşak dokular atılarak görüntüde sadece taşlar kalmaktadır. Böbrek bölgelerinin gri seviye olduğu Şekil 4'teki görüntüye belirlenen eşik değeri $T = 200$ uygulanmıştır. Taşların ön planda, böbrek yumuşak dokusunun arka planda kaldığı taş sınırlarının korunması ile elde edilen ikili görüntü Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Eşikleme sonucu elde edilen ikili görüntü

İkili görüntüde 8-bağlı pikselleri nesne olarak tanımlayan ve bu nesnelere dış sınırlarını takip eden komut *bwboundaries* kullanılarak bu sınırlar içerisinde kalan nesnelere sayısı, konumu ve boyutu hesaplanabilmektedir. İlk olarak nesnelere sınırları izlenerek bir değişkene atanmıştır. Bu değişkenin boyut uzunluğu böbrekte bulunan taş sayısını vermektedir. Yapılan çalışmada böbreklerin ayrı ayrı seçilmesi sonucu taş sayıları da her böbrek için ayrı hesaplanmaktadır.

Bulunan her taşın piksel bazında alanları hesaplanmıştır. Görüntülerin gerçek boyut bilgisinin olduğu verilerde metrik hesaplamalar ile mm cinsinden taş boyutu hesaplanabilir. Ancak çalışmada kullanılan veri setinde görüntülerin gerçek boyut bilgisinin olmaması sebebiyle metrik hesap yapılamamıştır ve taşların alanları piksel bazında hesaplanmıştır.

Manuel olarak seçilen böbrek bölgeleri ile oluşturulan maske, böbrek alanlarının beyaz (lojik 1), böbrek dışındaki alanların siyah (lojik 0) olduğu bir ikili görüntüdür. Bu ikili görüntüde böbrek alanları birer nesne olarak değerlendirilir. Benzer şekilde eşikleme sonucu elde edilen görüntüde taşlar beyaz arka plan siyahtır. Böbrek bölgelerinin olduğu ikili görüntü ve Şekil 5'te görülen yalnızca taşların kaldığı ikili görüntüde *regionprops* kullanılarak böbrek ve taşlara ait alan ve ağırlık merkezleri hesaplanmıştır. Kullanılan komutta hesaplanması istenilen parametreler ikili görüntüdeki nesnelere (böbrek ve taşlar) alan hesabı için *Area*, ağırlık merkezi koordinatları için ise *Centroid* olarak belirlenmiştir.

Alan hesabı için kullanılan özellik *Area* ilgili bölgede gerçek piksel sayısını skaler olarak hesaplamaktadır. Böbrek ve taşların ağırlık merkezinin koordinat hesabında kullanılan *Centroid* parametresi $1xQ$ 'luk vektör içerisine ağırlık merkezi noktasına ait koordinatları atar. Vektörün ilk elemanı yatay koordinat (x) değerini, ikinci elemanı ise dikey koordinat (y) değerini taşımaktadır.

Son aşamada böbrek ağırlık merkezleri ile ilgili böbrekte bulunan taşların ağırlık merkezleri arasındaki Öklid uzaklığı hesaplanmıştır. Öklid hesabı farklı nesnelere arasındaki uzaklığı, benzerliği değerlendirmek için kullanılan bir yöntemdir. Böbrek ağırlık merkezi ile ilgili böbrekte bulunan taşların ağırlık merkezleri arasındaki Öklid uzaklığına ait matematiksel ifadesi **Denklem (2)**'de verilmiştir [10, 11].

$$D = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 - (y_1 - y_2)^2} \quad (2)$$

Burada D Öklid Mesafesi, (x_1, y_1) böbrek bölgesinin ağırlık merkezi koordinatı ve (x_2, y_2) taşların ağırlık merkezi koordinatıdır. **Denklem (2)** ile böbrek taşlarının ve böbrek alanlarının ağırlık merkezleri arasındaki Öklid hesabı yapılmıştır.

Üzerinde çalışılan veri setinde bulunan görüntülerin farklı parlaklık seviyelerine sahip olması ve düşük çözünürlük sebebiyle bazı taşlar bitişik değerlendirilmektedir. Örneğin bir böbreğinde 4 adet böbrek taşı olan hastaya ait görüntüde parlaklık seviyesinin yüksek olması sebebiyle eşikleme sonucu bitişik değerlendirilen gerçekte 4 adet olan taş algoritmada 1 taş olarak sayılmaktadır. Problem çözümü için matematiksel morfoloji önerilmiştir. Aşındırma, genişletme ve morfolojik filtreleme gibi teknikler görüntüdeki sınırları, iskeletleri ve dışbükey zarf gibi bölgesel şekillerin tanımlanması için görüntü bileşenlerini elde etmede kullanılan matematiksel morfoloji teknikleridir [9]. Görüntüde morfolojik işlem uygulanmak istenen özellikler için görüntüyü ifade edebilecek alt görüntüler veya küçük kümeler yapısal elemanlardır. Buna göre aşındırma işleminin matematiksel ifadesi **Denklem (3)**'te verilmiştir. Yapısal elemanın biçim ve boyutu deneysel olarak belirlenebilmektedir. Yapılan çalışmada aşındırma ve genişletme yöntemlerinde alt küme olarak disk şeklinde $r = 3$ yarıçaplı bir yapısal eleman belirlenmiştir. Bitişik taşları ayıracak ve aynı zamanda küçük taşları kaybetmeyecek biçimde optimum yapısal eleman biçimi ve büyüklüğü deneysel sonuçlar ile belirlenmiştir. Böbrek bölgesinin çıkarılması, eşikleme ardından oluşan, yalnızca taşların bulunduğu ikili görüntüde bitişik değerlendirilen taşlar arasındaki küçük bağları koparmak için öncelikle $r = 3$ yarıçaplı disk şeklinde bir yapısal elemanla aşındırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu sayede taşlar incelmış ve bitişik olanlar koparılmıştır.

$$A \ominus B = \{z | (B)_z \subseteq A\} \quad (3)$$

Denklem (3)'te A morfolojik işlem uygulanacak görüntü B ise A 'nın alt kümesidir. A görüntüsünü B yapısal elemanı ile aşındırma işlemi B 'nin A içerisinde yer alması koşuluyla,

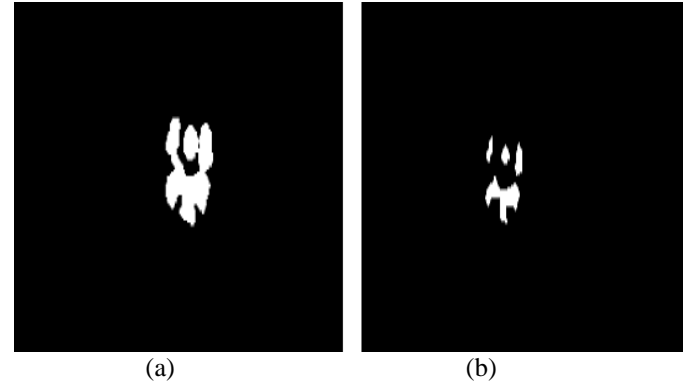
görüntü arkaplanı ile ortak elemana sahip olmaksızın B 'ye eşit olması biçiminde ifade edilebilir [9].

Aşındırma işleminin ardından taş alanlarının doğru değerlendirilebilmesi için erozyon işleminde kullanılan yapısal eleman kullanılarak genişletme işlemi gerçekleştirilmiştir. Genişletme işlemi aşındırma işleminin tersi gibi düşünülebilir. Yani aşındırmada görüntüdeki nesnelere aşınarak incelirken, genişletme işleminde nesnelere genişleterek büyür. **Denklem (4)** genişletme işleminin matematiksel ifadesini vermektedir.

$$A \oplus B = \{z | [(B)_z \cap A] \subseteq A\} \quad (4)$$

Burada \hat{B} , B 'nin kendi orjinine göre yansımasının z kadar kaydırılmasıdır. A 'nın \hat{B} ile genişletilmesi, \hat{B} 'nin A ile en az bir elemanı çakışacak şekilde tüm z kaymaları için bulunan sonuçları içeren bir küme olarak tanımlanabilir [9].

Şekil 6'da morfolojik işlem uygulanmadan öncesi ve sonrası elde edilen sonuç görüntüsü verilmiştir. **Şekil 6 (a)**'de görüldüğü gibi 8-bağlı pikseller ile nesne bir bütün olarak değerlendirilmekte ve bitişik nesnenin sınırları takip edilerek sayıldığında böbrek taşı sadece bir taş olarak sayılmaktadır. Bunun sebebi böbrek bölgesine eşikleme uygulandığında bu eşik seviyesine sahip birkaç piksellik görüntülerin ayrı taşlar arasında zayıf bir bağ oluşturmasıdır. **Şekil 6 (b)**'de morfolojik aşındırma ve genişletme işlemleri uygulanmasının ardından bitişik taşlarda zayıf bağların koparıldığı ve ayrı ayrı nesne biçiminde değerlendirilebilir olduğu gösterilmektedir.



Şekil 6. (a) Morfolojik işlem öncesi bitişik taşlar **(b)**Morfolojik işlem sonrası ayrıştırılan taşlar

3 Materyal

Yapılan çalışmada 20 hastaya ait abdominal BT görüntülerinden oluşan veri seti kullanılmıştır. Veri seti bilateral veya tek taraflı böbrek taşı oluşumlarına sahip ve böbrek taşı olmayan hastalara ait görüntülerden oluşmaktadır [12, 13]. Veri seti yaş ortalaması 40 olan kadın ve erkek hastalara ait abdominal BT görüntülerinden oluşmaktadır.

Görüntülerde görsel inceleme sonucu elde edilen her bir hastaya ait sağ ve sol böbreklerde bulunan taşların sayıları **Tablo 1**'de verilmiştir. Veri seti bilateral, tek taraflı, çoklu ve bir taşa sahip hastalardan alınan görüntülerden oluşmaktadır.

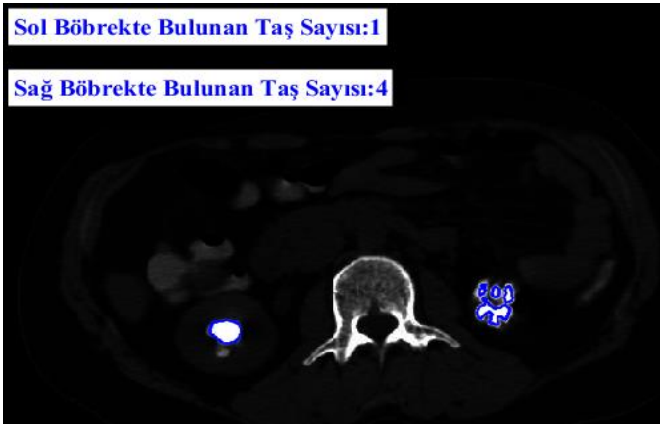
Tablo 1. Böbreklerde tespit edilen taşların sayısı

Hasta	Taş Sayısı	
	Sol Böbrek	Sağ Böbrek
1	1	0
2	0	0
3	1	1
4	1	0
5	3	1
6	1	4
7	0	0
8	1	0
9	1	1
10	1	1
11	0	0
12	2	2
13	4	3
14	0	1
15	1	2
16	2	3
17	0	0
18	3	2
19	0	0
20	1	0

4 Sonuçlar

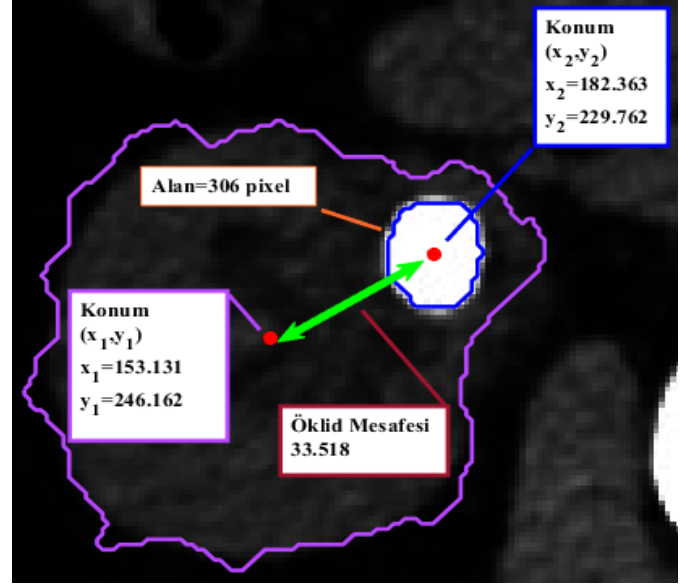
Bu bölümde abdominal BT görüntülerinde böbreklerde bulunan taşların tespitine ilişkin incelemeler yapılmıştır. Önerilen yöntem veri setindeki görüntülere uygulanmış ve Tablo 1’de verilen değerlere göre sistem performansı görsel ve sayısal olarak değerlendirilmiştir.

BT görüntülerindeki böbrek taşlarının konumlarının, sınırlarının ve sayılarının görsel olarak incelenmesi, önerilen yöntemin başarımının test edilmesi için gereklidir. Örnek bir abdominal BT görüntüsü Şekil 7’de verilmiştir. Önerilen yöntemle bulunan böbreklerdeki taşların sayısı kullanıcıya bilgi vermek için yazılmış ve taşların sınırları görüntü üzerinde çizdirilmiştir. Şekil 7’de verilen görüntü incelendiğinde böbrekte bulunan taşların sayılarının ve sınırlarının önerilen yöntem ile başarılı bir şekilde bulunduğu görülmektedir.



Şekil 7. Önerilen yöntemle tespit edilen taşların sayısı ve sınırları

Yapılan çalışmada böbreklerin ve böbrekte bulunan taşların merkez konumları bulunmuştur. Ayrıca bu konumlar arasındaki uzaklık Öklid Mesafesi kullanılarak hesaplanmıştır. Böbreklere ve taşlara ait ağırlık merkezlerinin işaretlendiği ve koordinat bilgilerinin verildiği örnek görüntü Şekil 8’de verilmiştir. Bu koordinat bilgileri ile hesaplanan Öklid Mesafesi = 33.518 olarak bulunmuştur. Ayrıca taşın piksel temelli alanı 306 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 8. Böbrek ve taşlara ait ağırlık merkezleri ve bu merkezler arasındaki Öklid Mesafesi

Çalışma sonuçlarının performans değerlendirmesinde hata matrisi kullanılmıştır [11]. Görsel incelemede sağ böbrekte 21 ve sol böbrekte 23 olmak üzere toplam 44 taş belirlenmiştir. Algoritma sonucu tahmin, görsel inceleme sonucu gerçek olmak üzere aşağıda verilen tanımlara göre hata matrisi oluşturulmuştur.

- True Positive (TP): Böbrekte taş varsa ve algoritma tarafından da taş var olarak etiketleniyorsa bu sonuç doğru pozitifdir.
- True Negative (TN): Böbrekte taş yoksa ve algoritma tarafından da taş yok olarak etiketleniyorsa bu sonuç doğru negatiftir.
- False Negative (FN): Böbrekte taş varsa ve algoritma tarafından taş yok olarak etiketleniyorsa bu sonuç yanlış negatiftir.
- False Positive (FP): Böbrekte taş yoksa ve algoritma tarafından taş var olarak etiketleniyorsa bu sonuç yanlış pozitifdir.

Önerilen yöntemde $T = 200$ ve $\gamma = 3$ değerleri seçilerek görüntü iyileştirilmiş ve bu görüntülere morfolojik işlemler uygulanarak taşlar hakkında sonuçlar (taş var/yok) elde edilmiştir. Hata matrisi için verilen tanımlara göre TP, TN, FP, FN değerleri hesaplanarak Tablo 2 oluşturulmuştur. Burada doğru pozitif sayısı $TP = 42$, yanlış pozitif sayısı $FP = 0$, doğru negatif sayısı $TN = 15$ ve son olarak yanlış negatif sayısı $FN = 2$ şekline hesaplanmıştır.

Tablo 2. Hata matrisi

		TAHMİN		
		YOK	VAR	TOPLAM
Gerçek	YOK	TN=15	FP=0	15
	VAR	FN=2	TP=42	44
	TOPLAM	17	42	59

Hata matrisindeki sonuçlara göre doğruluk, hassasiyet ve özgüllük değerleri sırası ile [Denklem \(5\)](#), [\(6\)](#) ve [\(7\)](#) kullanılarak hesaplanır.

$$\text{Doğruluk} = \frac{TN + TP}{TN + TP + FN + FP} \times 100 \quad (5)$$

$$\text{Hassasiyet} = \frac{TP}{FN + TP} \times 100 \quad (6)$$

$$\text{Özgüllük} = \frac{TN}{FP + TN} \times 100 \quad (7)$$

Performans analizi için oluşturulan hata matrisi gerçekte olan değerler ile algoritma sonucunda elde edilen değerlerin karşılaştırılması ile oluşturulmuştur. Gerçekte toplam taş sayısı 44, algoritma ile tahmin edilen taş sayısı 42'dir. Hata matrisinde verilen değerler [Denklem \(5\)](#), [\(6\)](#) ve [\(7\)](#)'de yerlerine koyularak sırasıyla **Doğruluk = %97**, **Hassasiyet = %96**, **Özgüllük = %100** olarak hesaplanmıştır. Ayrıca morfolojik aşındırma ve genişletme işlemleri uygulanmadan önerilen çalışmanın performansı test edilmiştir. Eşik seviyesi aynı kalmak koşulu ile ($T = 200$) önerilen yöntemin performans parametreleri sırasıyla, **Doğruluk = %93**, **Hassasiyet = %95**, **Özgüllük = %88** bulunmuştur. Morfolojik işlemlerin uygulanması ile algoritma performansı artmıştır. Bu sayede önerilen yöntemin, görüntüyü değerlendirecek uzmana kolaylık sağlaması beklenmektedir.

5 Tartışma

Bu çalışmada abdominal BT görüntülerinde böbrek taşlarının yerlerinin tespiti, sınırlarının belirlenmesi, etiketlenmesi ve sayılması amaçlanmıştır. Görüntü ön işleme uygulamalarında sıklıkla kullanılan Gama Düzeltmesi görüntülerin netleştirilmesi ve gürültülerin giderilmesi için kullanılmıştır. Bu sayede böbreklerin kenar takibi doğru bir şekilde sağlanmıştır. Abdominal görüntülerde sadece böbrekler ile ilgilenildiğinden böbrek bölgeleri kullanıcı tarafından ROI işlevi ile seçilmiştir. Gri seviyedeki böbrek görüntülerine belirlenen eşik değeri uygulanarak ikili görüntü oluşturulmuş ve taşların ağırlık merkezi konumları, alanları ve sınırları tespit edilmiştir. Taş sınırları ve sayılarının daha iyi belirlenebilmesi için Morfolojik işlemler uygulanmıştır. Bu sayede görüntüde taş olmayan küçük

nesnelere yok edilmiş, bitişik taşlar ayrıştırılmış ve daha doğru bir taş sayımı gerçekleştirilmiştir. Belirlenen performans kriterlerine göre önerilen yöntem, taşların sayılarını ve sınırlarını başarılı bir şekilde bulmaktadır. Çalışma geliştirilmeye ve ilerlemeye açıktır. Örneğin kullanıcı müdahalesinin asgari düzeyde olduğu otomatik bir sistem geliştirilebilir. Buradan hareketle çalışmanın ilerleyen aşamalarında böbrek bölgelerinin otomatik bulunması için gerekli yöntemlerin incelenmesi ve uygulanması planlanmaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışmasının olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %13

Kaynakça

- [1] N. Thein, H. A. Nugroho, T. B. Adji, and K. Hamamoto, An image preprocessing method for kidney stone segmentation in CT scan images. International Conference on Computer Engineering, Network and Intelligent Multimedia (CENIM), pp. 147-150, 2018.
- [2] W. Kittanamongkolchai etc., The Changing Incidence and Presentation of Urinary Stones Over 3 Decades, Mayo Clinic Proceedings, 291-299, 2018. <https://doi:10.1016/j.mayocp.2017.11.018>.
- [3] T. Shah and S. Kadge, Analysis and identification of renal calculi in computed tomography images. International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE), pp. 1-4, Navi Mumbai, India, Ocak 2019.
- [4] S. Ebrahimi and V. Y. Mariano, Image quality improvement in kidney stone detection on computed tomography images. institute of computer science. University of the Philippines Los Baños, Laguna, Philippines. *JOIG*, 3 (1), 2015. <https://doi:10.18178/joig.3.1.40-46>.
- [5] Dr. P. Akkasaligar, S. Biradar, and V. Kumbar, Kidney stone detection in computed tomography images. International Conference On Smart Technologies For Smart Nation (SmartTechCon), pp. 353-356, Bengaluru, India 2017.
- [6] M. Deger ve İ. A. Aridogan, Perkutan nefrolitotomide komplikasyonlar ve yaklaşım. Çukurova Anestezi ve Cerrahi Bilimler Dergisi, 2 (2), 2019. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/jocass/issue/48421/605065>
- [7] Medullary Sponge Kidney <https://radiopaedia.org/case/s/medullary-sponge-kidney-8?lang=us>, Accessed 17 January 2021.
- [8] M. Sahnoun, F. Kallel, M. Dammak, C. Mhiri, K. Ben Mahfoudh, and A. Ben Hamida, A comparative study of MRI contrast enhancement techniques based on Traditional Gamma Correction and Adaptive Gamma Correction: Case of multiple sclerosis pathology. 4th International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP), pp. 1-7. Sousse, Mar. 2018.
- [9] Rafael C. Gonzales and Richard E. Woods, Digital Image Processing, 2014.

- [10] S. Çınar and M. N. Kurnaz, Segmentation of medical images by using k-NN classifier on Field Programmable Logic Array (FPGA). National Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering p.5 Bursa, Turkey, 2010.
- [11] S. Çınar, Design of an automatic hybrid system for removal of eye-blink artifacts from EEG recordings, Biomedical Signal Processing and Control. c. 67, s. 102543, May. 2021, <https://doi: 10.1016/j.bspc.2021.102543>.
- [12] MedPix <https://medpix.nlm.nih.gov/home> Accessed 14 May 2021.
- [13] Articles Radiopaedia <https://radiopaedia.org/encyclopedia/all/all?lang=us>, Accessed 14 May 2021.





Metaheuristic optimization of predictive torque control for induction motor control

Asenkron motor kontrolü için öngörülü moment kontrolünün metasezgisel optimizasyonu

Aycan Gürel¹ , Emrah Zerdali^{2,*} 

¹Niğde Ömer Halisdemir University, Department of Electrical and Electronics Engineering, 51200, Niğde Turkey

²Ege University, Department of Electrical and Electronics Engineering, 35100, Izmir Turkey

Abstract

Predictive torque control (PTC) is a high-performance control method of induction motors (IMs), which is still open to research. It provides many advantages over mature control techniques, such as straightforward implementation, the ability to handle nonlinearities, easy inclusion of additional control objectives, and modulator-free structure. However, it has problems with the selection of weighting factors (WFs) involved in the cost function in PTC. In conventional PTC, these WFs are generally selected by the trial-and-error method. Also, a few studies optimize these WFs with a multi-objective optimization algorithm using both torque and flux errors. In this paper, the WF associated with the flux component is optimized by a genetic algorithm over the speed errors only. The optimized PTC is verified by simulation studies considering different operating conditions. Finally, good control performance has been achieved.

Keywords: Induction motor, Predictive torque control, Metaheuristic optimization

1 Introduction

Nowadays, the importance of electrical machines is increasing day by day due to the increase in electrification and induction motor (IM) is one of the most widely used energy conversion equipment. Therefore, high-performance control of IMs is a key point for the quality of energy conversion. However, highly nonlinear structure of IM with time-varying parameters and unknown inputs complicates the control of these motors; hence, advanced control techniques are needed [1, 2]. Predictive torque control (PTC), which is a model predictive control strategy, is a powerful candidate due to its advantages such as straightforward implementation, the ability to handle nonlinearities, easy inclusion of additional control objectives, modulator free structure, etc [3, 4].

Despite all the advantages mentioned above, PTC has problems with the weighting factors (WFs) selection, variable switching frequency, torque ripples, parameter dependency; therefore, it is still open to research [1]. The most effective is strictly related to the choice of the WFs as

Özet

Öngörülü moment kontrolü (ÖMK), asenkron motorların (ASM'lerin) hala araştırmaya açık olan yüksek başarılı kontrol yöntemlerinden biridir. Olgun kontrol tekniklerine kıyasla basit uygulama, doğrusal olmayan durumlarla başa çıkma yeteneği, ek kontrol hedeflerinin kolay dahil edilmesi ve modülatör içermeyen yapı vb. birçok üstünlük sağlamaktadır. Ancak, ÖMK maliyet fonksiyonunda yer alan ağırlıklandırma faktörlerinin (AF'lerin) seçimi ile ilgili sorunlara sahiptir. Geleneksel ÖMK'de bu AF'ler genellikle deneme-yanılma yöntemiyle seçilmektedir. Ayrıca, birkaç çalışma bu AF'leri hem moment hem de akı hatalarını kullanarak çok-amaçlı bir optimizasyon algoritması ile optimize eder. Bu çalışmada, akı bileşeniyle ilişkili AF, yalnızca hız hataları üzerinden bir genetik algoritma ile optimize edilmiştir. Optimize edilmiş ÖMK, farklı çalışma koşulları dikkate alınarak benzetim çalışmaları ile doğrulanmıştır. Son olarak, iyi bir kontrol performansı elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Asenkron motor, Öngörülü moment kontrolü, Metasezgisel optimizasyon

it directly affects its control performance [5]. In conventional PTC, these WFs are determined by a time-consuming trial-and-error method. To deal with this problem, different methods have been reported in the literature. The solutions can be divided into two main categories: WF selection methods [6–8] and WF elimination methods [9–15]. Considering the WF selection methods, one is meta-heuristic optimization of the WFs and a very limited number of studies optimizing the weighting factors have been addressed [6–8]. A multiobjective genetic algorithm (GA) is used by Guazzelli et al. [6] for the optimization of WFs and the results obtained are discussed comparatively. However, no selection method is proposed to choose one of the Pareto front solutions. To select one, Arshad et al. [7] use the TOPSIS algorithm. Unlike the other offline optimization methods, Davari et al. [8] use a simulated annealing (SA) algorithm online to optimize the WF associated with flux error. In the cost function of the SA, both torque and flux errors are used to create a single cost function called the scalarization method. This method has its drawback as stated

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: emrah.zerdali@ege.edu.tr (E. Zerdali)

Geliş / Received: 11.07.2021 Kabul / Accepted: 19.08.2021 Yayınlanma / Published: 14.01.2022

doi: 10.28948/ngumuh.969734

by [16]. All previous papers manage this optimization problem from a multi-objective perspective so far.

In this paper, the WF associated with the flux component is optimized by a GA over speed errors only. Contrary to the current literature that treats WF optimization as a multi-objective optimization problem, only the use of speed errors allows the optimization problem to be simplified. The reason for using a GA is that it is a mature method used in the optimization of different engineering problems and allows comparison with previous WF optimization studies in [6] and [7]. To show the effectiveness of the proposed method, the control performance of optimized PTC has been verified by simulation studies.

The rest of this paper is as follows. Section 2 gives the details of the PTC strategy for IM control. Section 3 introduces the optimization of the PTC. Section 4 presents the simulation results, followed by the conclusion in Section 5.

2 Predictive torque control of induction motor

In this section, firstly, the mathematical model of an IM fed by a two-level voltage source inverter (2L-VSI) is given. Next, the PTC strategy for IM control is addressed in detail.

2.1 Mathematical model of induction motor

The mathematical model of IM can be defined as follows:

$$\mathbf{v}_s = R_s \mathbf{i}_s + \frac{d\boldsymbol{\psi}_s}{dt} \quad (1)$$

$$0 = R_r \mathbf{i}_r + \frac{d\boldsymbol{\psi}_r}{dt} - j\omega_r \boldsymbol{\psi}_r \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\psi}_s = L_s \mathbf{i}_s + L_m \mathbf{i}_r \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\psi}_r = L_m \mathbf{i}_s + L_r \mathbf{i}_r \quad (4)$$

$$\tau_e = \frac{3}{2} p_p \Im m(\boldsymbol{\psi}_s \mathbf{i}_s) \quad (5)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J_t} (\tau_e - \tau_l) \quad (6)$$

where $\mathbf{v}_s = v_{s\alpha} + jv_{s\beta}$ is the voltage vector; $\mathbf{i}_s = i_{s\alpha} + ji_{s\beta}$ and $\mathbf{i}_r = i_{r\alpha} + ji_{r\beta}$ are the stator and rotor current vectors, respectively; $\boldsymbol{\psi}_s = \psi_{s\alpha} + j\psi_{s\beta}$ and $\boldsymbol{\psi}_r = \psi_{r\alpha} + j\psi_{r\beta}$ are the stator and rotor flux vectors; R_s and R_r are the stator and rotor resistances, respectively; L_s , L_r , and L_m are the stator, rotor, and mutual inductances, respectively; ω_r and ω_m are the rotor electrical and mechanical speeds, respectively; τ_e and τ_l are the electromagnetic torque and load torque, respectively; p_p is the pole pairs; J_t is the total inertia of the mechanical system. $\Im m$ refers to the imaginary part of a complex number.

In case the stator terminals of an IM are connected to a 2L-VSI shown in Figure 1a, stator voltage vectors can be calculated as

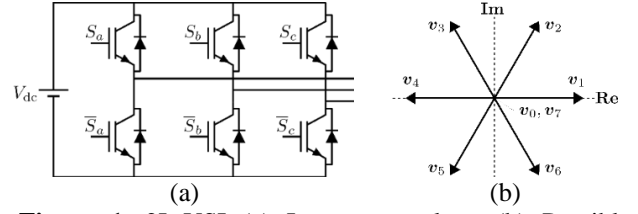


Figure 1. 2L-VSI (a) Inverter topology (b) Possible voltage vectors

$$\mathbf{v}_s = \frac{2}{3} V_{dc} (S_a + aS_b + a^2S_c) \quad (7)$$

where V_{dc} is the dc-link voltage, $S_x \in \{S_a, S_b, S_c\}$ is the switching state of the upper switch on each leg, $a = e^{j2\pi/3}$. Considering the eight possible switching combinations, seven different voltage vectors shown in Figure 1b can be generated.

2.2 PTC-based IM drive

The block diagram of the PTC-based IM drive is shown in Figure 2. In this control technique, the optimal voltage vector for the next time step $k + 1$ is chosen by using discrete-time IM model and a predefined cost function. For this purpose, the stator fluxes ($\boldsymbol{\psi}_s^p$) and currents (\mathbf{i}_s^p) can be predicted with the help of the discrete IM model for each voltage vector shown in Figure 1b. Next, the predicted electromagnetic torque (τ_e^p) can be calculated using these predicted quantities. Finally, optimal voltage vector is selected that minimizes the predefined cost function.

In order to predict the $\boldsymbol{\psi}_s^p$ and \mathbf{i}_s^p , rotor ($\boldsymbol{\psi}_r$) and stator ($\boldsymbol{\psi}_s$) fluxes are needed. The $\boldsymbol{\psi}_r$ can be estimated by the rotor current model of IM and then $\boldsymbol{\psi}_s$ can be calculated by using estimated $\boldsymbol{\psi}_r$ as given below.

$$\hat{\boldsymbol{\psi}}_{r,k} = \hat{\boldsymbol{\psi}}_{r,k-1} + T \left(R_r k_r \mathbf{i}_{s,k} - \left(\frac{1}{T_r} - j\omega_{r,k} \right) \hat{\boldsymbol{\psi}}_{r,k-1} \right) \quad (8)$$

$$\hat{\boldsymbol{\psi}}_{s,k} = k_r \hat{\boldsymbol{\psi}}_{r,k} + L_\sigma \mathbf{i}_{s,k} \quad (9)$$

where $k_r = L_m/L_r$, $\tau_r = L_r/R_r$, and $L_\sigma = L_s - L_m^2/L_r$.

To this end, the expression of the $\boldsymbol{\psi}_s^p$ and \mathbf{i}_s^p in discrete form can be defined as follows:

$$\boldsymbol{\psi}_{s,k+1}^p = \hat{\boldsymbol{\psi}}_{s,k} + T(\mathbf{v}_{s,k} - R_s \mathbf{i}_{s,k}) \quad (10)$$

$$\mathbf{i}_{s,k+1}^p = \left(1 - \frac{T}{\tau_\sigma} \right) \mathbf{i}_{s,k} + \frac{T}{\tau_\sigma R_\sigma} \left(k_r \left(\frac{1}{\tau_r} - j\omega_{r,k} \right) \hat{\boldsymbol{\psi}}_{r,k} + \mathbf{v}_{s,k} \right) \quad (11)$$

where $R_\sigma = R_s + k_r^2 R_r$ and $\tau_\sigma = L_\sigma/R_\sigma$.

Using predicted $\boldsymbol{\psi}_s^p$ and \mathbf{i}_s^p , τ_e^p can be calculated as follows:

$$\tau_{e,k+1}^p = \frac{3}{2} p_p \Im m(\boldsymbol{\psi}_{s,k+1}^p \mathbf{i}_{s,k+1}^p) \quad (12)$$

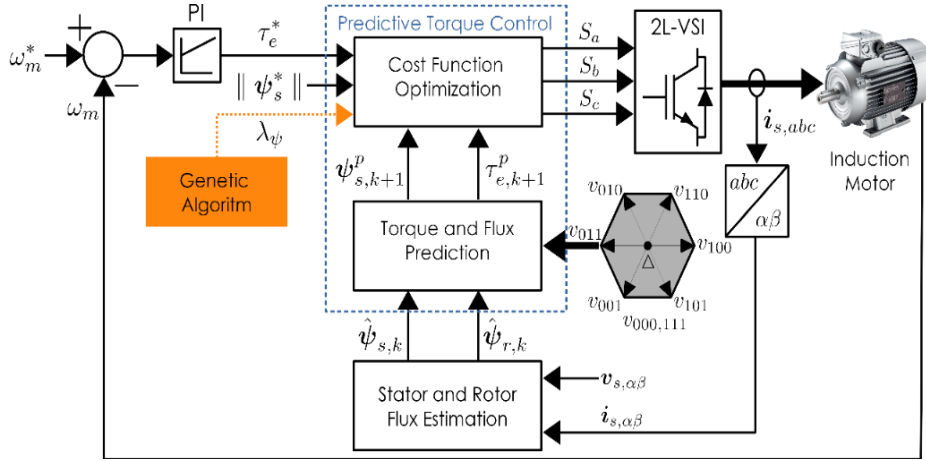


Figure 2. Optimized PTC-based IM drive

The cost function of the PTC given in Equation (13) consists of two components: torque error component and flux error component. In traditional PTC, the weighting factor of the torque component is assumed as one, whereas the weighting factor of the flux component (λ_ψ) is higher than one. Also, one additional component (I_m) protecting the IM from overcurrents can be included as in Equation (13). The definition of the I_m is given in Equation (14).

$$g_i = |\tau_e^* - \tau_{e,k+1}^p| + \lambda_\psi \left| |\psi_s^*| - |\psi_{s,k+1}^p| \right| + I_{m,k+1} \quad (13)$$

$$I_{m,k+1} = \begin{cases} 0, & \text{if } |i_{s,k+1}^p| \leq |i_{s,\max}| \\ \infty, & \text{if } |i_{s,k+1}^p| > |i_{s,\max}| \end{cases} \quad (14)$$

Table 1. GA Parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
Population Size	30	Crossover Rate	0.8
Maximum Gen.	20	Crossover Func.	Single Point
Lower Bound	0.1	Mutation Rate	0.05
Upper Bound	200	Mutation Func.	Uniform

3 Metaheuristic optimization of predictive torque control

In this section, the λ_ψ is optimized by a GA through speed errors only. For this purpose, both PTC and GA have been implemented in Matlab R2016b. The parameters for the GA used in optimization are given in Table 1. The cost function of the GA is as follows:

$$f_{\text{cost}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\omega_{m,i}^* - \omega_{m,i})^2 \quad (15)$$

To eliminate the adverse effect of random behavior of meta-heuristic optimization algorithms, the optimization process has been repeated ten times. The statistics of the optimized parameter for all runs is shown as a boxplot in Figure 3. Among these optimized parameters, four different values (i.e., maximum value, median value, minimum value, and an outlier value) marked in Figure 3 have been selected

to use in simulation studies. In this way, it is possible to show the effect of different WFs.

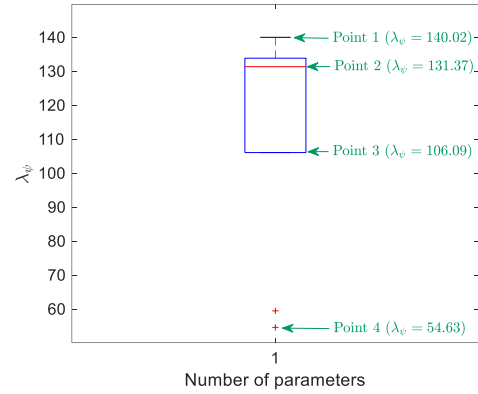


Figure 3. Boxplot representation of ten optimization results

4 Results

In simulation studies, a 3-phase squirrel cage type IM with the specifications in Table 2 is used. The speed controller is of PI-type and the sampling time is 50 μ s. To test the optimized PTC, different operating conditions have been considered in simulation studies. To this end, the first test focuses on performance evaluation at low speeds, while the second test evaluates optimized PTCs at higher speeds. Both tests include the operations with and without load so that the proposed selection method can be evaluated in different operating conditions. The resulting control performances for both tests are shown in Figure 4 and 5, respectively.

Table 2. The specifications of the IM

Parameter	Value	Parameter	Value
P	3 kW	R_s	2.283 Ω
V	380 V	R_r	2.133 Ω
I	6.9 A	L_m	0.22 H
f	50 Hz	L_s	0.2311 H
p_p	2	L_r	0.2311 H
n_m	1430 r/min	J_t	0.0183 kg.m ²
τ_l	20 Nm	B_t	0.001 N.m.s

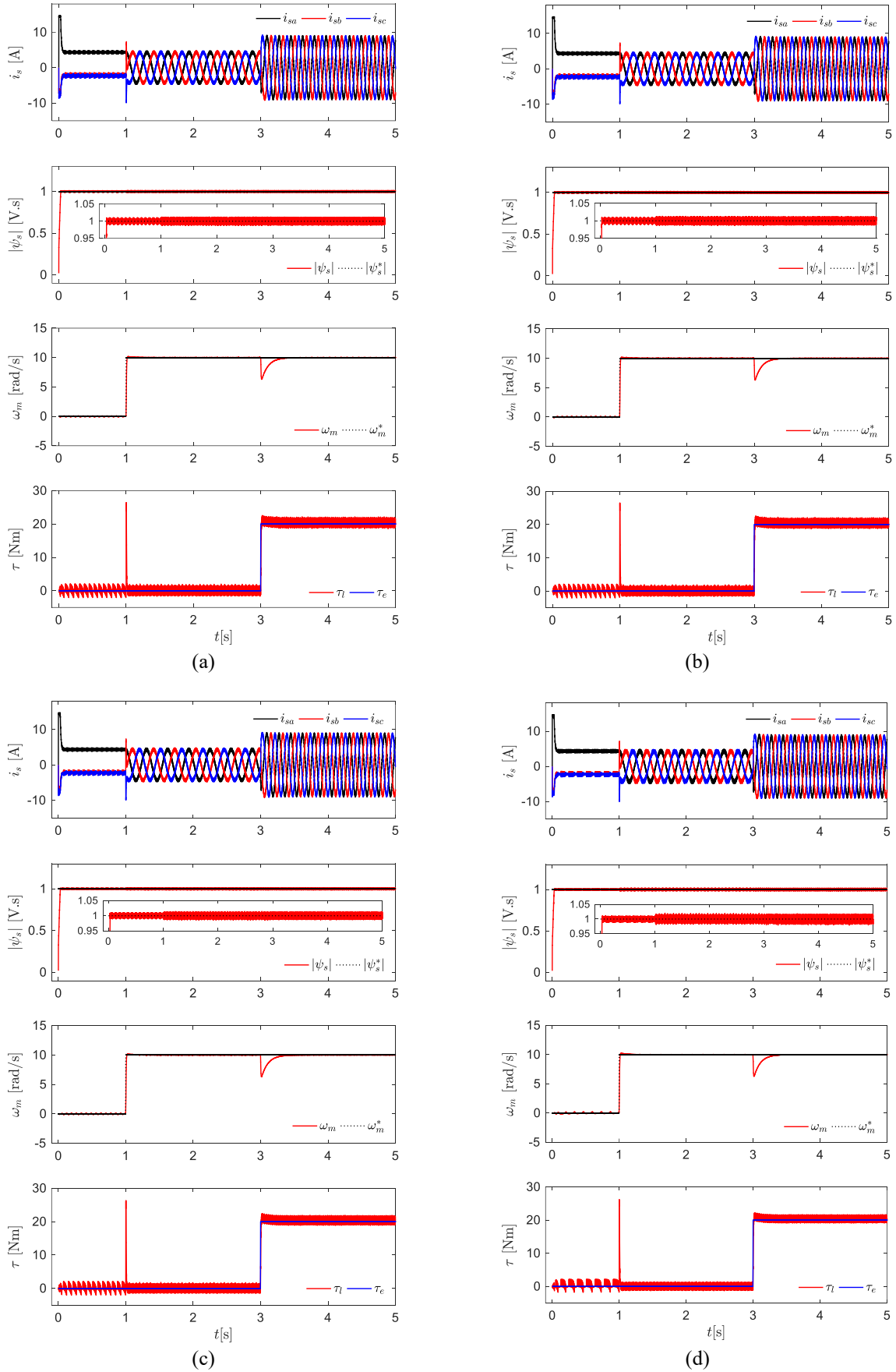


Figure 4. Control performance of the optimized PTC at 10 rad/s for a) Point 1 b) Point 2 c) Point 3 d) Point 4

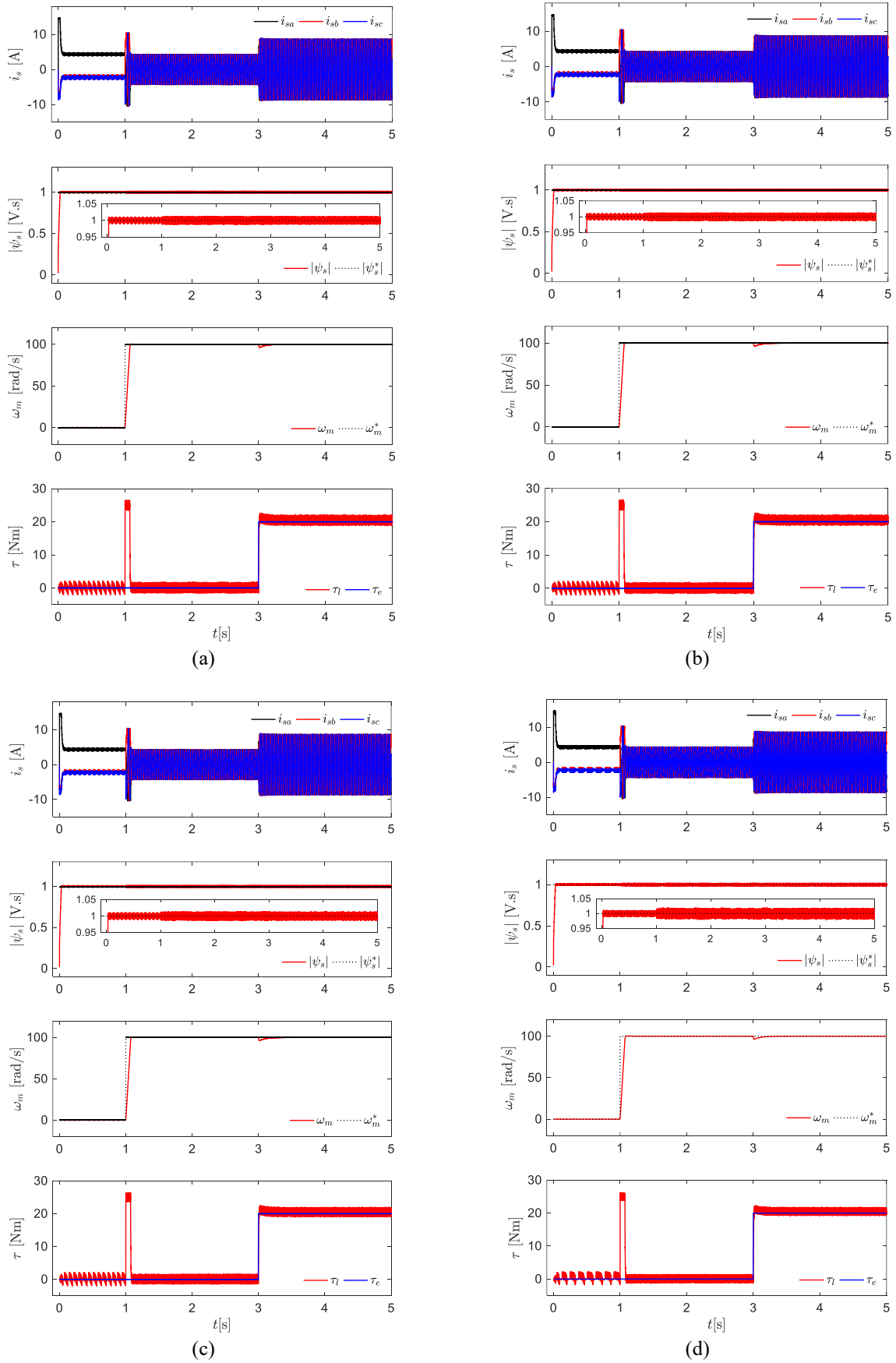


Figure 5. Control performance of the optimized PTC at 100 rad/s for a) Point 1 b) Point 2 c) Point 3 d) Point 4

Table 3. Statistics for Figure 4 and 5

Speed	Load Condition	Point	$T_{rip}(\%)$	$\psi_{rip}(\%)$	THD(%)	f_{avg}
10 rad/s	No-Load	1	9.93	1.25	8.01	1.38 kHz
		2	9.53	1.31	8.02	1.42 kHz
		3	9.07	1.40	8.04	1.50 kHz
		4	7.12	1.97	8.80	1.89 kHz
	20 Nm	1	8.85	1.20	4.11	1.36 kHz
		2	8.58	1.25	4.09	3.49 kHz
		3	7.53	1.36	4.11	3.65 kHz
		4	6.24	1.82	4.53	4.58 kHz
100 rad/s	No Load	1	8.79	1.31	8.89	9.25 kHz
		2	8.77	1.34	8.95	9.33 kHz
		3	7.93	1.45	8.89	9.68 kHz
		4	6.82	2.05	9.57	10.85 kHz
	20 Nm	1	8.62	1.21	4.22	8.94 kHz
		2	8.50	1.27	4.19	8.94 kHz
		3	7.57	1.40	4.22	9.17 kHz
		4	6.71	1.90	4.68	9.69 kHz

The percentage torque (T_{rip}) and flux (ψ_{rip}) ripples, total harmonic distortions (THDs) of the stator currents (phase- a only), and average switching frequencies (f_{avg}) have been calculated for the time intervals of $1.5 \leq t \leq 2.5$ s and $3.5 \leq t \leq 4.5$ s of Figure 3 and 4. These values can be found in Table 3.

Considering the control performances in Figure 3 and 4 and the statistics in Table 3, the following comments can be made:

- All optimized λ_{ψ} values lead to adequate control performance as seen in Figure 3 and 4. The question is which one is better?
- For all test points considered, larger λ_{ψ} values result in a reduction in flux ripples, total harmonic distortions and average switching frequency but an increase in torque ripples. In this respect, the selection is application-dependent. Larger values should be selected to reduce torque ripples while lower values should be chosen to reduce the flux ripples, average switching frequency, total current distortions.
- Point 3 provides a trade-off between torque ripples and flux ripples/average switching frequency/total current distortions.

5 Conclusion

In this paper, the WF in PTC has been optimized by a GA through speed errors only and the optimized PTC has been tested by simulation studies. To show the effectiveness of the optimized PTC, different operating conditions have been considered in simulation studies. The results demonstrate that the proposed method is an effective solution in determining WFs with a simplification of the optimization problem. It also reveals the relationships between the WF and torque ripples/flux ripples/average switching frequency/total harmonics distortions. However, the number of WFs has been limited to one in this paper. Future studies will focus on the optimization of more WFs associated with additional control objectives.

Conflict of Interest

The author has no conflicts of interest to declare.

Similarity (iThenticate): % 15

Kaynaklar

- [1] J. Rodriguez, R. M. Kennel, J. R. Espinoza, M. Trincado, C. A. Silva, and C. A. Rojas, High-performance control strategies for electrical drives: an experimental assessment. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 59(2), 812-820, 2012. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2158778>.
- [2] F. Wang, Z. Zhang, X. Mei, J. Rodríguez, and R. Kennel, Advanced control strategies of induction machine: field oriented control, direct torque control and model predictive control. *Energies*, 11(1), 120, 2018. <https://doi.org/10.3390/en11010120>.
- [3] F. Wang, S. Li, X. Mei, W. Xie, J. Rodríguez, and R. M. Kennel, Model-based predictive direct control strategies for electrical drives: An experimental evaluation of PTC and PCC methods. *IEEE Trans. Ind. Inform.*, 11(3), 671-681, 2015. <https://doi.org/10.1109/TII.2015.2423154>.
- [4] S. Kouro, P. Cortes, R. Vargas, U. Ammann, and J. Rodriguez, Model predictive control-a simple and powerful method to control power converters. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 56(6), 1826-1838, 2009. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.2008349>.
- [5] M. Mamdouh, M. A. Abido, and Z. Hamouz, Weighting factor selection techniques for predictive torque control of induction motor drives: A comparison study. *Arab. J. Sci. Eng.*, 43(2), 433-445, 2018. <https://doi.org/10.1007/s13369-017-2842-2>.
- [6] P. R. U. Guazzelli, W. C. de Andrade Pereira, C. M. R. de Oliveira, A. G. de Castro, and M. L. de Aguiar, Weighting factors optimization of predictive torque control of induction motor by multiobjective genetic algorithm. *IEEE Trans. Power Electron.*, 34(7), 6628-6638, 2019. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2834304>.

- [7] M. H. Arshad, M. A. Abido, A. Salem, and A. H. Elsayed, Weighting Factors Optimization of Model Predictive Torque Control of Induction Motor Using NSGA-II with TOPSIS Decision Making. *IEEE Access*, 7, 177595-177606, 2019. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2958415>.
- [8] S. A. Davari, V. Nekoukar, C. Garcia, and J. Rodriguez, Online weighting factor optimization by simplified simulated annealing for finite set predictive control. *IEEE Trans. Ind. Inform.*, 17(1), 31-40, 2021. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.2981039>.
- [9] F. Wang, H. Xie, Q. Chen, S. A. Davari, J. Rodriguez, and R. Kennel, Parallel predictive torque control for induction machines without weighting factors. *IEEE Trans. Power Electron.*, 35(2), 1779-1788, 2020. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2922312>.
- [10] C. A. Rojas, J. Rodriguez, F. Villarroel, J. R. Espinoza, C. A. Silva, and M. Trincado, Predictive torque and flux control without weighting factors. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 60(2), 681-690, 2013. <https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2206344>.
- [11] S. A. Davari, M. Norambuena, V. Nekoukar, C. Garcia, and J. Rodriguez, Even-Handed sequential predictive torque and flux control. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 67(9), 7334-7342, 2020. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2945274>.
- [12] V. P. Muddineni, S. R. Sandepudi, and A. K. Bonala, Finite control set predictive torque control for induction motor drive with simplified weighting factor selection using TOPSIS method. *IET Electr. Power Appl.*, 11(5), 749-760, 2017. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2016.0503>.
- [13] V. P. Muddineni, A. K. Bonala, and S. R. Sandepudi, Grey relational analysis-based objective function optimization for predictive torque control of induction machine. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 57(1), 835-844, 2021. <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.3037875>.
- [14] Y. Zhang and H. Yang, Model-Predictive flux control of induction motor drives with switching instant optimization. *IEEE Trans. Energy Convers.*, 30(3), 1113-1122, 2015. <https://doi.org/10.1109/TEC.2015.2423692>.
- [15] C. A. Rojas, J. R. Rodriguez, S. Kouro, and F. Villarroel, Multiobjective fuzzy-decision-making predictive torque control for an induction motor drive. *IEEE Trans. Power Electron.*, 32(8), 6245-6260, 2017. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2619378>.
- [16] E. Zerdali and M. Barut, The comparisons of optimized extended kalman filters for speed-sensorless control of induction motors. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 64(6), 4340-4351, 2017. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2674579>.





A novel microstrip triple wideband bandstop filter design by using adjacent direct coupled dual-mode resonators

Bitişik direk kuplajlı çift-modlu rezonatörler kullanılarak yeni bir mikroşerit üç geniş bantlı bant tutan filtre tasarımı

Elif Güntürkün Şahin^{1,*} 

¹ Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

Abstract

In this article, a novel triple wideband bandstop filter design is proposed with two adjacent microstrip square loop resonators (MSLR) having different edge lengths. Degenerate modes of the square loop resonators are induced by using direct coupling mechanism. Perturbation and loading elements are located on resonators and used to control reflection zeros between the second and third bands. Even odd mode analysis of a single direct coupled dual-mode resonator is also extracted to elucidate the filter topology. The proposed resonator structure is designed by using a full-wave EM simulator and three different filter responses are obtained from the designed resonator structure. One of the filters is fabricated and, it is observed that measured results are compatible with simulated results

Keywords: Microstrip filter, Wideband, Dual-Mode resonator, Degenerate mode

1 Introduction

According to the recent developments of communication systems, multiple band filters are largely needed because of the density in the frequency band. Microwave filters have an important role to avoid these systems from unwanted signals and interferences, ext. Especially, these structures have compact size, low cost, low mass, high performance and also supply the essential requirements to use the frequency spectrum effectively.

To date, various types of microstrip filters have been investigated to introduce desired band characteristic in wideband applications. Although, there are many examples of bandpass filter (BPF) structures in the literature, multiple wideband bandstop filters (BSF) are quite limited. Dual-mode microstrip resonators (DMR) such as circular ring, triangular patch or square loop resonators have been used to realize microstrip BSF since Wolff exhibit the degenerate modes of a circular DMR [1]. Despite these resonators are generally used in BPF applications, BSF designs which use degenerate modes of DMR have been preferred by the authors commonly. In [2], an example of a direct coupled circular ring resonator is given. Here, this resonator is excited by using asymmetrically coupled feeding lines. The strip width of the resonator has been changed in certain parts

Özet

Bu çalışmada iki adet farklı kenar uzunluğuna sahip birbirlerine bitişik olan mikroşerit kare halka rezonatör kullanılarak yeni bir üç geniş bantlı bant tutan filtre tasarımı yapılmıştır. Kare halka rezonatörler direk kuplaj yöntemi ile beslenerek dejenere modlarının uyarılması sağlanmıştır. Tasarlanan rezonatörler üzerinde perturbasyon ve yüklemeler elemanları var olup, dejenere modların arasındaki kuplaj değişimi ile filtrenin ikinci ve üçüncü bantları arasındaki yansıma sıfırları kontrol edilebilmiştir. Önerilen filtre topolojisini desteklemek için direk kuplajlı tek bir kare halka rezonatörün tek-çift mod analizi yapılmıştır. Geliştirilen rezonatör yapısı bir tam dalga EM benzetim programı kullanılarak tasarlanmış ve bu yapıdan üç farklı filtre cevabı elde edilmiştir. Filtrelerden bir tanesi gerçekleştirilmiş olup, sonuçlar uyum içerisinde

Anahtar kelimeler: Mikroşerit filtre, Geniş band, Çift-mod rezonatör, Dejenere mod

of the loop due to the symmetry axis, to control the degenerate modes which transform into transmission zeros for the bandstop case. A closed rectangular loop resonator loaded with two open half stubs is given in [3]. An adjustable wideband bandstop filter is obtained by using a direct coupled loop resonator. Here, in despite of wide stopband is proposed, filter performance is low because of the filter degree and loop levels of passband. Direct coupled square ring resonators are often preferred in wideband filter design. In [4], perturbation element and open-ended stubs are used together to excite the degenerate modes increased by multiplying the number of resonators. This work suffers from the size of filter and performance of frequency response. Another direct coupled DMR design that has perturbation and L-shaped open loop resonator elements is given in [5] to realize UWB BPF response. Here, authors use the degenerate modes as transmission zeros and natural poles of the filters act as reflection poles. So, wide passband characteristic can be obtained. Besides them, in [6], an asymmetrically direct coupled DMR is excited to control the degenerate modes with loading elements. In this paper, a novel compact triple band BSF design is proposed by using two direct coupled adjacent square loop DMRs having different edge sizes. Loading elements acting as a conductive

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: elifsahin@ohu.edu.tr (E. Güntürkün Şahin)
Geliş / Recieved: 18.08.2021 Kabul / Accepted: 27.09.2021 Yayınlanma / Published: 14.01.2022
doi: 10.28948/ngumuh.983947

patch elements and perturbation elements are used to control the degenerate modes and natural zeros of the filter, thus, reflection zeros (RZs) between the bands and in-band return loss (IL) levels in the stopband can be arranged. Three types of filtering responses (Filter-A, Filter-B and Filter-C) can be obtained by using only one filter structures. To clarify the proposed topology, even odd mode analyses of adjacent resonators are given under weak coupling. One of the filters (Filter-A) is fabricated and measured by using a vector network analyzer. Measured RLs for each band are -0.17 dB, 0.38 dB and 2.46 dB respectively. These results are in good agreement with simulated ones

2 Material and methods

2.1 Resonator analysis

The proposed microstrip DMR with loading elements is illustrated in Figure 1(a). As can be seen from the figure, input and output ports of this resonator are coupled with lumped element capacitors to analyze the proposed resonator. As even odd mode equivalent half circuits constructed by locating electric and magnetic walls to the symmetrical axis of the loaded microstrip DMR are depicted in Figure 1(b) and (c), respectively. In equivalent circuit model, the effect of the loading elements is represented with a shunt capacitor which has jB reactance that can be calculated as,

$$B \approx \frac{1}{Z_{02}} (\theta_2) \quad (1)$$

$$\theta_2 = \frac{2\pi}{\lambda_g} l \quad (2)$$

where Z_{02} , θ_2 and λ_g are the characteristic impedance, electrical length and guided wavelength of the loading elements of dual-mode resonator, respectively. Also, l is the length of the loading elements. In addition, scattering parameters can be calculated by using even odd mode input impedance formulas which are given below,

$$S_{11} = \frac{Z_{even}Z_{odd} - Z_o^2}{\left(\frac{Z_{even} + Z_{odd}}{2} + Z_o\right)^2 - \left(\frac{Z_{even} - Z_{odd}}{2}\right)^2} \quad (3)$$

$$S_{21} = \frac{(Z_{even} - Z_{odd})Z_o}{\left(\frac{Z_{even} + Z_{odd}}{2} + Z_o\right)^2 - \left(\frac{Z_{even} - Z_{odd}}{2}\right)^2} \quad (4)$$

Here, Z_{even} and Z_{odd} are even-odd mode impedance equations, respectively. Also, Z_o is chosen as 50 Ω which is the impedance value of input and output port terminals. As can be seen from Figure 1(b), even-mode input impedance (Z_{even}) for the DMR with loading elements may be expressed as,

$$Z_{even} = \frac{1}{j\omega C_g} + \frac{1}{Y_{r_{even}}} \quad (5)$$

where $Y_{r_{even}}$ is

$$Y_{r_{even}} = jY_{o1} \left[\frac{\left(\frac{B}{Y_{o1}} + \tan \theta_3\right) + \tan \theta_1}{1 - \tan \theta_1 \left(\frac{B}{Y_{o1}} + \tan \theta_3\right)} + \tan \theta_4 \right] \quad (6)$$

Additionally, odd-mode impedance (Z_{odd}) can also be derived according to Figure 1(c),

$$Z_{odd} = \frac{1}{j\omega C_g} + \frac{1}{Y_{r_{odd}}} \quad (7)$$

where $Y_{r_{odd}}$ is

$$Y_{r_{odd}} = jY_{o1} \left[\frac{\left(\frac{B}{Y_{o1}} - \cot \theta_3\right) + \tan \theta_1}{1 - \tan \theta_1 \left(\frac{B}{Y_{o1}} - \cot \theta_3\right)} + \tan \theta_4 \right] \quad (8)$$

Here, Y_{o1} and Y_{o2} are the characteristic admittance, θ_1 , θ_2 , θ_3 and θ_4 are the corresponding electrical length of the resonator and loading elements, respectively. Also, C_g is the gap capacitance between the feed line and DMR. Here, $Y_{r_{even}}$ and $Y_{r_{odd}}$ are the admittance equations without the addition of C_g capacitance for even odd mode case, respectively. As can be seen from the Equations (6) and (8), characteristic impedances and location of the loading elements have effects on both even and odd modes of the circuit. As is well known, even and odd mode resonance conditions can be obtained by equating Z_{even} and Z_{odd} to zero [7].

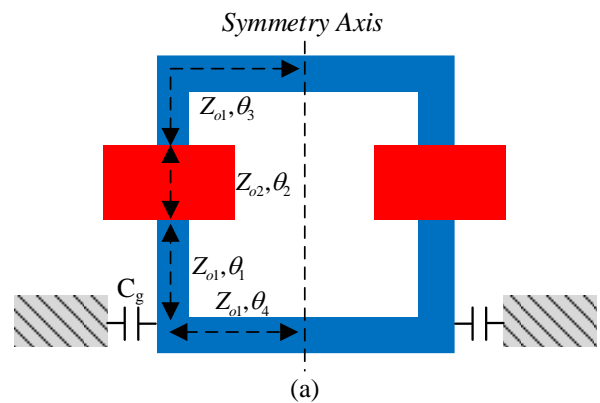


Figure1 (a). Proposed square loop DMR with loading elements

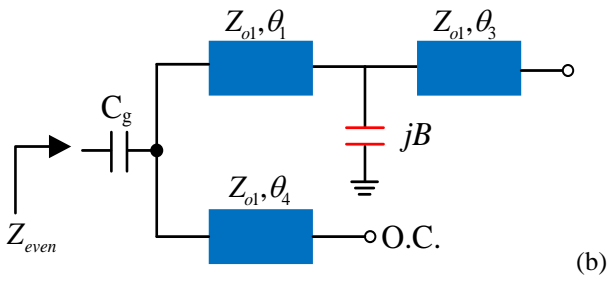


Figure1 (b). Even mode equivalent circuit model

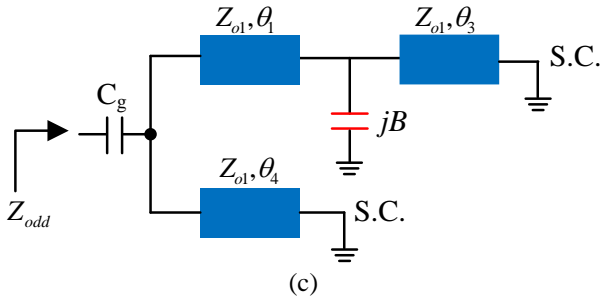


Figure1 (c). Odd mode equivalent circuit model

2.2 Wideband bandstop filter design

The proposed microstrip triple band BSF is shown in Figure 2. As can be seen from the figure, two square loop microstrip resonator with different side lengths are positioned adjacent to each other. Similarly, input and output ports (I/O) are directly connected to the resonator with the smaller side width. In addition, two identical loading elements are located on horizontal axis for each resonator to obtain desired band response. As is well known, degenerate modes of these adjacent DMRs can be excited by means of direct coupled I/O ports and perturbation elements, similar to the reference in [8]. So, the control of reflection zeros between the stop bands is related to the coupling of the degenerate modes.

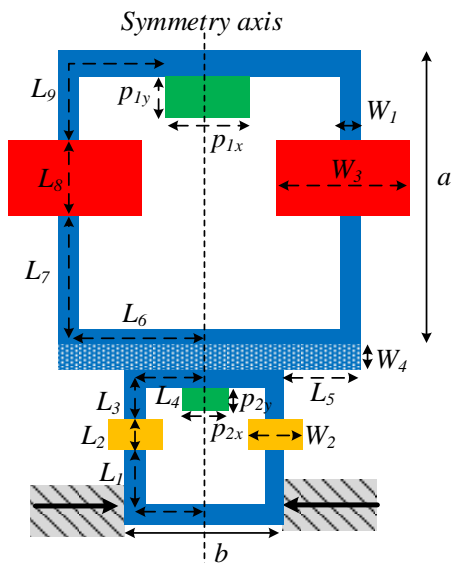


Figure 2. Layouts of the proposed structure

Three different BSF responses named as Filter-A, Filter-B and Filter-C which are obtained by using triple band microstrip DMR design are shown in Figure 3. These filters can be realized by the control of RZs between the second and third band. The variation of loading and perturbation elements allows us to control the RZs by means of the coupling between the bands. As can be seen from the figure, for Filter-A, two RZs ($f_{RZ\#1}$ and $f_{RZ\#2}$) occur in real axis at 10.9 and 11.95 GHz, respectively. Also, for Filter-B, the RZs are shifted through real to imaginary frequency because of the coupling between the modes with respect to the reference in [8].

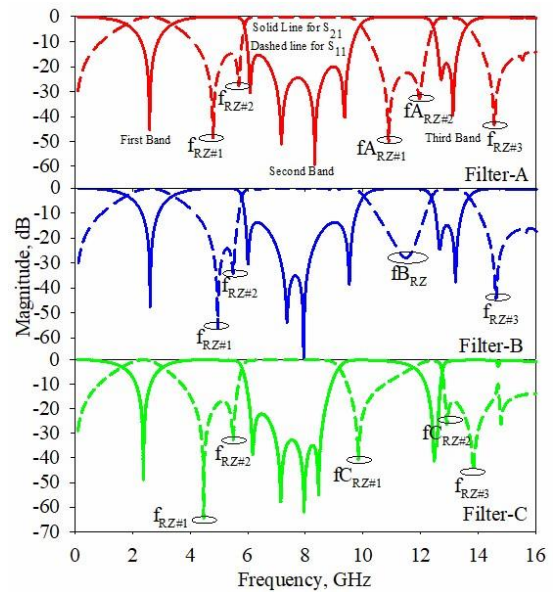


Figure 3. Simulated S-parameters for Filter-A, Filter-B and Filter-C

For Filter-C, two RZs ($f_{RZ\#1}$ and $f_{RZ\#2}$) at 9.84 and 12.915 GHz are realized. As can be seen on figure, for Filter-C, one of the RZs are shifted to the right side of third band. So, it can be said that degenerate modes of the DMRs give the ability to control RZs location on frequency axis. The dimensions (in mm) of loading and perturbation elements of each filter are given in Table 1. Here, p_{1x} and p_{1y} are dimensions of perturbation elements and - (negative sign) means that the perturbation element has a cavity shape. L_8 , W_3 and L_2 , W_2 are loading element dimensions. W_4 is the height of the strip which shortened the coupled two adjacent DMRs.

On the other hand, Figure 4 shows the effect of loading and perturbation elements on the frequency responses. To examine the effect of the perturbation element on each resonator separately, one of them is kept constant and the variation of the other perturbation element is examined. So, it can be seen from Figure 4(a), the effect of each perturbation element has opposite effect on loop levels between the bands and in-band IL levels. Also, in Figure 4(b), the effect of loading elements on the frequency response is investigated in a similar way to the analysis of the effect of perturbation elements. In all cases, its observed that loading elements have similar effects as perturbation

elements despite the bandwidth variation of second and third band. In addition, RZs named as $f_{RZ\#1}$, $f_{RZ\#2}$ and $f_{RZ\#3}$ remain constant as perturbation and loading element dimensions are changing.

Figure 5 shows the simulated current distributions of RZs for Filter-A at $f_{RZ\#1}=4.8$ GHz, $f_{RZ\#2}=5.7$ GHz, $f_{ARZ\#1}=10.9$ GHz, $f_{ARZ\#1}=11.95$ GHz and $f_{RZ\#2}=14.55$ GHz. As can be seen from the figure that the frequencies at 4.8, 5.7, 10.9, 11.95 GHz have similar effect of current distributions, but at 14.55 GHz, the current distribution of the design has a maximum on a part of smaller DMR while on the other part is rejected. This rejection means that at this frequency S_{11} has a value of negative infinite and correspondingly S_{21} has maximum transition value. By using these definitions, it can be said that maximum transmission can be realized by the shortest way between the input and output ports at 14.65 GHz frequency

3 Results and discussions

The proposed triple wideband bandstop filter has had controllable RZs between the second and third band by using

two direct coupled DMRs is depicted in Figure 2. Three triple wideband BSF are simulated via a full-wave EM simulator [9]. The simulated S-parameters is given in Figure 3 and summary of the simulated results of each filter are given in Table 2. One of the filters (Filter-A) which is fabricated on RT/Duroid substrate having thickness of 0.813 mm and a relative dielectric constant of 3.55. In Figure 6(a), the photograph of the fabricated filter and measured results are presented. The filter dimensions (in mm) are $a=9.2$, $b=5.6$, $L_1=2.1$, $L_3=1.9$, $L_4=2.7$, $L_5=1.8$, $L_6=4.6$, $L_7=4.0$, $L_9=6.9$ and $W_1=0.3$. Also, perturbation and loading element dimensions are given in Table 1. Figure 6(b) shows the comparison of the measured and simulated results for Filter-A. Measurements were realized by a Vector Network Analyzer HP8720C. According to the results, f_0 , RL and FBW values are, for first band is 2.545 GHz, 0.47 dB and 62.4%, for second band, 8.04 GHz, 0.034 dB and 52.7% and for third band, 13.407 GHz, nearly 3 dB and 16.3 dB, respectively. Since the sensitivity of the measuring instrument deteriorates at high frequencies, difficulties were experienced in the measurement of the third band.

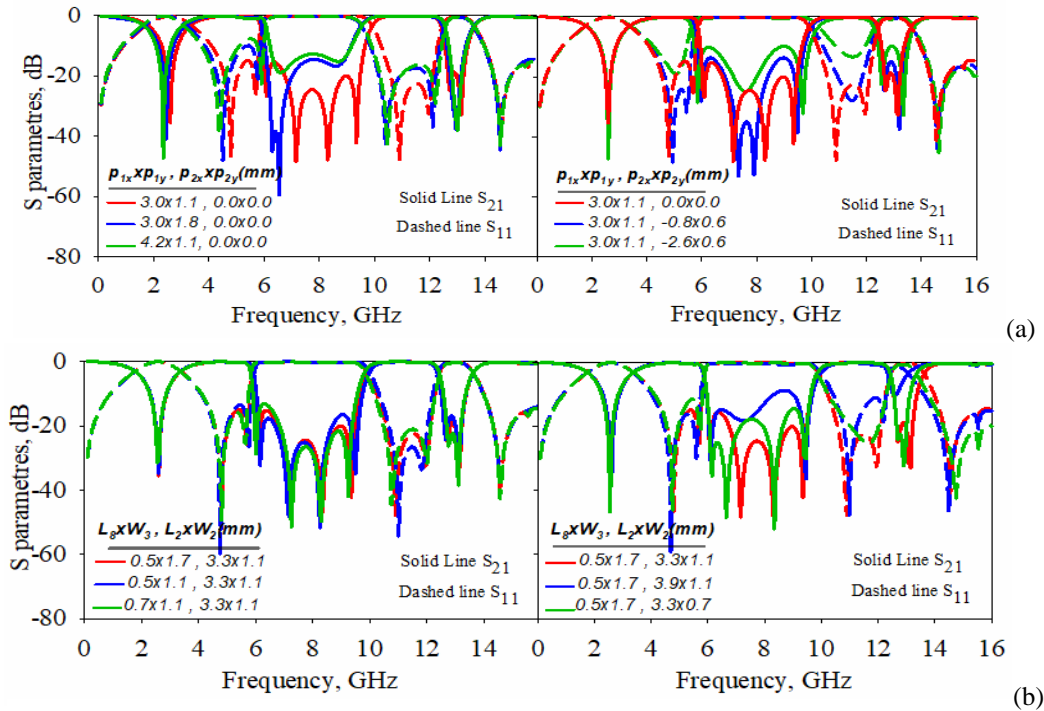


Figure 4. S-parameters variation of Filter-A for(a) perturbation elements (b) loading elements

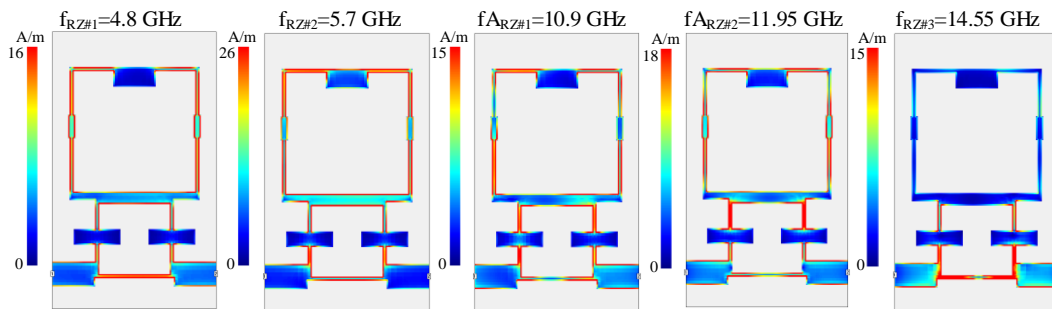


Figure 5. Simulated current distributions for Filter-A at 4.8 GHz, 5.7 GHz, 10.9 GHz, 11.95 GHz and 14.55 GHz

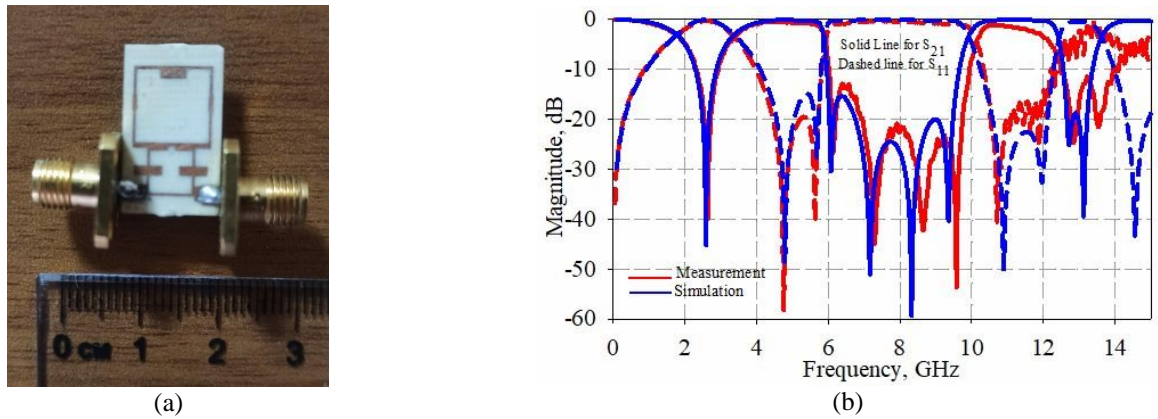


Figure 6. (a) Fabricated filter photograph for Filter-A (b) Comparison of the measured and simulated results for Filter-A

Table 1. The dimensions of loading and perturbation elements for Filter-A, Filter-B and Filter-C

Filter Name	P_{1x}, P_{1y}	P_{2x}, P_{2y}	L_8, W_3	L_2, W_2	W_4
Filter-A	3.0x1.1	-	0.5x1.7	3.3x1.1	0.3
Filter-B	3.0x1.1	-0.8x0.6	0.5x1.7	3.3x1.1	0.3
Filter-C	4.2x1.8	2.6x1.0	0.7x1.1	3.9x1.1	-

Table 2. Simulated results for triple wideband BSFs

Filter Name	First Band			Second Band			Third Band		
	RL (dB)	f_0 (GHz)	FBW (%)	RL (dB)	f_0 (GHz)	FBW (%)	RL (dB)	f_0 (GHz)	FBW (%)
Filter-A	-0.045	2.57	62	-0.13	7.89	51	-0.43	13.025	9
Filter-B	-0.038	2.59	62	-0.12	7.89	54	-0.46	13.01	9
Filter-C	0.047	2.35	60	-0.14	7.48	45	-0.58	12.225	8.2

4 Conclusions

In this study, a novel compact triple wideband BSF design is proposed by using adjacent square loop DMRs having unequal edge sizes. Direct coupling mechanism and perturbation elements are used to realize multiband filtering responses as a result of excitation the degenerate modes of the DMRs. In addition, both loading and perturbation element usage led to the ability to control the RZs between the second and third band. Also, IL levels inside stopband can also be controlled by using these elements. Designed filters have high performance and small size despite having multiple wideband filtering characteristic. Even odd mode analyzes of a single square loop DMR having asymmetrical direct coupling with loading elements are also extracted to clarify the filter topology. Three filters are designed by using a full-wave EM simulator and one of them were manufactured and measured. Simulated and measurement results show a good agreement.

Conflict of Interest

The author has no conflicts of interest to declare

Similarity (iThenticate): % 14

References

[1] I. Wolff, Microstrip bandpass filter using degenerate modes of a microstrip ring resonator. Electronics

- Letters, 8 (12), 302-303, 1972. <https://doi.org/10.1049/el:19720223>.
- [2] M-L. Her, Q-M. Kin, K-Y. Lin, Y-D. Wu and Y-L. Wang, Dual-Mode and Three-Transmission-Zeros bandstop filters with closed-loop ring resonators. Microwave and Optical Technology Letters, 44 (2), 114-118, (2005). <http://dx.doi.org/10.1002/mop.20562>
- [3] B. Shrestha and N-Y. Kim, Adjustable wideband bandstop filter with inductive coupling for ultrawideband applications. Microwave and Optical Technology Letters, 57 (8), 1901-1905, (2015). <http://dx.doi.org/10.1002/mop.29226>
- [4] L-H. Hsieh and K. Chang, Compact, low insertion-loss, sharp-rejection, and wide-band microstrip bandpass filters. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 51 (4), 1241-1246, (2003). <https://doi.org/10.1109/TMTT.2003.809643>
- [5] L. Bousbia, M. Mabrouk and A. Ghazel, Study and modeling of T and L shaped resonators for UWB band pass filter. EuroCon, pp. 1857-1861, Zagreb, Croatia, 2013. <https://doi.org/10.1109/EUROCON.2013.6625230>
- [6] E. Gunturkun Sahin, A. K. Gorur, C. Karpuz and A. Gorur, A novel compact wideband bandstop filter design using a dual-mode square loop resonator. Asia-Pacific Microwave Conference, pp. -, New Delhi, India, (2016). <https://doi.org/10.1109/APMC.2016.7931430>

- [7] J.S. Hong and M.J. Langester, *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*, Wiley, Newyork, 2001.
- [8] A. Gorur, Description of coupling between degenerate modes of a dual-mode microstrip loop resonator using a novel perturbation arrangement and its dual-mode bandpass filter applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 52 (2), 671- 677, (2004). <http://dx.doi.org/10.1109/TMTT.2003.822033>
- [9] *Sonnet User's Manual, Version 14*, Sonnet Software, North Syracuse, NY, 2011.





Afyonkarahisar bölgesi şartlarında bulut hareketlerinin gökyüzü sınıfları tabanlı tahmini

Sky class based prediction of cloud movements in Afyonkarahisar region conditions

Ardan Hüseyin Eşlik^{1,*} , Emre Akarslan² , Fatih Onur Hocaoğlu³ 

^{1,2,3} Afyon Kocatepe Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 03204, Afyonkarahisar Türkiye

Özet

Güneş enerjisinin kesikli ve değişken yapıda olması verimli kullanımını oldukça zorlaştırmaktadır. Bu kesiklik ve değişkenliğin oluşmasındaki en büyük etmen bulut hareketleridir. Gerçekleştirilen çalışmada, bulutların takibi ve hareketlerinin tahmini için akış tabanlı bir algoritmanın performansı Afyonkarahisar bölgesi şartlarında araştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesine bir dijital kamera yerleştirilmiş ve belirli aralıklarla gökyüzü görüntüleri kaydedilmiştir. Elde edilen görüntüler üzerinde bulut ve gökyüzü sınıflandırmaları gerçekleştirilmiştir. Bulutların takibinin gerçekleştirilebilmesi için takibe en uygun köşe noktaları Shi-Tomasi algoritması kullanılarak belirlenmiştir. Bulunan köşe noktaları Lucas-Kanade optik akış algoritması kullanılarak sıralı görüntüler üzerinde takip edilmiş ve doğrusal regresyon yardımıyla bulutların hareket yön ve hız bilgilerine ulaşılmıştır. Son olarak, ilgili hareket yön ve hız bilgilerinin kullanılmasıyla 340 saniye zaman ufku için 20 saniye çözünürlüğünde bulut hareketleri tahmin edilmiştir. Çalışmada kullanılan veri seti için %5.88'lik hata performansı ile tahminler gerçekleştirilmiştir. Yöntem, bulut hareketi tahmininde yüksek potansiyele sahip olduğunu göstermiştir

Anahtar kelimeler: Bulut hareketi takibi, Bulut hareketi tahmini, Shi-Tomasi algoritması, Lucas-Kanade optik akış, Güneş enerjisi

1 Giriş

Güneş enerjisi doğaya zarar vermeyen, en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Güneşten elde edilecek enerji büyük oranda güneş ışınım değerine bağlıdır. Yeryüzüne ulaşan güneş ışınım değerinin yüksek değişkenliğe sahip olması, güneş enerji santrallerinin çıkış gücünü kararsız hale getirmektedir. Bu kararsızlık, güneş enerji santrallerinin elektrik şebekesine entegrasyonunu zorlaştırmakta ve elektrik şebekesinin güvenliğini, istikrarını ve ekonomik işleyişini önemli ölçüde etkilemektedir. Güneş ışınımında yaşanan bu değişim ve kesintilerin beraberinde getirdiği çıkış gücü kararsızlıklarının oluşumundaki en büyük etken bulutlardır. Bulutların güneşin önünü kapatmasıyla birlikte güneş ışınım şiddetinde ani düşüşler meydana gelebilmektedir. Bu gibi durumlarda herhangi bir

Abstract

The intermittent and variable nature of solar energy makes its efficient use very difficult. The biggest factor in this intermittency and variability is cloud movements. In the study, the performance of a flow-based algorithm for tracking and predicting the movements of clouds was investigated under the conditions of the Afyonkarahisar region. For this purpose, a digital camera was installed in Afyon Kocatepe University Engineering Faculty and sky images were recorded at regular intervals. Cloud and sky classifications were made on the images obtained. In order to follow the clouds, the most suitable corner points for tracking were determined using the Shi-Tomasi algorithm. The corner points found were followed on sequential images using the Lucas-Kanade optical flow algorithm and the motion direction and speed information of the clouds were obtained with the help of linear regression. Finally, using the relevant motion direction and velocity information, cloud motions with a resolution of 20 seconds for a time horizon of 340 seconds are estimated. For the data set used in the study, estimates were made with an error performance of 5.88%. The method has shown that it has a high potential in cloud motion prediction

Keywords: Cloud motion tracking, Cloud motion prediction, Shi-Tomasi algorithm, Lucas-Kanade optical flow, Solar energy

kesinti veya dalgalanma yaşanmaması için güç sistemi operatörünün gerekli güç ihtiyacını farklı yaklaşımlar ile telafi etmesi gerekmektedir. Dolayısıyla güneş ışınımı değerinin ani düşüş göstereceği zamanların önceden bilinmesi, güç sistemi operatörlerinin faydalarını artırarak güneş enerji santrallerini daha iyi yönetmelerine yardımcı olacaktır.

Meteorolojik veriler geniş alanlar ve uzun süreler için hava tahmin modellerini kapsamaktadır. Ancak bu güneş enerjisi santralleri için yeterli olmayabilir. Örneğin meteorolojik verilere göre açık ve güneşli olması beklenen bir günde güneş ışığı bulutlar tarafından kısmi veya tam olarak kesintilere uğrayabilir. Bunun sonucunda o bölgede bulunan güneş enerjisi santralinin çıkış gücü büyük oranda etkilenebilir. Bu nedenle meteorolojik tahminlere oranla

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: Ardanhuseyineslik@gmail.com (A. H. Eşlik)
Geliş / Received: 01.02.2021 Kabul / Accepted: 13.10.2021 Yayımlanma / Published: 14.01.2022
doi: 10.28948/ngumuh.872533

daha yerel ve yüksek çözünürlüğe sahip tahmin modellerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Gerçekleştirilen çalışmada esas olarak güneş ışınımı tahmini hedeflenmektedir. Ancak bu makalede güneş ışınımı tahmini öncesinde yapılması gereken ön işlemlere odaklanılmıştır. Bu kapsamda güneş ışınımı değişkenliğindeki en büyük faktör olan bulutların takibi ve hareket tahminleri gerçekleştirilmiştir. İlerleyen çalışmalarda bulut hareketi tahminlerinin kullanılmasıyla güneş ışınımı tahminlerinin gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.

Gün içerisindeki yüksek güneş ışınımı değişimlerinin olumsuz etkilerini en az düzeye indirmek ve güneş enerjisinden en etkin şekilde yararlanabilmek amacıyla gelişmiş tahmin yöntemleri, esnek üretim veya yük sağlama, akü bankaları bağlama gibi yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlar içerisinde en uygun maliyetli olan çözüm gelişmiş güneş ışınımı tahmin yöntemleri kullanılmaktadır. Elde edilecek güneş ışınımı tahmin değerleri kullanılarak üretim değerleri istenilen ölçüde ayarlanabilir ve ihtiyaç duyulan yedek kapasite miktarı azaltılabilir [1, 2].

Güneş ışınımı tahmini için geçmişten günümüze araştırmacılar tarafından farklı birçok yöntem geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Literatürde geliştirilen bu yöntemler incelendiğinde, belirli yöntemlerin belirli zaman ufukları için daha başarılı tahminler gerçekleştirebildiği görülmektedir. Sayısal hava tahmin modelleri 6 saatten birkaç güne kadar başarılı tahminler üretebilirken [3], uydu görüntülerini kullanarak bulut hareketlerini analiz eden tahmin modelleri, 30 dakika ile 6 saat arasındaki zaman ufuklarında daha başarılı tahminler gerçekleştirmektedir [4, 5]. Bir saatin altındaki zaman ufukları için ise geçmiş güneş ışınımı verilerinin kullanıldığı tahmin modellerinin ve yeryüzünden yüksek açılarla gökyüzü görüntülerini elde etmekte kullanılan gökyüzü görüntüleyicilerinin kullanıldığı tahmin modellerinin daha başarılı sonuçlar verdiği gözlenmiştir [6-8]. Kısa vadeli güneş ışınımı tahminlerinde detaylı ve yerel bulut bilgisinin bilinmesi tahmin sürecinin genel performansını büyük ölçüde etkilemektedir [9]. Bulut örtüsünün güneş ışınımı üzerine olan etkilerinin incelendiği birçok çalışmada da bulut hareketlerinin güneş ışınımı değişiminde anahtar unsur olduğu ortaya konulmuştur. [5, 10, 11].

Bulut hareketlerinin belirlenmesinde gökyüzü görüntüleyicilerinden veya uydudan elde edilen sıralı görüntülerden yararlanılmaktadır. Görüntülerin sayısal olarak ifade edilmesinin ardından belirli bir zaman aralığında bulutların gerçekleştirdiği hareketlerin incelenmesi için literatürde farklı teknikler kullanılmıştır. Çapraz korelasyon, fourier dönüşümü kullanılarak çapraz korelasyon, ikili bulut görüntülerinden elde edilen alanları eşleyen algoritma gibi yöntemler kullanılarak bulut hareketleri incelenmiştir [12, 13]. Ayrıca aynı teknikler ile uydu görüntüleri ve gökyüzü görüntüleyicisinden elde edilen görüntülerin eş zamanlı olarak incelenmesiyle kısa ve orta vadeli bulut hareketi ve güneş ışınımı tahminleri gerçekleştirilmiştir [14]. Sıralı gökyüzü veya uydu görüntülerinde bulut hareketlerini tespit etmenin bir diğer yolu da optik akış algoritmalarından yararlanmaktır. Optik akış, bir görüntüde bulunan nesnelere

hareketinin veya görüntü hızının gözlemeçiye göre ölçülmesi olarak tanımlanmaktadır [15]. Literatürde bulut hareketlerinin tespitinde optik akış algoritmalarından Lucas-Kanade yöntemini kullanan birçok çalışma bulunmaktadır. Wood-Bradley ve ark. bulutları mavi ve kırmızı renk kanallarını kullanarak tespit etmiş ve ikili algılama görüntüsü oluşturmuşlardır. Oluşturulan ikili algılama görüntüsü ve Lucas-Kanade yöntemini kullanarak bulut hareketlerini 40 saniyeye kadar tahmin edebilmişlerdir [8]. Benzer şekilde Tuominen ve Tuononen çalışmalarında gökyüzü görüntüleyicisi ile toplanan sıralı görüntülerde bulut hareketlerini Lucas-Kanade yöntemiyle incelemiş ve Yapay Sinir Ağları yöntemini kullanarak bulut hareket tahmini gerçekleştirmişlerdir [16]. İdder ve Laachfoubi gökyüzü görüntülerinden bulutların ikili iskelet görüntüsü adını verdikleri görüntülerini çıkartmıştır. Ardından Lucas-Kanade yöntemini kullanarak oluşturulan iskeletin kritik noktalarının takibini sağlamışlardır. [17]. Lucas-Kanade yönteminin haricinde sıralı görüntüler arasındaki optik akışın tahmin edilmesinde farklı algoritmalarından yararlanılan çalışmalar da mevcuttur. Dev ve ark. gökyüzü görüntüleyicileri kullanılarak elde edilmiş sıralı görüntülere Lucas-Kanade ve Horn-Schunck algoritmalarının avantajlarını birleştiren bir optik akış algoritması uygulamışlardır. 5 dakikaya varan zaman ufukları için oldukça başarılı bulut hareketi tahminleri gerçekleştirmişlerdir [18]. Du ve ark. ise 10 dakikalık zaman ufukları için bulut hareketi ve güneş ışınımı tahminlerini lokal olmayan bir optik akış algoritması kullanarak gerçekleştirmiştir [19].

Gerçekleştirilen çalışmada, optik akış tabanlı bir algoritma kullanılarak bulut hareketi tahminleri gerçekleştirilmiş ve ilgili yaklaşımın performansı ve uygulanabilirliği incelenmiştir. Bu kapsamda ilk olarak gökyüzü/bulut sınıflandırması gerçekleştirilmiştir. Tespit edilen bulutlara ait kenar ve köşelerin sıralı görüntüler üzerinde takibi sonucunda bulut hareketlerine ait hız ve yön bilgilerine ulaşılmıştır. Elde edilen bilgilerin kullanılmasıyla 340 saniyelik zaman ufukunda ve 20 saniye çözünürlükte güneş önu kapalılık/açıklık tahminlerine ulaşılmıştır. Kullanılan yaklaşıma ait akış diyagramı Şekil 1'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yöntemin bulut hareketi tahmininde başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. İlerleyen çalışmalarda bulut hareket tahminlerinin kullanıldığı güneş ışınımı tahmin modellerinin geliştirilmesi planlanmaktadır.

Makalenin organizasyonu şu şekilde planlanmıştır: ilk olarak materyal ve metot başlığı altında; kullanılan veri, maskeleme ve bulut tespiti, bulut hareketi takibi ve bulut hareketi tahmini açıklanmıştır. Ardından bulgular ve tartışmalar başlığı altında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve sonuçlarından bahsedilmiştir. Son olarak sonuç başlığı altında yapılan deneysel çalışmalara ait analiz sonucuna yer verilmiştir.

2 Materyal ve metot

2.1 Kullanılan veri

Gökyüzü-bulut ayırımının yapılması, bulut hızı ve hareket yönlerinin belirlenmesi görüntü işleme yöntemlerine dayanan teknikler kullanılarak gerçekleştirildiği için

gökyüzü görüntüleri girdisi oldukça önemli bir yere sahiptir. Gerçekleştirilen bu çalışmada kullanılan gökyüzü görüntüleri Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesine yerleştirilen 8mm F3.5 balık gözü merceğine sahip Canon EOS 80D dijital fotoğraf makinesi ile elde edilmiştir. Kullanılan balık gözü lens ile birlikte 167°'lik bir görüş açısına ulaşılmıştır. Görüntüler 11:00-16:00 saatleri arasında, 1/2500s poz süresi, ISO100, RGB ayarları kullanılarak her 20 saniyede bir çekilmiştir ve 1024x768 piksel çözünürlüğünde JPEG formatında saklanmıştır. Görüntülerin işlenmesi, bulut hareketlerinin takip ve tahmini Python programlama dili kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca OpenCV açık kaynak bilgisayar görü kütüphanesi ve NumPy bilimsel hesaplama kütüphanesinden yararlanılmıştır [20].

2.2 Maskeleye ve bulut tespiti

Belirli aralıklarla toplanan gökyüzü görüntülerinden bulut hızları ve hareket yönlerinin belirlenebilmesi için ilk olarak bulut ve gökyüzünün piksel düzeyinde birbirinden ayrıştırılması gerekmektedir. Havada bulunan moleküllerin kırmızı ışıktan daha fazla mavi ışık saçmasına karşın, bulutlar mavi ve kırmızı ışığı benzer oranda saçmaktadır [21]. Bu kapsamda görüntülerdeki bulutların tespit edilmesi için literatürde [7, 22] farklı birçok çalışmada da kullanılan kırmızı/mavi oranına dayalı standart bir yaklaşım kullanılmıştır. Bu yaklaşımda, görüntülerdeki her bir piksele ait kırmızı/mavi oranı bulunmakta ve belirli bir eşik değerinin üzerinde olan pikseller bulut, altında olan pikseller ise gökyüzü olarak sınıflandırılmaktadır. Eşik değeri, analiz edilen görüntülerdeki gökyüzü durumuna göre kullanıcı tarafından belirlenmektedir. Görüntü boyutlarına eşit şekilde oluşturulan ikili algılama görüntüsünde eşik değerinin üzerinde değer alan pikseller 255, altında kalan pikseller ise sıfır değerine ayarlanmıştır. Sonuç olarak bulut olan

piksellerin beyaz, gökyüzü olan piksellerin ise siyah olarak gösterildiği ikili algılama görüntüsü elde edilmiştir. Elde edilen ikili algılama görüntüsü bulut hareket tahmininde kullanılmıştır. Ayrıca görüntülerde bulunan güneşin konumu kullanıcı tarafından belirlenmiş ve oluşturulan bir maske yardımıyla sınıflandırılmıştır. İlgili maske kullanılarak güneş, ikili algılama görüntüsünden çıkartılmıştır. Şekil 2'de orijinal gökyüzü görüntüsü ve bu görüntüden elde edilen ikili algılama görüntüsü verilmiştir.

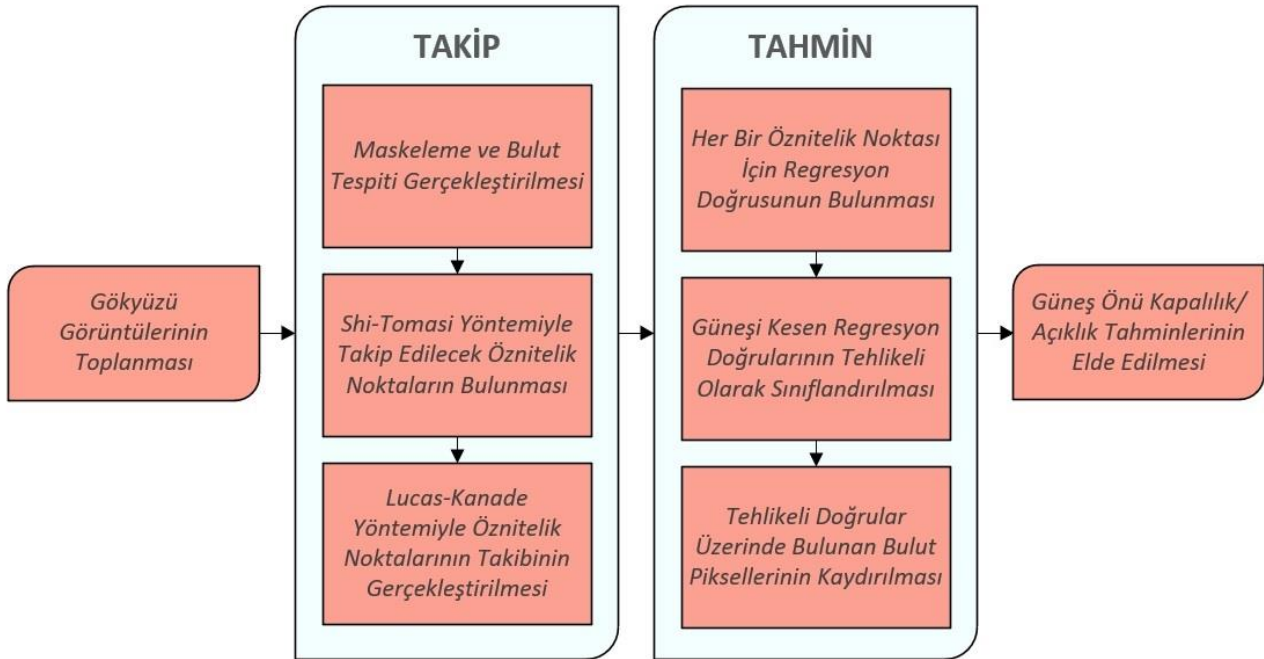
2.3 Bulut hareketi takibi

Bulut ve gökyüzü ayrımının yapılması sonrasında bulutların hareket yönlerinin ve hızlarının bulunması gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda Shi-Tomasi [23] köşe algılama algoritması öznitelik noktalarının bulunması, Lucas-Kanade [15] optik akış algoritması ise seçilen öznitelik noktalarının takibi için kullanılmıştır.

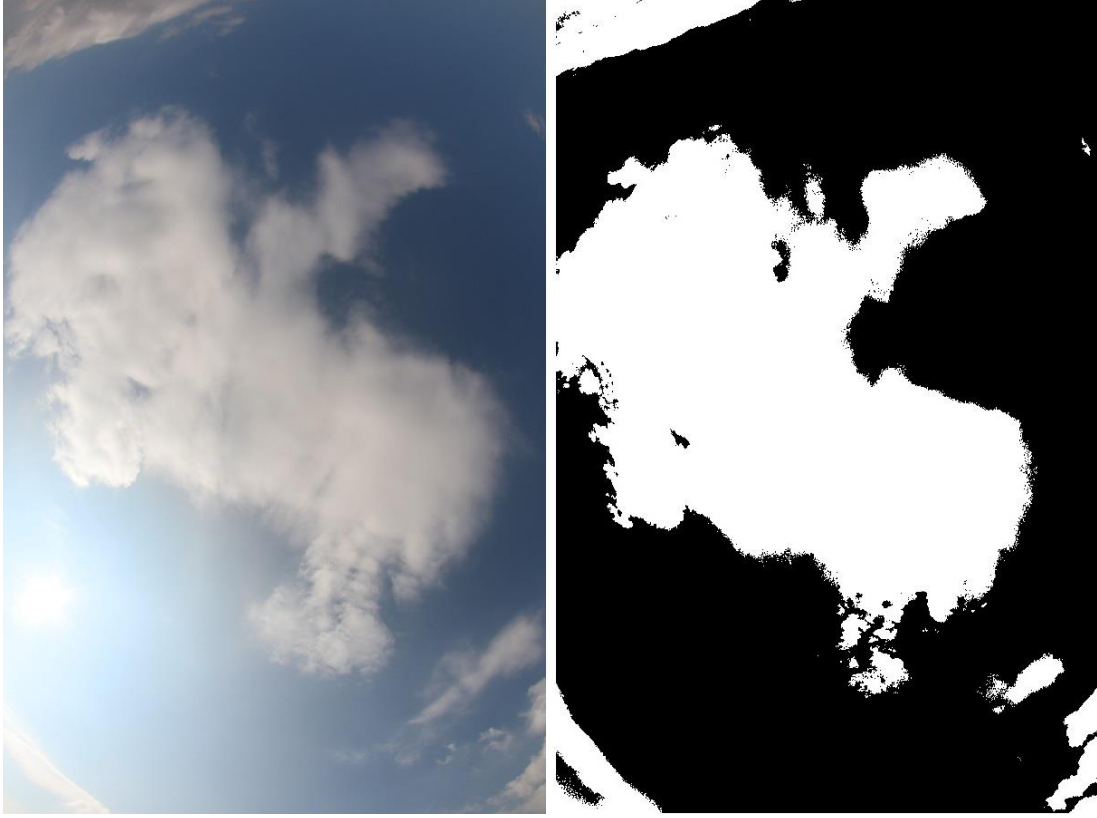
2.3.1 Takip edilecek noktaların bulunması

Belirli aralıklarla çekilmiş görüntülerde bulutların takip edilebilmesi için ilk olarak takip edilmeye en uygun öznitelik noktaları belirlenmelidir. Bu öznitelik noktaları yüksek renk geçişleri veya yoğunluğa sahip pikseller olmakla birlikte genellikle nesnelerin köşelerinde bulunmaktadır.

Literatürde öznitelik noktası belirlenmesinde oldukça sık olarak kullanılmakta olan Shi-Tomasi algoritması, Harris ve Stephens'in geliştirmiş olduğu algoritmada ufak bir değişiklikle yapılmışla ortaya çıkmıştır. Harris ve Stephens'in geliştirdiği algoritmada öncelikle piksel etrafında bir pencere oluşturulmaktadır. Oluşturulan pencerenin farklı yönlerde küçük miktarlarda kaydırılmasıyla görüntüdeki ortalama yoğunluk değişimleri hesaplanmaktadır. Yoğunluk değişim değerlerine göre pikselin kenar, köşe veya düz bir yüzey olduğu belirlenmektedir [24].



Şekil 1. Kullanılan yaklaşıma ait akış diyagramı



Şekil 2. Gökyüzü orijinal görüntüsü (solda), İkili algılama görüntüsü (sağda)

(x, y) koordinatlarında $I_{(x,y)}$ yoğunluğunda olan bir pikselin, (u, v) kadar kaydırıldığında oluşacak yoğunluk değişimi $E_{(u,v)}$ Denklem (1)'de verilmiştir.

$$E_{(u,v)} = \sum_{x,y} w(x,y) [I_{(x+u,y+v)} - I_{(x,y)}]^2 \quad (1)$$

Yoğunluk değişimi hesaplamasının ardından her bir pikselin etrafındaki pencere üzerinde Denklem (2)'de formülü verilen otokorelasyon matrisi hesaplanmaktadır. Harris ve Stephens'a göre M otokorelasyon matrisinin iki özdeğeri (eigenvalue) de büyük değerler ise orada bir köşe noktası vardır. Özdeğerlerden birisi çok küçük, diğeri büyükse kenar, ikisi de çok küçükse düz bir yüzey bulunmaktadır.

$$M = \sum_{x,y} w(x,y) \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Harris ve Stephens, özdeğerleri a ve β şeklinde gösterilen otokorelasyon matrisinin determinantından belirlenen bir katsayı ile çarpılmış matrisin izini (trace) çıkartan bir fonksiyon önermiştir. Fonksiyon çıktısını ise önceden belirlenen bir eşik değer ile karşılaştırmıştır. Önerilen fonksiyon Denklem (3)'te gösterilmiştir.

$$R = \text{Det}(M) - k\text{Tr}^2 = \alpha\beta - k(\alpha + \beta)^2 \quad (3)$$

Shi-Tomasi algoritmasında ise denklem 3 yerine iki özdeğerden küçük olanı önceden belirlenen eşik değeri ile karşılaştıran ve Denklem (4)'teki gibi formülize edilen bir yaklaşım kullanılmaktadır. Elde edilen sonucun eşik değerinden yüksek olması durumunda o noktada bir köşe olduğu anlaşılmaktadır.

$$R = \min(\alpha, \beta) \quad (4)$$

Gökyüzü görüntülerinde bulutların kenarlarında yer alan köşeler oldukça kritik öneme sahiptir. Gerçekleştirilen çalışmada görüntü üzerinde bulunan bu noktalar Shi-Tomasi algoritması kullanılarak tespit edilmiştir. İlgili kenarları ön plana çıkarmak ve bulunmalarını kolaylaştırmak amacıyla görüntünün mavi ve kırmızı renk kanalları arasındaki farkın tek kanallı görüntüsü kullanılmıştır. OpenCV kütüphanesinde yer alan goodFeaturesToTrack() fonksiyonu kullanılarak görüntü üzerinde bulunan takip için en uygun öznitelik noktaları bulunmuş ve konum bilgilerine ulaşılmıştır.

2.3.2 Öznitelik noktalarının takibi

Shi-Tomasi algoritması kullanılarak bulunan öznitelik noktaları optik akış algoritmasında girdiler olarak kullanılmaktadır. Optik akış, bir görüntüde bulunan nesnelerin hareketinin veya görüntü hızının gözlemciye göre ölçülmesidir [15]. Bu yaklaşımda her bir pikselin kareler (frame) arasındaki değişimine bakılarak değişimin hızı ve yönü hesaplanmaktadır. Algoritmada akışın başlangıçta sabit olduğu varsayılmaktadır ve ilk olarak yerel komşulara

bakılmaktadır. Ardından temel optik akış denklemleri kullanılarak tüm piksellerdeki komşular için algoritma çalıştırılmaktadır [25]. İki görüntü arasındaki optik akış Denklem (5)'te verilmiştir. Denklemde I_x , I_y , I_t görüntüdeki konumsal değişimleri gösterirken, V_x x eksenindeki akışı, V_y ise y eksenindeki akışı ifade etmektedir.

$$I_x V_x + I_y V_y + I_t = 0 \quad (5)$$

Literatürde, günümüze kadar optik akışın hesaplanabilmesi için çeşitli yöntemler önerilmiştir. Barron ve ark. gerçekleştirdikleri çalışmada, optik akış tahmininde kullanılan bu yöntemleri incelemiş ve performanslarını karşılaştırmıştır. Karşılaştırma sonucunda, farklı veri setleri üzerinde en güvenilir sonuçları veren yöntemlerden birinin Lucas-Kanade optik akış yöntemi olduğu sonucuna ulaşılmıştır [25]. Gerçekleştirmiş olduğumuz çalışmada optik akışın tahmin edilmesinde, Barron ve ark. elde ettiği bulgular, bulutların yavaş hareketleri ve literatürde yaygın kullanımı dikkate alınarak Lucas-Kanade yöntemi tercih edilmiştir. Lucas-Kanade yöntemi öznitelik noktaları etrafındaki piksellerin çevresinde yerel akış olduğunu ve öznitelik noktası yer değişiminin küçük olduğunu varsaymaktadır [15]. Yöntemin temel algoritması aşağıda maddeler halinde verilmiştir [26].

- İlk olarak görüntü hassasiyetini azaltmak amacıyla giriş görüntüsüne gauss yumuşatması uygulanır.
- Gerçekleştirilen yumuşatma sonrasında konumsal türevler (I_x , I_y , I_t) hesaplanır.
- Görüntüde bulunan her bir piksel için türevsel erişim hesaplanır. Denklem (6) kullanılarak t anındaki yerel görüntü akışı hesaplanır. Denklemde yer alan p bir pikseli, p_1, p_2, \dots, p_n ise n adet komşu pikseli ifade etmektedir.

$$\begin{aligned} I_x(p_1)V_x + I_y(p_1)V_y + I_t(p_1) &= 0 \\ &\vdots \\ I_x(p_n)V_x + I_y(p_n)V_y + I_t(p_n) &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

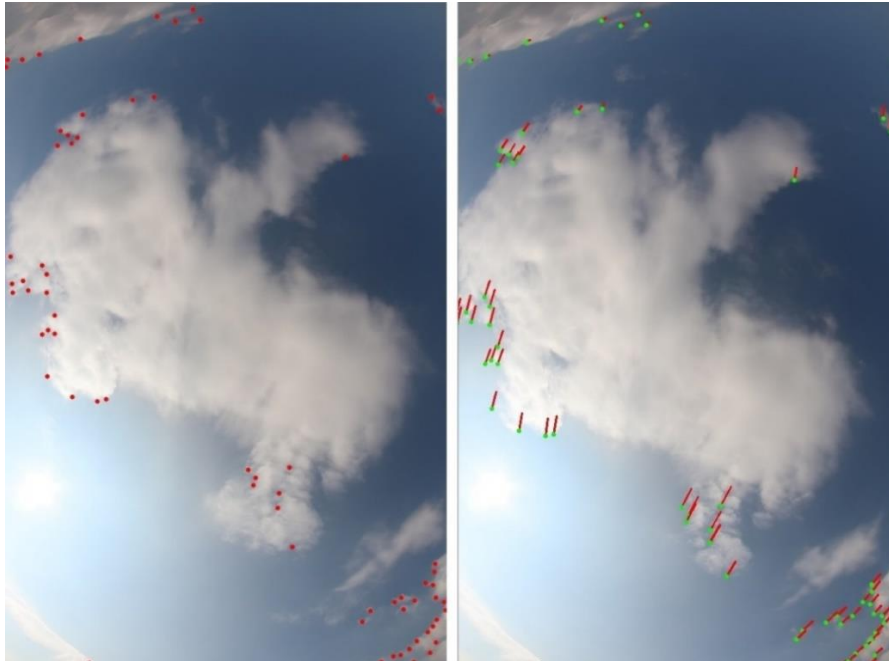
- Denklem (6) matris formunda Denklem (7)'deki gibi ifade edilebilir.

$$A v = b \quad (7)$$
$$A = \begin{bmatrix} I_x(p_1) & I_y(p_1) \\ \vdots & \vdots \\ I_x(p_n) & I_y(p_n) \end{bmatrix}, v = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} -I_t(p_1) \\ \vdots \\ -I_t(p_n) \end{bmatrix}$$

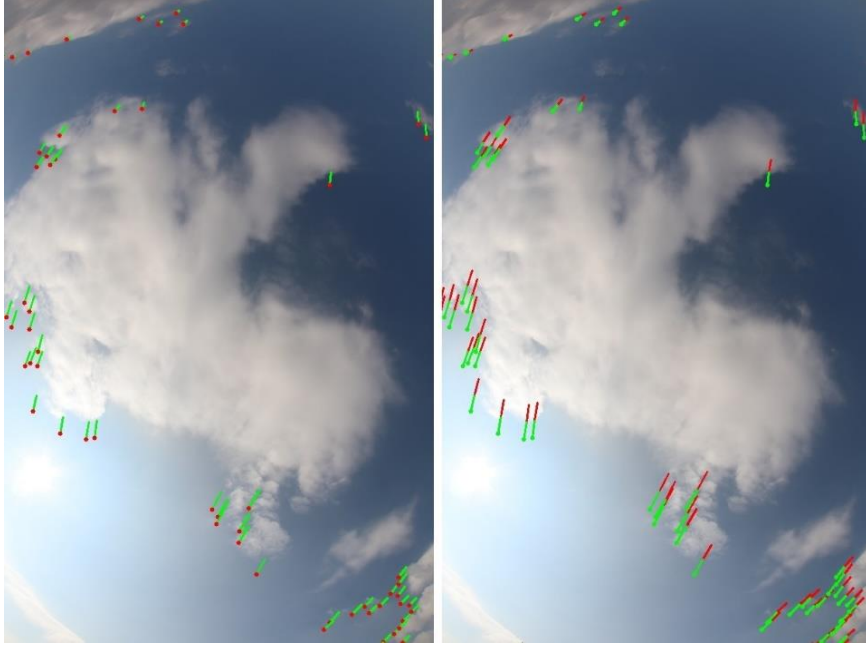
- Son olarak iki görüntü arasındaki optik akışı hesaplamak için Denklem (8) en küçük kareler yaklaşımı kullanılarak çözülür. A^T , A matrisinin transpozunu ifade etmektedir.

$$v = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (8)$$

Lucas-Kanade yönteminin uygulanmasında OpenCV kütüphanesinde yer alan calcOpticalFlowPyrLK() fonksiyonundan yararlanılmıştır. Fonksiyon, takip edilmek istenen öznitelik noktalarının bir sonraki karede bulunduğu yerleri tespit ederek yeni koordinat bilgilerini geriye döndürmektedir. Sıralı olarak çekilen görüntüler üzerinde kaç kare boyunca öznitelik noktası takibi gerçekleştirileceği kullanıcı tarafından belirlenmektedir. Çalışmamızda öznitelik noktalarının takibi sıralı olarak çekilen 5 kare boyunca gerçekleştirilmiştir ve her bir aşamadaki koordinat bilgileri kaydedilmiştir. Şekil 3'te Shi-Tomasi algoritması kullanılarak bulunan öznitelik noktaları ve bu noktaların sıralı 2 kare boyunca gerçekleştirmiş olduğu hareketler görülebilmektedir.



Şekil 3. Shi-Tomasi algoritması kullanılarak bulunan öznitelik noktaları (solda), Bulunan öznitelik noktalarının sıralı karelerde takibinin gerçekleştirilmesi (sağda)



Şekil 4. Öznitelik noktalarının 1 kare sonrası gerçekleştireceği hareketlerin tahmini (solda), Öznitelik noktalarının 1 kare sonrası gerçekleştireceği hareketlerin tahmini ve geçmiş karelerdeki hareketleri (sağda)

2.4 Bulut hareketi tahmini

Bulut hareket tahmininin gerçekleştirilebilmesi için ilk olarak öznitelik noktalarına ait hızların ve hareket yönlerinin bulunması gerekmektedir. Bu kapsamda takibi gerçekleştirilen her bir öznitelik noktası için önceki karelerde bulunduğu tüm konumlarını kesen bir doğrusal regresyon doğrusu hesaplanmıştır. Ardından her bir öznitelik noktasının çizilen regresyon doğrusu üzerinde ilk konumundan son konumuna kadar kat ettiği mesafe bulunmuştur. Bulunan mesafelerin görüntü takibi gerçekleştirilen kare sayısına bölünmesiyle birlikte her bir öznitelik noktasının bir karedeki hızına ulaşılmıştır. Elde edilen hızlar 20 saniyede bir çekilen gökyüzü görüntüleri nedeniyle saniye/piksel birimine sahiptir. Bulutların farklı yön ve hızlarda hareket edebilmeleri nedeniyle bulunan her bir öznitelik noktası için hız ve yönlerin ayrı ayrı hesaplanması oldukça önemlidir. Böylelikle bulutların yapabileceği farklı yön ve hızlardaki hareketlerin yakalanabilmesi ve tahminlerinin gerçekleştirilmesi mümkün olabilmektedir.

Her bir öznitelik noktasına ait regresyon doğrusunun bulunmasının ardından bulut tespiti aşamasında elde edilen ikili algılama görüntüsü kullanılarak bulut hareket tahminleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaç doğrultusunda ilk olarak çizilen regresyon doğrularının güneşi kesip kesmediği kontrol edilmiştir. Güneşi kesen regresyon doğrularındaki bulutların güneşin önünü kapatma ihtimalinin yüksek olmasından dolayı bu doğrular tehlikeli olarak sınıflandırılmıştır. Tehlikeli regresyon doğru veya doğruları üzerinde bulunan her bir pikselin koordinat bilgileri alınarak ikili algılama görüntüsünde aynı koordinat üzerinde bulunan pikselin bulut veya gökyüzü olması durumu incelenmiştir. Bulut durumunda olan piksellerin ilgili regresyon doğrusu üzerinde hesaplanan hız değeri kadar kaydırılmasıyla bir

sonraki karede bulunacağı yerler tahmin edilmiştir. Bir kare sonrası için gerçekleştirilen bu işlemin kullanıcı tarafından belirlenen tekrar sayısı kadar arka arkaya gerçekleştirilmesiyle daha uzun süreli tahminler elde edilmiştir. Şekil 4'te bulunan öznitelik noktalarının 1 kare sonra gerçekleştireceği hareketlerin tahmini ve geçmiş karelerdeki hareketleri verilmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

Gerçekleştirilen çalışmada algoritmanın başarısının değerlendirilmesi amacıyla Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesine yerleştirilen kamera aracılığı ile toplanan gökyüzü görüntüleri incelenmiş ve deneyde kullanılması uygun görülen 20 adet sıralı görüntü belirlenmiştir. Güneşin gün boyunca bulutlar tarafından kapalı kaldığı veya hiç bulutun olmadığı günlerde elde edilen fotoğraflar değerlendirilmeye alınmamıştır. Bununla birlikte algoritma performansının daha net olarak görülebilmesi amacıyla güneşin önünün ilk olarak açık olduğu, belirli bir zaman sonrasında bulutlar tarafından kapatıldığı görüntüler tercih edilmiştir. Bu şartlar altında oluşturulan veri seti algoritmaya sokularak bulut hareketi tahmin sonuçları elde edilmiştir. Bulutların yaptıkları hareketlerin ve hızlarının daha kararlı olarak değerlendirilebilmesi amacıyla veri setinin tahmininde 3 görüntü kullanılmıştır. İlk görüntü üzerinde takip edilecek noktalar ve koordinatları tespit edilmiştir. Sonraki iki görüntüde ise ilk görüntüde bulunan noktaların yaptığı hareketler takip edilmiştir. Veri setinde geriye kalan 17 gökyüzü görüntüsü ise test amaçlı kullanılmış ve tahmin sürecine dahil edilmemiştir. Tahminler, gökyüzü görüntülerinin 20 saniyelik aralıklarla toplanması nedeniyle 20 saniyelik zaman ölçeğinde gerçekleştirilmiştir. Bu sayede test için ayrılan her bir görüntüdeki bulutluluk durumları kontrol edilerek algoritmanın performansı incelenebilmiştir. İleride

gerçekleştirilecek çalışmalarda görüntülerin daha sık aralıklarla toplanması ve tahmin çözünürlüğünün artırılması hedeflenmektedir.

Algoritmaya verilen görüntülerde bulunan güneşin konumu kullanıcı tarafından tespit edilerek maske yardımıyla işaretlenmiştir. Elde edilen regresyon doğrularının tehlikeli doğru olarak sınıflandırılmasında ve güneşin önünün kapanacağı sürenin hesaplanmasında bu maskelerden yararlanılmıştır. Şekil 5'te kullanılan veri seti için 340 saniyelik zaman ufkunda gerçekleştirilen tahmin sonuçları verilmiştir.

Gerçekleştirilen tahmin sonuçları incelendiğinde, kullanılan veri seti için algoritmanın sonraki 80 saniyeye kadar (4 kare sonrası) doğru tahminler yapabildiği görülmektedir. Ancak güneşin önünün 120. saniyeden sonra kapanacağı öngörülmesine karşılık güneşin önu 100. saniye yani 5. karede kapanmıştır. 100-120. saniye aralıklarında tespiti nispeten daha zor olan seyrek ve düşük kalınlıklardaki bulutların yoğun olarak bulunması nedeniyle bazı bulutlar algoritma tarafından gökyüzü olarak tanımlanmış ve bu nedenle bu saniyelerde güneşin önu açık olarak tahmin edilmiştir. Sonraki karelerde güneşin önu bulutlar tarafından sürekli kapalı kalmış, bu süreç ise algoritma tarafından doğru tahmin edilmiştir. Sonuç olarak veri setinde %5,88'lik makul oranında bir hata ile tahminler gerçekleştirilebilmiştir.

Literatürde, Jaouhari ve arkadaşları gerçekleştirdikleri çalışmada bulut hareketi takibinde Harris kenar ve köşe belirleme yöntemi ile Lucas-Kanade optik akış yöntemini kullanmışlardır [27]. Çalışmada kullanılan yaklaşımın başarısının değerlendirilebilmesi amacıyla Jaouhari ve arkadaşları tarafından kullanılan yaklaşım veri setine uygulanmış ve sonuçlar Tablo 1'de sunulmuştur.

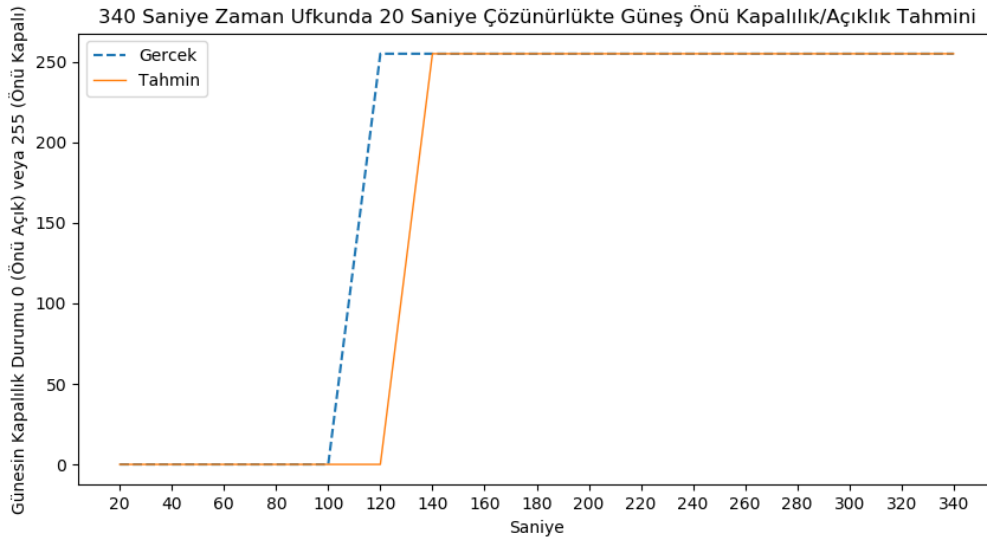
Tabloda verilen sonuçlar incelendiğinde, Jaouhari ve arkadaşları tarafından kullanılan yaklaşım ile makalemizde kullanılan yaklaşımın aynı hata oranları ile tahminler gerçekleştirebildiği görülmektedir. Ancak takip edilecek öznelik noktalarının tespit edilmesi aşamasında, Harris kenar ve köşe belirleme yönteminin kullanılması fazladan 10 nokta belirlenmesine neden olmuştur. Bu öznelik

noktalarının oluşturduğu işlem yükü ve karmaşıklığı göz önüne alındığında, bulut hareketi tahmininde makalemizde yer alan yaklaşımın kullanılmasının daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır. İleride yapılması planlanan çalışmalarda farklı hava şartları altında yaklaşımın tahmin performansının değerlendirilmesi, tahmin çözünürlüğünün artırılması hedeflenmektedir. İlave olarak, elde edilen güneş önu kapalılık/açıklık bilgilerinin kullanılmasıyla daha başarılı güneş ışınımı tahmin modellerinin oluşturulması planlanmaktadır.

Tablo 1. Sonuçların karşılaştırılması

Kullanılan Yaklaşım	Tespit Edilen Öznelik Noktası Sayısı	Hata Oranı
Shi-Tomasi / Lucas - Kanade	70	%5.88
Harris / Lucas - Kanade	80	%5.88

Deney sonucunda, 340 saniye gibi uzun bir zaman ufkü için başarılı tahminler yapılabildiği görülmektedir. Ayrıca her bir kare arasındaki yavaş hareketleri nedeniyle bulutların takibinde Lucas-Kanade yönteminin oldukça kullanışlı olduğu sonucuna varılmıştır. Öznelik noktalarının belirlenmesinde görüntünün mavi ve kırmızı renk kanalları arasındaki farkın tek kanallı görüntüsünün kullanılması bulut köşelerini vurgulayarak tespit edilen gereksiz öznelik noktası sayısını en aza indirmiştir. Yeterli sayıda öznelik noktasının belirlenmesiyle algoritma riskli bulutları tespit edebilmektedir. Gökyüzü ve bulut tespiti aşamasında seyrek ve düşük kalınlıklardaki bulutların da daha yüksek oranlarda tespit edilebilmesiyle yöntemin başarısı artırılabilir. Ayrıca güneşin maskelenmesinde farklı görüntü işleme yöntemlerinden yararlanılarak gökyüzü görüntüsü güneş, bulut ve gökyüzü olarak sınıflandırılabilir. Sonuç olarak algoritma, geliştirmeye açık olan yönleriyle birlikte bulut hareketi tahmininde başarılı sonuçlar üretebilmiş ve güneş ışınımı tahmini için yüksek potansiyele sahip olduğunu göstermiştir.



Şekil 5. Veri seti için 340 saniye zaman ufkunda 20 saniye ölçekli gerçekleştirilen güneş önu kapalılık/açıklık tahmini

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, bulut hareketi tahmini için optik akış tabanlı bir algoritma kullanılarak yöntemin performansı ve uygulanabilirliği incelenmiştir. İlgili yöntem kullanılarak 340 saniye zaman ufku için 20 saniye çözünürlüğünde bulut hareketi tahminleri gerçekleştirilmiştir. İncelemede Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesine yerleştirilen dijital fotoğraf makinesinden 20 saniyede bir elde edilen gökyüzü görüntüleri kullanılmıştır. Görüntüler üzerinde ilk olarak bulut, gökyüzü sınıflandırılması gerçekleştirilmiş, ardından Shi-Tomasi algoritması kullanılarak tespit edilen köşe noktaları Lucas-Kanade optik akış algoritması yardımıyla takip edilmiştir. Yöntem, belirlenen veri seti üzerinde test edilmiştir ve %5.88'lik hata oranıyla tahminler gerçekleştirmiştir. Tahmin ufkunun artmasıyla doğru orantılı olarak gerçekleştirilen tahminlerin zorluğu da arttığı düşünüldüğünde bulunan %5.88'lik hata oranı yöntemin yüksek potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte farklı yön ve hızlarda hareket eden bulutların takip ve tahminini başarılı bir şekilde gerçekleştirebilmiştir. İlerleyen çalışmalarda, güneşin farklı görüntü işleme yöntemleri kullanılarak sınıflandırılması ve geliştirilecek bir yöntem ile takip edilecek öznelik noktalarının belirli aralıklarla güncellenmesi planlanmaktadır. Böylelikle sürekli bir tahmin algoritmasına sahip olunması hedeflenmektedir. Gerçekleştirilen bu çalışma sonucunda elde edilen tahmin sonuçlarının kullanılmasıyla güneş ışınımı değişiminde en büyük role sahip olan bulutların tahmin sürecine dâhil edilmesi ve bu sayede daha başarılı güneş ışınımı tahmin modelleri geliştirilmesi planlanmaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %6

Teşekkür:

Bu çalışma, Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimi tarafından 20.FENBİL.25 no'lu proje kapsamında desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimine teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] V. Kostylev and A. Pavlovski, Solar power forecasting performance—towards industry standards. 1st international workshop on the integration of solar power into power systems, pp.1-8, Aarhus, Denmark, 2011.
- [2] L. Bird, M. Milligan and D. Lew, Integrating variable renewable energy: challenges and solutions. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden Colorado, United States, Technical Report NREL/TP-6A20-60451, 2013. <https://doi.org/10.2172/1097911>
- [3] L. M. Aguiar, B. Pereira, P. Lauret, F. Díaz and M. David, Combining solar irradiance measurements, satellite-derived data and a numerical weather prediction model to improve intra-day solar

- forecasting. *Renew. Energy*, 97, 599–610, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.06.018>
- [4] H. M. Diagne, P. Lauret and M. David, Solar irradiation forecasting: state-of-the-art and proposition for future developments for small-scale insular grids. WREF 2012-World Renewable Energy Forum, May 2012.
- [5] J. Alonso-Montesinos and F. J. Batlles, The use of a sky camera for solar radiation estimation based on digital image processing. *Energy*, 90, 377–386, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.028>
- [6] C. W. Chow, B. Urquhart, M. Lave, A. Dominguez, J. Kleissl, J. Shields and B. Washom, Intra-hour forecasting with a total sky imager at the UC San Diego solar energy testbed. *Solar Energy*, 85 (11), 2881–2893, December, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.08.025>
- [7] M. Cervantes, H. Krishnaswami, W. Richardson, and R. Vega, Utilization of low cost, sky-imaging technology for irradiance forecasting of distributed solar generation. 2016 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech), pp. 142–146, Kansas City, United States, 2016. <https://doi.org/10.1109/GreenTech.2016.33>
- [8] P. Wood-Bradley, J. Zapata and J. Pye, Cloud tracking with optical flow for short-term solar forecasting. Proceedings of the 50th Conference of the Australian Solar Energy Society, Melbourne, 2012.
- [9] R. Chauvin, J. Nou, S. Thil, A. Traoré and S. Grieu, Cloud detection methodology based on a sky-imaging system. *Energy Procedia*, 69, 1970–1980, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.198>
- [10] J. Alonso, A. Ternero, F. J. Batlles, G. López, J. Rodríguez and J. I. Burgaleta, Prediction of cloudiness in short time periods using techniques of remote sensing and image processing. *Energy Procedia*, 49, 2280–2289, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.03.241>
- [11] F. J. Batlles, J. Alonso and G. López, Cloud cover forecasting from METEOSAT data. *Energy Procedia*, 57, 1317–1326, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.122>
- [12] J. A. Leese, C. S. Novak and V. Ray Taylor, The determination of cloud pattern motions from geosynchronous satellite image data. *Pattern Recognit*, 2(4), 279–292, December 1970. [https://doi.org/10.1016/0031-3203\(70\)90018-X](https://doi.org/10.1016/0031-3203(70)90018-X)
- [13] R. Chauvin, J. Nou, S. Thil and S. Grieu, Cloud motion estimation using a sky imager. *AIP Conference Proceedings*, 1734(1), 150003, 2016. <https://doi.org/10.1063/1.4949235>
- [14] J. Alonso and F. J. Batlles, Short and medium-term cloudiness forecasting using remote sensing techniques and sky camera imagery. *Energy*, 73, 890–897, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.06.101>
- [15] B. Lucas and T. Kanade, An iterative image registration technique with an application to stereo vision. Proceedings DARPA Image Understanding Workshop, pp. 121-130, April 1981.

- [16] P. Tuominen and M. Tuononen, Cloud detection and movement estimation based on sky camera images using neural networks and the Lucas-Kanade method. AIP Conference Proceedings, 1850(1), 140020, 2017. <https://doi.org/10.1063/1.4984528>
- [17] H. I. Ben Idder and N. Laachfoubi, Cloud motion estimation in satellite image sequences by tracking skeleton critical points using lucas-kanade method. 13th International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization (CGiV), pp. 178–183, 2016. <https://doi.org/10.1109/CGiV.2016.42>
- [18] S. Dev, F. M. Savoy, Y. H. Lee and S. Winkler, Short-term prediction of localized cloud motion using ground-based sky imagers. IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON, 0, 2563-2566, 2017. <https://doi.org/10.1109/TENCON.2016.7848499>
- [19] J. Du, Q. Min, P. Zhang, J. Guo, J. Yang and B. Yin, Short-term solar irradiance forecasts using sky images and radiative transfer model. Energies, 11(5), 1107, May 2018. <https://doi.org/10.3390/en11051107>
- [20] G. Bradski and A. Kaehler, Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library, O'Reilly Media Inc, 2008.
- [21] A. Heinle, A. Macke and A. Srivastav, Automatic cloud classification of whole sky images. Atmospheric Measurement Techniques, 3(3), 557–567, 2010. <https://doi.org/10.5194/amt-3-557-2010>
- [22] H. Huang, J. Xu, Z. Peng, S. Yoo, D. Yu, D. Huang and H. Qin, Cloud motion estimation for short term solar irradiation prediction. 2013 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), pp. 696–701, 2013. <https://doi.org/10.1109/SmartGridComm.2013.6688040>
- [23] J. Shi and C. Tomasi, Good features to track. Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 593–600, 1994. <https://doi.org/10.1109/CVPR.1994.323794>
- [24] C. Harris and M. Stephens, A combined corner and edge detector. Alvey vision conference, 15(50), pp. 10–5244, 1988.
- [25] J.L. Barron, D.J. Fleet and S.S. Beauchemin, Performance of optical flow techniques. International journal of computer vision, 12(1), 43–77, 1994. <https://doi.org/10.1007/BF01420984>
- [26] A. S. Keçeli ve A. Kaya, Optik akış görüntüsü ve bi-lstm ile şiddet içeren hareketlerin sınıflandırılması. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 14, 204–208, 2018. <https://doi.org/10.31590/ejosat.460257>
- [27] Z. El Jaouhari, Y. Zaz and L. Masmoudi, Cloud tracking from whole-sky ground-based images. 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), pp. 1-5, 2015. <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2015.7455105>





Rotasyon kontrollü Wilson-Cowan nöron modeli ve donanım gerçekleştirimi

Rotation-controlled Wilson-Cowan neuron model and its hardware

Nimet Korkmaz^{1,*} 

^{1,*} Kayseri Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 38280, Kayseri, Türkiye

Özet

Canlı vücudundaki iletişim ağının temel elemanı olan nöronların karakteristik dinamiklerini açıklamak için, doğrusal olmayan fonksiyon tanımlamalarından yararlanılarak çeşitli biyolojik nöron modelleri tanımlanmıştır. Bu modellerin analizlerinde, doğrusal olmayan sistemlerin analizlerinde kullanılan çözüm yöntemlerinden sıklıkla yararlanılmaktadır. Son yıllarda doğrusal olmayan sistemleri konu alan çalışmaların bir kısmında rotasyonlu çeker yapıları ile karşılaşmaktadır. Bu çalışmada, literatürde uyarıcı ve engelleyici sinaps yapılarını tanımlamada etkin kullanılan Wilson Cowan (W-C) nöron modeline Euler Rotasyon Teoremi'nin uygulanması ile elde edilen rotasyonlu çekerin faz kontrolünün sağlanması amaçlanmıştır. Ayrıca, gerçek zamanlı işaretlere ihtiyaç duyulabilecek çalışmalarda kullanılabilirliğinin gösterilmesi amacı ile rotasyon kontrollü W-C nöron modelinin FPGA (Field Programmable Gate Array) tabanlı donanım gerçekleştirim çalışması da yapılmıştır. Yapılan nümerik analizler ile rotasyon kontrollü W-C nöron modelinin çeker yapısının başarılı bir şekilde kontrol edilebildiği görülmüştür. Öte yandan deneysel gerçekleştirim çalışmaları ile biyolojiden esinlenilerek tasarlanan ve elektronik ekipmanlarla taklit edilen sistemler için alternatif bir çalışma kaydedilmiştir.

Anahtar kelimeler: Wilson-Cowan nöron modeli, Uyarıcı ve engelleyici sinaps, Euler rotasyon teoremi, Doğrusal olmayan sistemler, Alan programlanabilir kapı dizisi (FPGA)

1 Giriş

Merkezi sinir sisteminin temel fonksiyonel birimleri nöronlardır. Nöronlar soma, dendrit ve akson olmak üzere temel üç kısımdan oluşmaktadır. Nöron çekirdeğini ve çekirdekçisini içeren kısım somadır. Soma içerisinden çıkan kısa uzantılara dendrit adı verilir. Akson ise nöron gövdesinden çıkan tek bir uzun yapıdır ve nöronlar arası bilgi transferi sürecinde önemli bir rolü vardır. Nöronlar arasında meydana gelen bilgi iletim süreci elektriksel sinyallerle gerçekleşmektedir. Nöronların hücre zarında meydana gelen iyonik konsantrasyon değişimi, bir akım indüklemekte ve bu akım hücre zarında potansiyel oluşmasına sebep olmaktadır. Oluşan bu potansiyel aksiyon potansiyeli olarak adlandırılmaktadır. Aksiyon potansiyelinin oluşumu sadece iyonik konsantrasyon değişimine bağlı olmayıp; nörona harici uygulanan akımlara ve diğer nöronlardan gelen

Abstract

Various biological neuron models have been defined by using nonlinear function definitions in order to explain the characteristic dynamics of neurons that are the basic elements of the communication network in the living body. In the analysis of these models, the solution methods used in the analysis of nonlinear systems are frequently used. In recent years, some of the studies about nonlinear systems have been encountered with the rotational attractor structures. In this study, it is aimed to provide phase control of the rotational attractor obtained by applying the Euler Rotation Theorem to the Wilson Cowan (W-C) neuron model that is used effectively in the literature to define excitatory and inhibitory synapse structures. In addition, the FPGA (Field Programmable Gate Array)-based hardware implementation study of the rotation-controlled W-C neuron model have also been carried out in order to see its usability in studies required to the real-time signals. With the numerical analyzes, it has been seen that the attractor structure of the rotation-controlled W-C neuron model can be controlled successfully. On the other hand, an alternative study has been reported for the systems designed by inspiring the biology and emulated with electronic equipment

Keywords: Wilson-Cowan neuron model, Excitatory and inhibitory synapse, Euler rotation theorem, Nonlinear systems, Field programmable gate array (FPGA).

etkilere de bağlıdır. Nöronlar arası bağlantı noktalarını niteleyen ve nöronlar arasında bilgi iletiminden sorumlu olan yapılar sinapslardır. Bir nöron etkileşimli olduğu diğer nöronlarla sinaps yapıları aracılığı ile haberleşir. Sinaps yapıları elektriksel ve kimyasal sinaps olmak üzere iki tiptedir: Elektriksel sinapsta doğrudan iletim söz konusudur ve iletim hızlıdır. Kimyasal sinapta ise; presinaptik uçtan salgılanan nörotransmitterler postsinaptik uçtaki reseptörlere bağlanır. Nöronlar arası sinyal iletimi gerçekleştiikten sonra, sinaptik boşlukta nörotransmitter maddeler enzimler tarafından parçalanır ve nöron tarafından tekrar hücre içine alınır. Akson ucundan salgılanan nörotransmitter maddelerin, komşu hücrenin zarında depolarizasyona neden olması ve bilgi işaretinin bir sonraki nörona iletilmesi "Uyarıcı (excitatory) sinaps" olarak tanımlanır. Akson ucundan salgılanan nörotransmitter maddelerin, hücre

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: nimetkorkmaz@kayseri.edu.tr (N. Korkmaz)
Geliş / Received: 29.09.2021 Kabul / Accepted: 14.12.2021 Yayınlanma / Published: 14.01.2022
doi: 10.28948/ngumuh.1002174

zarının polarizasyonunu artırarak (hiperpolarizasyon) bilgi işaretinin nörondan geçişini durdurması ise “engelleyici (inhibitory) sinaps” olarak tanımlanmaktadır. Uyarıcı ve engelleyici etkilerin toplamı postsinaptik nöronda ateşlemeyi kolaylaştırır ya da zorlaştırır [1].

Canlı vücudunda gerçekleşen hücre zarı potansiyeli üretimi ve nöronlar arası işaret işleme gibi biyolojik süreçler, biyolojik nöron modelleri ile başarılı şekilde modellenmektedir. Bu modellerden en kapsamlı olanı Hodgkin-Huxley (H-H) nöron modelidir [2]. Hücre zarında meydana gelen iyonik konsantrasyon değişimi ve voltaj kapılarının açılıp kapanma olasılıkları, bu modelle detaylı olarak tanımlanmıştır. Modelin kapsamlı olması sebebiyle, H-H nöron modeli basitleştirilerek FitzHugh–Nagumo (FHN) nöron modeli elde edilmiştir [3]. FHN nöron modeli basit bir model olması avantajına sahipken, modelin farklı nöron dinamiklerini sergilemedeki eksikliği nedeniyle Hindmarsh–Rose (H-R) nöron modeli geliştirilmiştir [4]. H-R nöron modeli farklı nöral dinamikleri sergileyebilmesinin yanı sıra; elektriksel ve kimyasal kuplajlama sürecini başarılı bir şekilde tanımlayabilmesi sebebi ile nöral senkronizasyon çalışmalarında tercih edilmektedir. Yaklaşık yirmi nöral dinamiği sergileyebilmesi ve basit bir tanımlamaya sahip olması yönüyle öne çıkan Izhikevich nöron modeli de literatürde sıklıkla çalışılmaktadır [5]. Bahsedilen ve benzeri pek çok model literatürde mevcuttur ve bu modellerin her birinin kendisine özgü avantaj ve dezavantajları vardır. Bu çalışmada ise Wilson-Cowan (W-C) nöron modeli üzerinde durulacaktır. Basit uyarıcı ve engelleyici nöron popülasyonları arasındaki etkileşimin dinamiklerini açıklama açısından öne çıkan yapı; W-C nöron modelidir [6]. Bu model nöral popülasyon modellemeye sıklıkla kullanılmaktadır. Modellenen nöronlar basit yapıda olduklarından, model sadece elementer limit döngü davranışı sergilemektedir. Modelin temel amacı bir nöron popülasyonundaki uyarıcı ya da engelleyici alt tiplerinin aktivitelerini ölçmektir. Bu sebeple, W-C nöronal modeli; nöral ağ yapılarının taklidine ihtiyaç duyulan epilepsi nöbetlerinin tespiti, fMRI görüntüleme, görüntü ve ses işleme ve merkezi desen üretici gibi alanlara konu olan bir modeldir [7-9].

Biyolojik nöron modellerinin matematiksel analizlerinde, doğrusal olmayan sistemlerin analizlerinde kullanılan çözümlerinden sıklıkla yararlanılmaktadır. Örneğin, osilatörler ya da kaotik osilatör yapılarının analizleri için kullanılan kararlılık ve kontrol teoremleri gibi yöntemler biyolojik nöron modellerine de başarılı bir şekilde uygulanabilmektedir [10]. Son yıllarda doğrusal olmayan sistemleri konu alan çalışmaların bir kısmında rotasyonlu çeker yapıları ile karşılaşılmaktadır. Bu rotasyonlu çekerler; akışkanlar dinamiğinde, lazer sistemlerinde, kaotik sistemlerde, biyolojik sistemlerde ve nöral sistemlerde gözlemlenmiştir [11-13]. Literatürde kaotik sistemlerde gözlemlenen rotasyonlu çekerlerin modellenmesi için Euler Rotasyon Teoremi’nden yararlanılmıştır [14-15]. Teoremin uygulanabilirliğinin görülmesi açısından, rotasyonlu sistemlerin donanım gerçekleştirmelerini ele alan çalışmalar da yapılmıştır. Kaotik sistemlere uygulanan bu teorem, nöral sistemlerde karşılaşılan rotasyonlu çekerlerin modellenmesi

için de kullanılabilir. Bu kapsamda, bu çalışmada literatürde uyarıcı ve engelleyici sinaps yapılarını tanımlamada etkin kullanılan W-C nöron modeline Euler Rotasyon Teoremi’nin uygulanması ile elde edilen rotasyonlu çekerin faz kontrolünün sağlanması amaçlanmıştır. Ayrıca, gerçek zamanlı işaretlere ihtiyaç duyulabilecek çalışmalarda kullanılabilirliğinin gösterilmesi amacı ile çeker faz açısı kontrol edilen W-C nöron modelinin donanım gerçekleştirim çalışmaları da yapılmıştır. Donanım gerçekleştiriminde; düşük güç tüketimi, donanım maliyeti, hassas parametre ayarı yapabilme imkânı ve programlanabilirlik özelliklerini bir arada bulunduran alan programlanabilir kapı dizisi (Field Programmable Gate Array-FPGA) elemanı kullanılmıştır.

Bu kapsamda Wilson-Cowan nöron modelinin esasları ve modelin nümerik simülasyonu ele alındıktan sonra; modele rotasyon dönüşümünün uygulanması ile elde edilen sonuçlar Bölüm 2’de sunulacaktır. FPGA tabanlı gerçekleştirime dair ayrıntılar ve deneysel gerçekleştirim sonuçları ise Bölüm 4’te verilecektir. Sistemin gerçekleştirimi sonrasındaki alan kullanımı ve sentez sonuçları ile ilgili ayrıntılar ve elde edilen çıktılar son bölümde tartışılacaktır.

2 Rotasyon kontrollü Wilson-Cowan nöron modeli

Wilson-Cowan (W-C) nöron modeli; bir nöral popülasyonunun ortalama aksiyon potansiyeli frekansını, sürekli zamanın bir fonksiyonu olarak tanımlar. Modelin temel varsayımı, beyin aktivitesinin uyarıcı ve engelleyici popülasyonlar arasındaki etkileşimlerle tanımlanabileceğidir. Bu nedenle W-C nöron modelinin durum değişkenleri, sırasıyla “Uyarıcı (Excitatory)” ve “engelleyici (Inhibitory)” artış oranları olan ‘E’ ve ‘I’ parametreleridir. Bilinen nöroanatomiye dayanarak, Wilson ve Cowan, bireysel hücreler arasında rastgele ve yoğun bir bağlantı olduğunu ve ağdaki herhangi iki hücre arasında en az bir bağlantıya imkân sağlandığını varsaymışlardır. Wilson ve Cowan, lokalize bir kortikal alanda zamansal dinamikleri araştırmak için 1972 tarihli orijinal makalelerinde uzamsal etkileşimleri ihmal etmişlerdir [6]. Daha sonra modellerini 1973 tarihli çalışmalarında uzamsal olarak dağılmış sinir popülasyonlarına genişletmiş ve kortikal ve talamik doku tabakalarını modellemişlerdir [16]. 1999’da Wilson, kortikal yapıları temsil eden ‘E’ ve ‘I’ popülasyonlarının lokalize kümelerinden oluşan ve kortikal dokunun işbirlikçi davranışını tanımlayan basitleştirilmiş matematiksel bir nöral form geliştirmiştir [17]. Son olarak, modelin en basit hali olan ve popülasyon ateşlenme oranını pozisyonundan bağımsız olarak homojen bir korteks şeklinde modelleyen Denklem (1)’deki model türetilmiştir [18]:

$$\begin{aligned}\tau_E \frac{dE}{dt} &= -E + f_E(c_{EE}E - c_{IE}I + P) \\ \tau_I \frac{dI}{dt} &= -I + f_I(c_{EI}E - c_{II}I + Q)\end{aligned}\quad (1)$$

Burada ‘E’ ve ‘I’ uyarıcı ve engelleyici ateşlenme oranlarıdır. ‘ τ_E ’ ve ‘ τ_I ’ sırasıyla ‘E’ ve ‘I’ değişkenlerinin zaman sabitleridir. ‘ c_{EE} , ‘ c_{IE} , ‘ c_{EI} ve ‘ c_{II} ’ Şekil 1’de görüldüğü gibi sinaptik kuplajlama ağırlıklarıdır. Burada zaman

sabitleri $\tau_E=1$ ve $\tau_I=1$ değerlerine ve sinaptik ağırlıklar sırasıyla $(c_{EE}, c_{IE}, c_{EI}, c_{II})=(5, 5, 5, 3)$ değerlerine ayarlanmıştır. Bu parametre değerleri ile $\Delta h=0.01$ adım aralıklı Euler ayıklama yöntemi kullanılarak yapılan ve maksimum iterasyon sayısının $N=5000$ alındığı nümerik simülasyona ait sonuçlar Şekil 2’de sunulmaktadır. Kartezyen Koordinat Sistemi’nde (x, y, z) noktaları ile tanımlanan bir sistem, rotasyon dönüşümü sonrasında, $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ olmak üzere alternatif bir küme ile tanımlanabilir.

‘fE’ ve ‘fI’ doğrusal olmayan özdeş fonksiyonlardır. Literatürde Wilson-Cowan nöron modelinin ele alındığı çalışmaların genelde ilgili doğrusal olmayan fonksiyonlar Denklem (2a)’da verilen fonksiyonla tanımlanırken, bu fonksiyon yerine Denklem (2b) ve Denklem (2c)’deki alternatif tanımlamaların kullanıldığı çalışmalar da literatürde mevcuttur [19-21]. Bu çalışmada ‘fE’ ve ‘fI’ doğrusal olmayan fonksiyonları Denklem (2c)’deki gibi tanımlanmıştır.

$$f_j(\Theta) = \frac{1}{1 - \exp(-\alpha_j(\Theta - \theta_j))}, \quad j \in [E, I] \quad (2a)$$

$$f_j(\Theta) = \tanh(\mu\Theta), \quad j \in [E, I] \quad (2b)$$

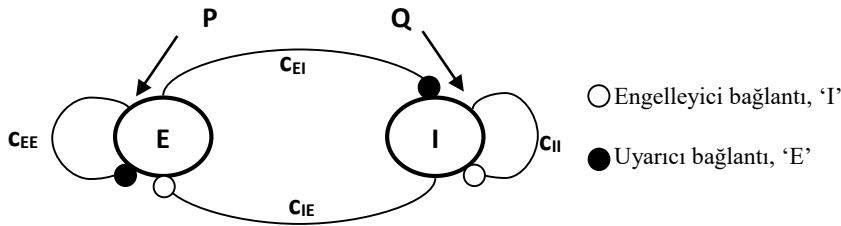
$$f_j(\Theta) = \eta[|\Theta + 1| - |\Theta - 1|], \quad j \in [E, I] \quad (2c)$$

Buna göre, bahsi geçen iki kümenin orijinde çakışık; fakat doğrultularının farklı olduğu kabulü yapılır [14]. Ortogonalite koşulu gereği, vektörler eksenlerde döndürülse de uzunlukları sabit kalmalıdır. İki bileşenle tanımlanabilen bir vektörün bileşenlerinin rotasyon işlemi sonrasındaki tanımlamaları aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned} \hat{x} &= x \cos \theta - y \sin \theta \\ \hat{y} &= x \sin \theta + y \cos \theta \end{aligned} \quad (3)$$

Rotasyon işleminin doğrusal karakteristiği sayesinde alternatif kümeler arasındaki dönüşüm matrisel bir formda tanımlanabilir $(\hat{x} = R x)$. Burada ‘R’ rotasyon matrisidir ve Denklem (4)’teki gibi tanımlanmaktadır:

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (4)$$



Şekil 1. Wilson-Cowan nöron modelinin genel özelliklerini temsil eden şematik bir gösterim.

Burada Denklem (1)’deki ‘W-C’ nöron modelinin ‘E’ durum değişkeni ‘x’ ve ‘I’ durum değişkeni ‘y’ parametresi gibi düşünülerek Denklem (4)’e adapte edilebilir. Burada matrisel çarpma işlemi sonucunda Denklem (5)’teki ifade elde edilir:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{E}} &= \cos \theta [(-E + f_E(c_{EE}E - c_{IE}I + P)) / \tau_E] \\ &\quad - \sin \theta [(-I + f_I(c_{EI}E - c_{II}I + Q)) / \tau_I] \\ \dot{\hat{I}} &= \sin \theta [(-E + f_E(c_{EE}E - c_{IE}I + P)) / \tau_E] \\ &\quad + \cos \theta [(-I + f_I(c_{EI}E - c_{II}I + Q)) / \tau_I] \end{aligned} \quad (5)$$

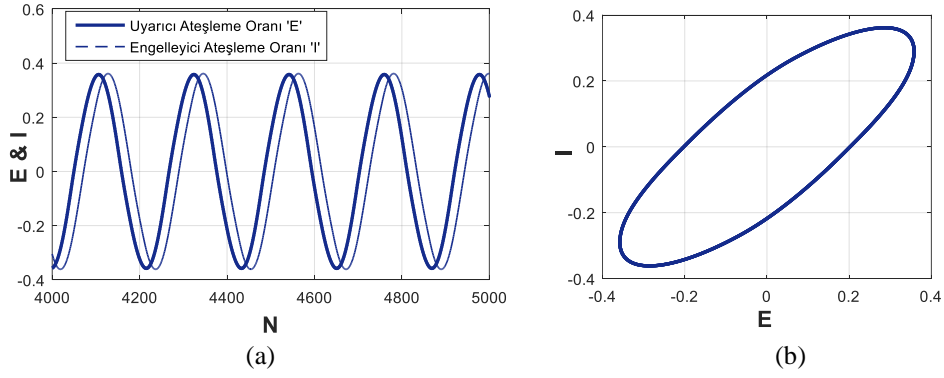
Denklem (5)’te rotasyon matrisinin tersi alınarak $(x = R' \hat{x})$ bir düzenleme yapılırsa;

$$\begin{aligned} T_1 &= E = \hat{E} \cos \theta + \hat{I} \sin \theta \\ T_2 &= I = -\hat{E} \sin \theta + \hat{I} \cos \theta \end{aligned} \quad (6)$$

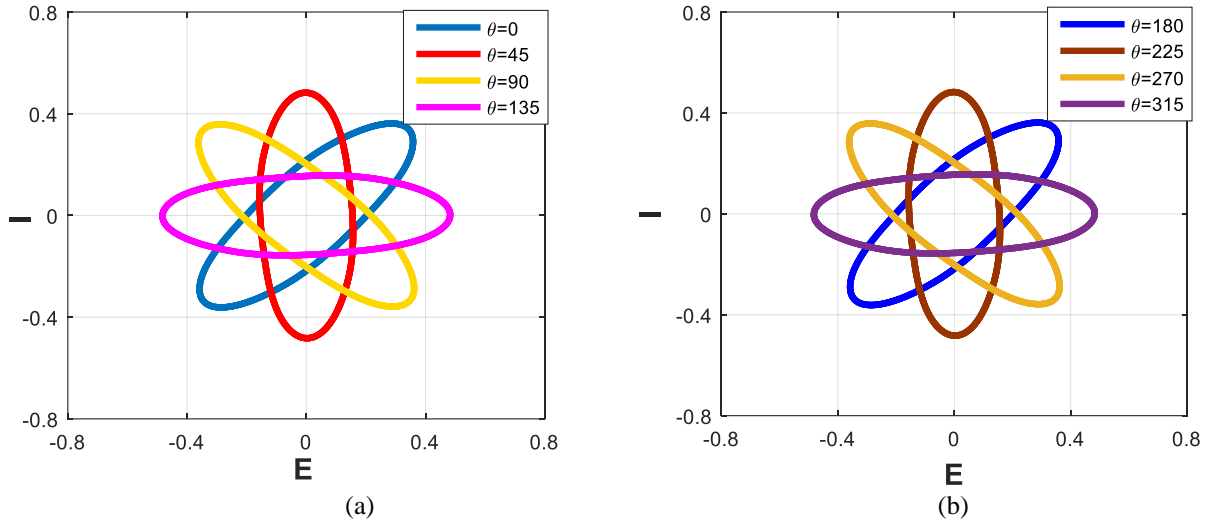
elde edilir ve buna göre Denklem (5) yeniden düzenlenerek, Denklem (7)’deki rotasyon kontrollü W-C nöron modeli tanımlanabilir:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{E}} &= \cos \theta [(-T_1 + f_E(c_{EE}T_1 - c_{IE}T_2 + P)) / \tau_E] \\ &\quad - \sin \theta [(-T_2 + f_I(c_{EI}T_1 - c_{II}T_2 + Q)) / \tau_I] \\ \dot{\hat{I}} &= \sin \theta [(-T_1 + f_E(c_{EE}T_1 - c_{IE}T_2 + P)) / \tau_E] \\ &\quad + \cos \theta [(-T_2 + f_I(c_{EI}T_1 - c_{II}T_2 + Q)) / \tau_I] \end{aligned} \quad (7)$$

Bu tanımlamada $\theta = [0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315]$ derece değerleri için yapılan ve W-C nöron modeli durum değişkenlerinin belirtilen açı değerlerindeki faz portresi gösterimlerinin birbiri üzerine çizdirilmesi ile elde edilen nümerik simülasyon sonucu Şekil 3’te sunulmuştur. Bu gösterimlerden elde edilen sonuçlara göre; $\theta = [0, 45, 90, 135]$ açı değerlerinde elde edilen faz portreleri (Şekil 3.a) sırasıyla $\theta = [180, 225, 270, 315]$ derecelerinde elde edilen faz portreleri (Şekil 3.b) ile aynıdır. Bu sebeple sekiz farklı açı değeri için simülasyon yapılmasına rağmen, dört farklı konumda faz portresi elde edilmiştir.



Şekil 2. Wilson-Cowan nöron modelinin nümerik simülasyon sonuçları: a) 'E' ve 'I' durum değişkenlerinin zaman domeni cevapları, b) Bu dinamiklerin faz portreleri.



Şekil 3. Rotasyon kontrollü W-C nöron modelinin; a) $\theta = [0, 45, 90, 135]$ açı değerleri, b) $\theta = [180, 225, 270, 315]$ açı değerleri için faz portresi gösterimleri.

3 Rotasyon kontrollü W-C Nöron modelinin FPGA tabanlı gerçekleştirimi

Biyolojiden esinlenilerek tasarlanan sistemlerin donanım gerçekleştirimi çalışmalarında kullanılan elektronik ekipmanın; düşük güç ve alan tüketimi, farklı tasarımların ilave süreçlere ihtiyaç duyulmaksızın denenmesine imkan sağlama ve hızlı prototiplendirme gibi özelliklere sahip olması en çok tercih edilen özelliklerden bazılarıdır. Doğrusal olmayan sistemlerin rotasyon kontrolünün donanım doğrulaması ile desteklediği çalışmalarda, malzeme temini ve pratik gerçekleştirim açısından avantaj sağlayan ayrık elemanlarla gerçekleştirim çalışmaları literatürde mevcutken, yukarıda bahsedilen özelliklerin pek çoğunu bir arada bulunduran programlanabilir ve yeniden yapılandırılabilir analog/dijital donanımların kullanıldığı çalışmalar da son yıllarda dikkat çekmektedir [12, 13, 15]. Bu çalışmada rotasyon kontrollü W-C nöron modelinin donanım gerçekleştirimi için; yukarıda bahsedilen özelliklere ilaveten paralel çalışma prosedürüne de sahip olan ve pek çok araştırmanın prototip gerçekleştirimi için tercih edilen alan programlanabilir kapı elemanı (FPGA) kullanılmıştır. FPGA elemanı programlanabilirlik ve

yeniden yapılandırılabilirlik özelliklerine sahip olan, paralel çalışma prosedürü ile işleyen ve dijital özellikte olan bir elektronik ekipmandır. Bu sebeple, bu çalışmada ele alınan ve diferansiyel denklemlerle tanımlanan rotasyon kontrollü W-C sisteminin FPGA tabanlı gerçekleştirimi için; ilgili sistem ayrık zamanlı bir ifadeye dönüştürülmelidir. Burada bu dönüşüm işlemi için, önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi Euler ayrıklaştırma yöntemi kullanılmış ve adım büyüklüğü $\Delta h = 0.01$ olarak ayarlanmıştır. Denklem (7)'deki sisteme ayrıklaştırma yöntemi uygulandıktan sonra elde edilen nihai tanımlama Denklem (8)'de verilmektedir:

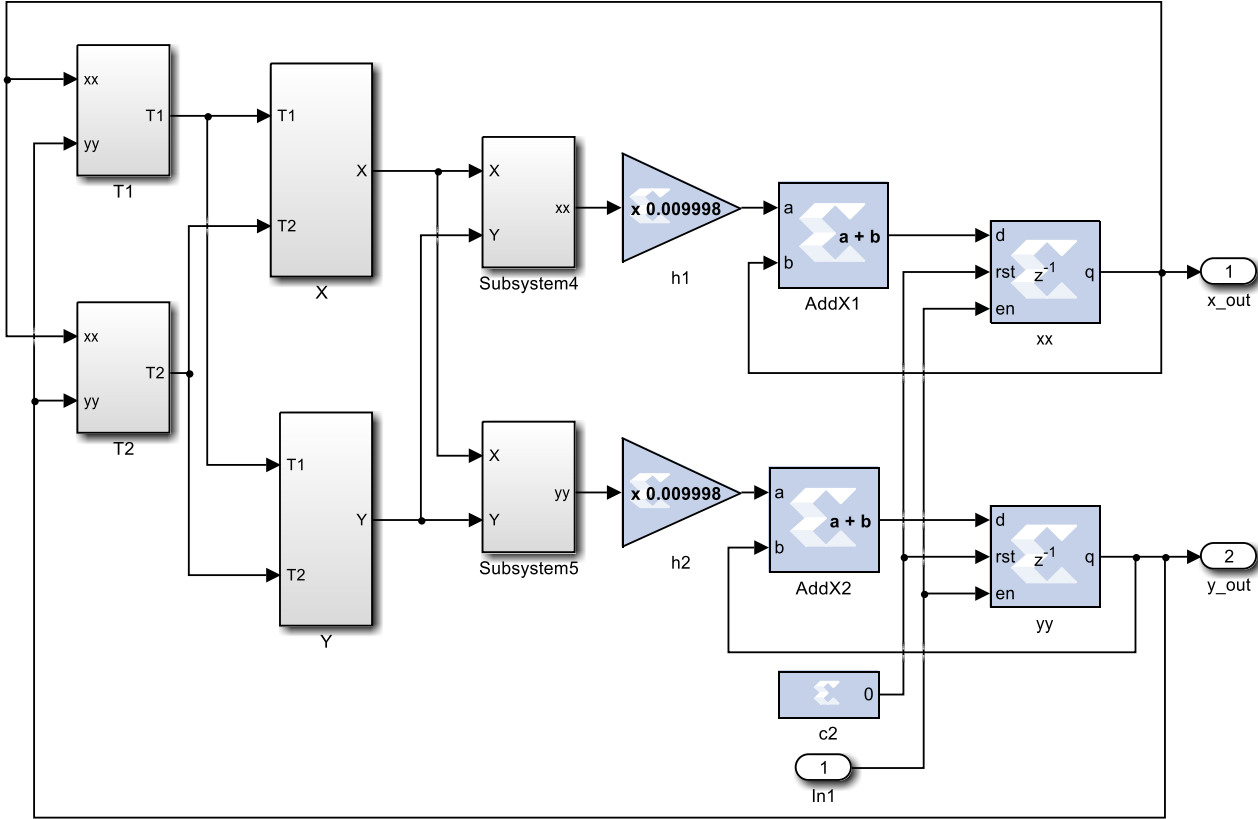
$$\begin{aligned} \hat{E}_{n+1} &= \{ \cos \theta [(-T_1 + f_E (c_{EE} T_1 - c_{IE} T_2 + P)) / \tau_E] \\ &\quad - \sin \theta [(-T_2 + f_I (c_{EI} T_1 - c_{II} T_2 + Q)) / \tau_I] \} \\ &\quad \Delta h + \hat{E}_n \\ \hat{I}_{n+1} &= \{ \sin \theta [(-T_1 + f_E (c_{EE} T_1 - c_{IE} T_2 + P)) / \tau_E] \\ &\quad + \cos \theta [(-T_2 + f_I (c_{EI} T_1 - c_{II} T_2 + Q)) / \tau_I] \} \\ &\quad \Delta h + \hat{I}_n \end{aligned} \quad (8)$$

Denklem (8) ile tanımlanan rotasyon kontrollü W-C nöron modelinin FPGA tabanlı gerçekleştirimi için “DSP’ler için Sistem Üretici (System Generator for DSP-XILINX™-SG_{DSP})” programı kullanılmıştır. Bu program MATLAB-SIMULINK™ programı ile XILINX™ tarafından sağlanan kodlar arasında otomatik dönüşüm imkânı sağlamaktadır. MATLAB-SIMULINK™ üzerinde oluşturulan sistem, dönüşüm işleminin ardından doğrudan XILINX™ tarafından üretilen FPGA donanımına gömülebilmektedir [22]. Şekil 4’te rotasyon kontrollü W-C nöron modeli için SG_{DSP} aracı ile tasarlanmış bir şema görülmektedir. Bu şemada $\theta = [0, 45, 90, 135]$ açı değerleri için hesaplamalar ayrı ayrı yapılmış dolayısı ile sonuçlar da ayrı ayrı kaydedilmiştir. Tasarımda Q(32,18) bit sabit noktalı aritmetik kullanılmış ve otomatik dönüşüm sonrası elde edilen kodlar XILINX™ firmasının SPARTAN-3AN geliştirme kartına gömülmüştür. Bu kart üzerinde dâhili bir dijital-analog dönüştürücü (LTC2624) bulunmaktadır. Şekil 5’te sunulan rotasyon kontrollü W-C nöron modelinin $\theta = [0, 45, 90, 135]$ açı değerlerinde yapılan ölçümleri için elde edilen sonuçlar, bahsedilen dijital-analog dönüştürücü kullanılarak kaydedilmiştir. Şekil 5’te kullanılan osiloskopun, desenleri üst üste çizdirme fonksiyonundan yararlanılarak ölçülen $\theta = [0, 45, 90, 135]$ değerleri için faz portresi gösterimleri görülmektedir. Bu gösterim Şekil 3’teki nümerik simülasyon sonucu elde edilen desenle oldukça benzerdir. Bu benzerlikten de görüleceği gibi, rotasyon kontrollü W-C nöron modelinin FPGA tabanlı donanım gerçekleştirimi başarılı bir şekilde

sonuçlandırılmıştır. Bu gerçekleştirmelerden $\theta = 45$ derece için yapılan FPGA tabanlı gerçekleştirim çalışmasında, tasarlanan yapıya ait bazı sentez sonuçları Tablo 1’de sunulmaktadır.

Tablo 1. Rotasyon Kontrollü W-C nöron modelinin FPGA tabanlı gerçekleştirimindeki alan kullanımı ve sentez sonuçları

11777 adet REGISTER’da kullanılan sayısı	108 (%1)
11777 adet 4 giriş LUT’ta kullanılan sayısı	2963 (%23)
5888 adet SLICE’da kullanılan sayısı	3229 (%27)
24 Adet BUFGMUX’ta kullanılan sayısı	2 (%8)
20 Adet MULT18X18SIO’da kullanılan sayısı	0 (%0)
Maksimum gecikme (ns)	1.060

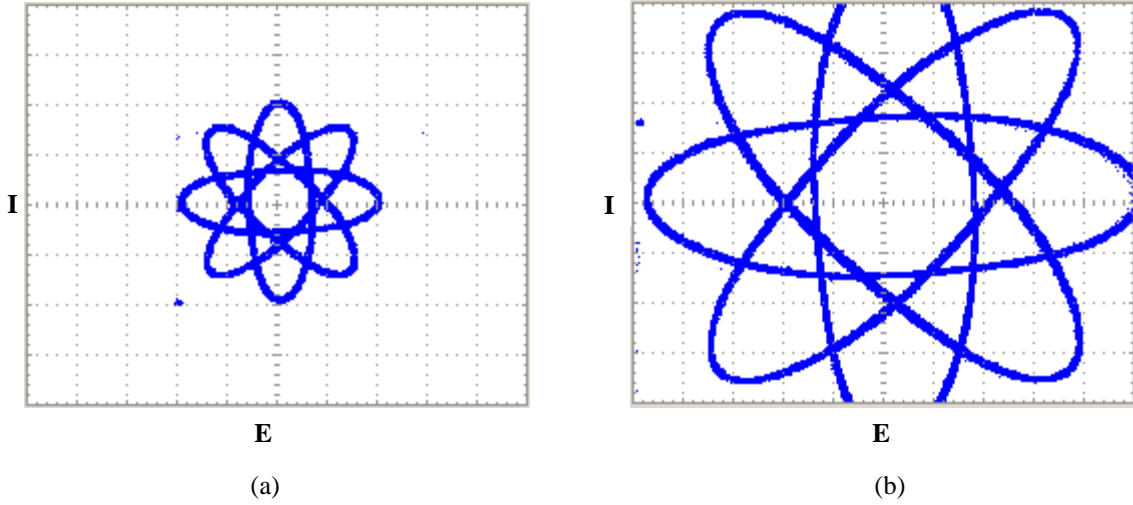


Şekil 4. Rotasyon kontrollü W-C nöron modeli için SGDSP aracı ile tasarlanmış bir şema.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada uyarıcı ve engelleyici nöron popülasyonları arasındaki etkileşimi açıklama açısından öne çıkan Wilson-Cowan nöron modelinin dinamik çeker yapısının rotasyon dönüşüm işlemi ile kontrol edilebilirliği üzerinde durulmuştur. W-C nöron modelinin tanıtılması, nümerik simülasyonunun yapılmasının ardından, modele rotasyon dönüşüm işlemleri başarılı bir şekilde uygulanmış ve modelin çeker yapısının faz kontrolü başarılı bir şekilde sağlanmıştır. Faz kontrolünün etkililiğinin görülmesi için aç

değerleri [0-360] derece aralığında 45'er (kırk beş) derece adımlarla değiştirilmiş ve bu açı değerlerinde W-C nöron modelinin dinamik çeker rotasyonu gözlemlenmiştir. Ardından, takip edilen prosedürün donanım gerçekleştirim uygulamalarına adapte edilebilirliğinin gösterilmesi amacı ile rotasyon kontrollü W-C nöron modelinin FPGA elemanı ile gerçekleştirimi yapılmıştır. Gerçekleştirim sürecinde "System Generator for DSP" aracından yararlanılmıştır. Kaydedilen deneysel sonuçlar, rotasyon kontrollü bir sistemin FPGA donanımı ile başarılı bir şekilde gerçekleştirilebileceğini göstermektedir.



Şekil 5. Rotasyon kontrollü W-C nöron modelinin FPGA tabanlı gerçekleştirimi ile $\theta = [0, 45, 90, 135]$ değerleri için elde edilen faz portresi gösterimleri: a) $x=y=500$ mV/div, b) $x=y=200$ mV/div.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %10

Kaynaklar

- [1] E. R. Kandel, J. H. Schwartz ve T. M. Jessell, Principles of Neural Science. 4th ed. McGraw-Hill, New York. ISBN 0- 8385-7701-6, 2000.
- [2] A. L. Hodgkin ve A. F. Huxley, A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. The Journal of Physiology, 117(4), 500-544, 1952. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1952.sp004764>
- [3] R. FitzHugh, Mathematical models for excitation and propagation in nerve. In: Schawn, H.P. (ed.) Biological Engineering, vol. 1, pp. 1–85. McGraw-Hill, New York, 1969.
- [4] J. L. Hindmarsh ve R. M. Rose, A model of neural bursting using three couple first order differential equations. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 221(1222), 87–102, 1984. <https://doi.org/10.1098/rspb.1984.0024>
- [5] E. M. Izhikevich, Simple model of spiking neurons. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 14(6), 1569–1572, 2003. <https://doi.org/10.1109/tnn.2003.820440>
- [6] H. R. Wilson ve J. D. Cowan, Excitatory and inhibitory interactions in localized populations of model neurons. Biophysical Journal, 12 (1), 1–24, 1972. [https://doi.org/10.1016/S0006-3495\(72\)86068-5](https://doi.org/10.1016/S0006-3495(72)86068-5)
- [7] M. Bertalmío ve J. D. Cowan, Implementing the Retinex algorithm with Wilson–Cowan equations. Journal of Physiology - Paris, 103(1-2), 69-72, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jphysparis.2009.05.001>
- [8] X. Lin, S. Zhou, Li, H. Tang ve Y. Qi, Rhythm oscillation in fractional order Relaxation oscillator and its application in image enhancement. Journal of Computational and Applied Mathematics, 339, 69-84, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2018.01.027>
- [9] C. M. Pinto ve A. P. Santos, Modelling gait transition in two-legged animals. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 16(12), 4625-4631, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2011.05.033>
- [10] L. M. Pecora ve T. L. Carroll, Synchronization in chaotic systems. Physical Review Letters, 64(8), 821, 1990. <https://doi.org/10.1063/1.4917383>
- [11] S. K. Bhowmick, B. K. Bera ve D. Ghosh, Generalized counter-rotating oscillators: mixed synchronization.

- Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 22(1–3), 692–701, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2014.09.024>
- [12] A. Sharma, M. Dev Shrimali ve S. Kumar Dana, Phase-flip transition in nonlinear oscillators coupled by dynamic environment. *Chaos*, 22(2), 023147, 2012. <https://doi.org/10.1063/1.4729459>
- [13] A. Prasad, S. K. Dana, R. Karnatak, J. Kurths, B. Blasius ve R. Ramaswamy, Universal occurrence of the phase-flip bifurcation in time-delay coupled systems. *Chaos*, 18(2), 023111, 2008. <https://doi.org/10.1063/1.2905146>
- [14] G. B. Arfken, H. J. Weber, *Mathematical methods for physicists*. 6th edn. Elsevier Academic Press, Cambridge. ISBN 0-12-088584-0, 1999.
- [15] N. Korkmaz, A Phase Control Method for the Dynamical Attractor of the HR Neuron Model: The Rotation-Transition Process and Its Experimental Realization. *Neural Processing Letters*, 53, 3877–3892, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11063-021-10568-w>
- [16] H. R. Wilson ve J. D Cowan, A mathematical theory of the functional dynamics of cortical and thalamic nervous tissue, *Kybernetik*, 13(2), 55–80, 1973. <https://doi.org/10.1007/BF00288786>
- [17] H. R. Wilson, *Spikes, decisions, and actions: the dynamical foundations of neuroscience*, Oxford University Press, 1999.
- [18] E. Negahbani, D. A. Steyn-Ross, M. L. Steyn-Ross, M. T. Wilson ve J. W. Sleight, Noise-induced precursors of state transitions in the stochastic Wilson–Cowan model. *The Journal of Mathematical Neuroscience (JMN)*, 5(1), 1-27, 2015. <https://doi.org/10.1186/s13408-015-0021-x>
- [19] S. Ahmadizadeh, D. Nešić, D. R. Freestone ve D. B. Grayden, On synchronization of networks of Wilson–Cowan oscillators with diffusive coupling. *Automatica*, 71, 169-178, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2016.04.030>
- [20] J. D. Cowan, J. Neuman ve W. Van Drongelen, Wilson–Cowan equations for neocortical Dynamics. *The Journal of Mathematical Neuroscience*, 6(1), 1-24, 2016. <https://doi.org/10.1186/s13408-015-0034-5>
- [21] P. J. Srinidhi, T. R. Yashaswini, N. Uttunga, S. A Ali ve M. R. Ahmed, Implementation of STDP based learning rule in neuromorphic CMOS circuits. In *IEEE 2017 International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*, 1105-1110, Madurai, India, June 2017. doi: [10.1109/iccons.2017.8250637](https://doi.org/10.1109/iccons.2017.8250637)
- [22] www.xilinx.com, Date of access: 28.09.2021.





Türkiye'nin endüstriyel elektrik tüketimine yönelik depolama gazı enerji potansiyeli

Landfill gas energy potential towards Turkey's industrial electricity consumption

Burhan Baran^{1,*} 

¹ İnönü Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 44280, Malatya, Türkiye

Özet

Bu çalışmada Türkiye'deki kentsel katı atıklardan elde edilen metan gazına bağlı elektrik üretiminin endüstriyel elektrik tüketimini karşılama oranı üzerine bir tahmin çalışması yapılmıştır. Tahminler yapılırken matrix laboratory (Matlab) ortamında yazılan eğri uydurma yöntemi, holt linear trend yöntemi ve excel tahmin sayfası uygulaması kullanılmıştır. Çalışmalar sonucunda en düşük ortalama mutlak hata yüzdesi (MAPE) değerleri nüfus için % 0.07, kentsel katı atık (KKA) için % 16.6 ve endüstriyel elektrik tüketimi (EET) için % 5.9 olarak elde edilmiştir. Yıllar içinde oluşacak metan gazı miktarını hesaplamak için ise Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) v.3.02 kullanılmıştır. Model tarafından hesaplanan metan gazı verileri dikkate alınarak 2017-2025 yılları arasında elde edilebilecek elektrik enerjisi miktarının tahmini yapılmıştır. Elde edilen değerlere göre 2025 yılında metan gazından elde edilebilecek elektrik enerjisinin 2155.55 GWh olacağı, bu üretim değeri ile EET'nin % 1.464'lük kısmının karşılanabileceği tahmin edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Depo gazı, Dağıtık üretim, Endüstriyel elektrik, Enerji geri kazanımı, Kentsel katı atık

1 Giriş

Dünya nüfusunun çoğu kentlerde yaşamayı tercih etmektedir. Bu tercihe bağlı olarak kentlerdeki nüfus ve KKA miktarı sürekli artış göstermektedir. KKA miktarındaki bu artış ise sosyo-ekonomik ve çevresel sorunları beraberinde getirmektedir. Ortaya çıkan çevresel sorunlardan biri KKA'ların bertaraf edilmesi konusudur. Bunun yanında, nüfus ve ekonomik refah düzeyinin artışına bağlı olarak elektrik enerjisi tüketimi de sürekli artış göstermektedir. Dünyadaki elektrik enerjisi ihtiyacının yaklaşık % 24.2'si doğalgazdan, % 29'u kömürden karşılanmaktadır. Petrolen karşılanma oranı ise % 32.8 civarındadır. Geriye kalan % 14 civarındaki ihtiyaç ise yenilenebilir ve hidro enerji kaynakları tarafından sağlanmaktadır. En büyük karşılama oranına sahip fosil enerji kaynaklarının yakın gelecekte dünyanın enerji ihtiyacını karşılayamayacağı konusunda görüş birliği söz konusudur. Bu açıdan bakıldığında katı atıktan enerji gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanıma sunulması gerekmektedir [1-4]. Atık depolama alanlarındaki KKA'lar

Abstract

In this study, an estimation study had been made on the rate of meeting industrial electricity consumption of electricity generation based on methane gas obtained from municipal solid waste in Turkey. While making estimates, curve fitting method written in Matrix laboratory (Matlab) environment, holt linear trend method and excel forecast sheet application were used. As a result of the studies, the lowest Mean absolute error percentage (MAPE) values were obtained as 0.07% for the population, 16.6% for municipal solid waste (MSW) and 5.9% for industrial electricity consumption (IEC). Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) v.3.02 was used to calculate the amount of methane gas to be generated over the years. Considering the methane gas data calculated by the model, the amount of electrical energy that could be obtained between 2017-2025 was estimated. According to the values obtained, it was estimated that the electrical energy that could be obtained from methane gas in 2025 would be 2155.55 GWh, and with this generation value, 1.464% of IEC could be met.

Keywords: Landfill gas, Distributed generation, Industrial electricity, Energy recovery, Municipal solid waste.

elektrik üretiminde kullanılabilen metan gazı içermektedirler. KKA bulunan atık depolama sahalarında gerçekleşen reaksiyonlar sonucunda biyogaz oluşmaktadır. Bu gaz depo gazı olarak da adlandırılmaktadır. Depo gazı içeriğindeki metan oranı % 50 iken karbondioksit oranı % 45 civarındadır. Geriye kalan % 5'lik kısımda ise hidrojen sülfür, amonyak ve metan içermeyen organikler bulunmaktadır. Bu değerler dikkate alındığında metan gazı üretimi için temel kaynak olarak atık depolama sahaları gösterilebilir. Depolama alanlarından elde edilen metan gazı, 1800-1900 kJ Nm⁻³ arasında yüksek bir enerji potansiyeline sahiptir. Metan içeren depo gazından elektrik üretiminin iki aşaması bulunmaktadır. Birinci aşama çöp gazı depolama alanı, gaz toplama boruları, gaz arıtma tesisi ve sürekli gaz izleme sisteminden oluşan aşamadır. Depolama alanında bulunan lotlarının altında biriken depo gazı toplama sistemleri aracılığıyla toplanmaktadır. İkinci aşama ise, gazın enerji amaçlı doğrudan kullanılması aşamasıdır. Öncelikle, toplanan gaz soğutma-yoğunlaştırma ve filtreler vasıtasıyla su ve toz taneciklerinden arındırılmaktadır. Ardından gaz elektrik üretim tesisine doğru beslenmektedir. Jeneratörler

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: burhanbaran@gmail.com (B. Baran)

Geliş / Received: 13.02.2021 Kabul / Accepted: 25.09.2021 Yayımlanma / Published: 14.01.2022

doi: 10.28948/ngumuh.879785

tarafından metan gazının yakılması ile elektrik üretimi gerçekleştirilmektedir [5-8].

Depo gazından elektrik üretimi ile alakalı çalışmalar yapılmıştır. Şentürk vd. [9] tarafından yapılan çalışma ile Sivas ili katı atık düzenli depolama sahasından elde edilen çöp gazı miktarı ve elektrik üretimi için kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışmada LandGEM modeli kullanılmıştır. Çıkan toplam gaz ve metan emisyonlarının maksimum miktarlarını sırasıyla $7.976E+06$ m³/yıl ve $4.068E+06$ m³/yıl olarak hesaplamışlardır. 2030 yılında üretilen en yüksek enerji miktarını ise 2947 kWh olarak hesaplamışlardır. Mboowave vd. [10] Dhanbad'daki üç depolama alanındaki metan konsantrasyonuna bağlı olarak elde edilebilecek enerji miktarını tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Üç depolama alanından elde edilen kentsel katı atıklardaki ortalama enerji içeriğini yaklaşık olarak 11,97 MJ/kg olarak hesaplamışlardır. Çalışma sonucunda, nem ile organik atıkların bileşimi ve metan gazı emisyonlarının miktarı arasında bir ilişki olduğu, ayrıca KKA'nın kuru bazda kalorifik değerinin yaklaşık olarak 13,0 MJ/kg olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Rajaeifar vd. [11] tarafından üç farklı teknolojinin uygulanması yoluyla ve kentsel katı atığın elektrik üretimi kaynağı olarak kullanılması durumunda sera gazı emisyonundaki azalmayı tespit etmeye yönelik bir çalışma yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda, İran'da KKA'dan yılda 5.005,4-5.545,8 GW gücün üretilebileceği ve bu sonucu göre İran'ın sera gazı emisyonunun 2030 yılına kadar % 4 azaltılabileceği tahmin edilmiştir. Das vd. [12] tarafından yapılan çalışmada, Hindistan'daki altı büyük şehirde KKA'dan elde edilebilen depo gazı miktarını tahmin etmek için dört model kullanılmıştır. Bu modeller birinci derece, çok fazlı, LandGEM ve EPER'dir. Çalışma sonucunda atmosfere büyük miktarda depo gazı yayıldığı ve metandan enerji üretimi için büyük bir potansiyel olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, kentsel katı atıklarının uygun şekilde yönetilmesiyle atıkların faydalı enerjiye dönüştürüleceği sonucuna ulaşılmıştır. Yechiel ve Shevah [13] kentsel katı atıklardaki depo gazından üretilen elektrik enerjisini değerlendirmek üzere bir doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir. Analiz sonuçlarına göre, kullanılan modelin geri dönüşünün diğer yöntemlere göre % 20 oranında daha yüksek olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Scarlet vd. [14] Afrika bölgesindeki depo gazlarından elde edilebilecek toplam enerji potansiyelinin tahmini üzerine bir çalışma yapmışlardır. Atıklardan ve çöp sahalarında üretilen depo gazının enerji potansiyelinin mekansal analizi yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda 2025 yılında bahsi geçen bölgedeki toplam elektrik üretiminin 122,2 TWh olacağı tahmin edilmiştir. Güven [7] tarafından yapılan çalışmada, Türkiye'nin Ege bölgesindeki bazı illerde 20 yıl boyunca katı atıkların depolanması durumunda elde edilebilecek metan gazı miktarı araştırılmıştır. Bu gazdan elde edilen elektrik enerjisi değerleri hesaplanmıştır. Metan gazından elde edilebilecek elektriğin Ege Bölgesi'ndeki konut elektrik ihtiyacının bir kısmını karşılayabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Gök [5] tarafından yapılan çalışmada Niğde ilinde depolama sahasında oluşacak metan gazı ve elektrik üretim miktarları farklı modeller kullanılarak hesaplanmıştır. Gelecekteki

metan gazı potansiyelini hesaplamak için TNO, Tabasarran ve Rettenberger, Çok Fazlı Model ve ABD EPA LandGEM birinci derece modelleri kullanılmıştır. 2042 yılı için maksimum elektrik üretiminin 6,9 milyon kWh olacağı hesaplanmıştır. Özer [15], Edirne'de KKA'dan elde edilebilecek elektrik enerjisinin hesaplanması üzerine bir çalışma yapmıştır. Çöp gazından elde edilebilecek elektriğin 2045 yılında 28.673 MWh olacağı tahmininde bulunmuştur. Sarptaş [16] tarafından yapılan çalışmada, İzmir Harmandalı düzenli depolama alanında üretilen depo gazı miktarının ve bu gaz miktarını dikkate alarak LandGEM ve farklı modeller kullanılmak suretiyle enerji potansiyelini belirlemişlerdir. Maksimum enerji potansiyelinin 9,6 MW olduğu tahmin edilmiştir. Ayrıca, bu çalışmaların dışında, enerji geri kazanımı ve metan gazından elektrik üretimi ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır [1, 17-23].

Bu çalışma ile eğri uydurma (Matlab), holt linear (excel), tahmin sayfası (excel) uygulaması ve LandGEM kullanılmak suretiyle KKA, EET, depo gazı tahminleri, metan gazından elde edilebilecek elektrik enerjisi hesaplamaları ile bu gazdan elde edilen tahmini elektrik üretiminin toplam EET'yi karşılama oranının hesaplanması amaçlanmıştır. En düşük MAPE (%) değerini veren yöntemin gelecek yıllardaki tahmini değerleri kullanılmıştır. Bu çalışma ile literatürdeki çalışmalardan farklı olarak gelecek yıllara dair nüfus, atık miktarı ve EET tahminleri yapılarak, KKA'dan tarafından karşılama oranları belirlenmiştir. Tahmin sonuçlarının doğruluğunun ölçümünde ortalama mutlak hata yüzdesi (MAPE) yöntemi kullanılmıştır. Model tarafından oluşacak metan gazı miktarı 2157 yılına kadar hesaplanmıştır. Elde edilen metan gazı verileri dikkate alınarak 2017-2025 yılları arasında elde edilebilecek elektrik enerjisi miktarı hesaplanmıştır. Bu bağlamda, tüm şehirlerde önemli ölçüde gider kaynağı olan kentsel katı atıkların elektrik enerjisine dönüştürülmesi ve bu enerjinin sanayi bölgeleri elektrik enerjisi talebinde kullanılması açısından elde edilen tahmini verilerin yol gösterici olacağı düşünülmektedir. Çalışmanın bundan sonraki kısmı şu bölümlerden oluşmaktadır. İkinci bölüm materyal ve metod bölümü olup, burada tahmin sayfası uygulaması, eğri uydurma, holt linear yöntemi ile LandGEM uygulamasından bahsedilmiştir. Bu yöntemler kullanılarak nüfus, KKA ve EET için en düşük MAPE (%) değerlerine göre eğriler elde edilmiştir. Bu eğriler aracılığıyla bu parametrelerin gelecek yıllardaki tahminleri yapılmıştır. İkinci bölüm bulgular ve tartışma bölümü olup, KKA'dan elde edilecek metan gazı, elektrik enerjisi miktarı ve EET'yi karşılama oranları hesaplanmıştır. Sonuç ve öneriler bölümünde ise çalışmada elde edilen sonuçların karşılaştırması yapılmıştır.

2 Materyal ve metod

2.1 Eğri uydurma

Bir fonksiyonun nokta nokta verilen değerlerine en yakın farklı bir fonksiyonun belirlenmesi problemine eğri uydurma denir [24]. Bu teknik, iki değişken arasındaki ilişkiyi en iyi temsil eden uygun bir eğri denklemi bulmayı amaçlamaktadır. Bu çalışmada nüfus, KKA ve EET parametrelerine ait değerlerin gelecek yıllardaki tahmini için kullanılan yöntemlerden biri de eğri uydurma yöntemi

olmuştur. Yapılan eğri uydurma çalışmalarında polinomsal denklemler Matlab ortamında yazılan eğri uydurma algoritmaları kullanılarak elde edilmiştir. Nüfus, KKA ve EET'ye ait veriler TÜİK'ten alınmıştır [25]. Eğri uydurma algoritmalarının çalıştırılması sonucunda elde edilen polinomsal denklemler kullanılarak 2017, 2018 ve 2025 yıllarına ait nüfus, KKA ve EET değerlerinin tahminleri yapılmıştır.

2.2 Tahmin sayfası uygulaması

Excel'deki tahmin sayfası aracı zamana göre gruplanmış geçmiş verilere göre hızlı ve kolay bir şekilde tahmin oluşturan bir öngörme aracıdır. Geçmişe ait verilerdeki mevsimselliği tanıma yeteneği ve bunu hesaba katması en önemli özelliklerinden biridir. Ayrıca, bu aracın tahminde bulunma hızı da çok yüksektir [26-28].

2.3 Holt linear trend yöntemi

Bu yöntem zaman serisinin ortalama ve büyüme oranının değişmesi durumunda kullanılacak uygun bir yöntemdir. Dolayısıyla modelde değişen ortalama ve büyüme oranının tanımlanması gerekmektedir. Modele ilişkin geliştirilen denklemler Denklem (1-3)'te gösterilmiştir.

$$F_{t+n} = L_t + nT_t \quad (1)$$

$$L_t = \alpha Y_t + (1 - \alpha)(L_{t-1} + T_{t-1}) \quad (2)$$

$$T_t = \beta(L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1} \quad (3)$$

L_t , t zamanında serinin level tahmini, T_t ise t zamanındaki zaman serisinin eğiminin bir tahminini göstermektedir. α , level için bir düzeltme parametresidir olup 0 ile 1 arasında bir değer alırken, β trend için bir düzeltme parametresi olup 0 ile 1 arasında bir değer almaktadır [29]. Bu yöntemde level ve trend değerleri belirlenirken ilk yıl için bu işlemler uygulanmaz. Bir sonraki x değeri için level ve trend değerleri belirlenirken ilk level değeri gerçek y değeri ile aynı yazılır, trend değeri ise bu x değerindeki gerçek y değerinden bir önceki x değerinin gerçek y değerinin çıkarılması ile elde edilir. Sonraki x değerleri için ise Denklem (3) uygulanır. Bu yöntem ile y değerinin tahmini yapılırken bir sonraki x değeri için tahmin yapılmaya başlanabilir (3. x değeri). Buna göre tahmini y değeri hesaplanırken bir önceki level ve trend değerlerinin toplamı alınır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde α ve β katsayıları için genellikle 0.2, 0.22 ve 0.24 gibi değerlerin verildiği görülmüştür. Bu çalışmada da α ve β değerleri 0.2 olarak seçilmiştir.

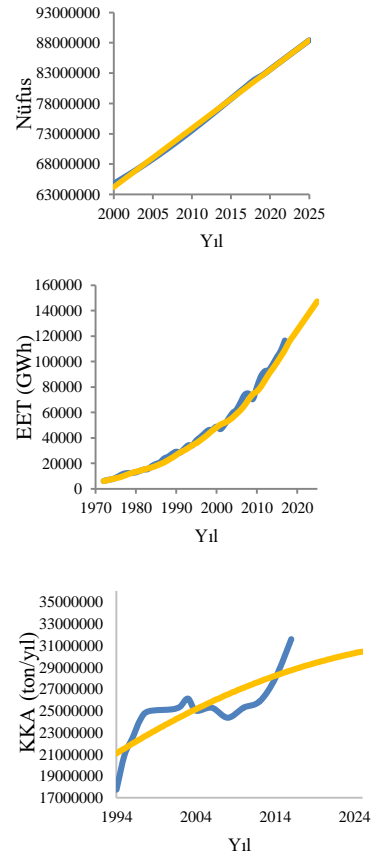
Buna göre yukarıda detayları anlatılan üç farklı yöntem ile yapılan tahminlerde elde edilen MAPE (%) değerleri Tablo 1'deki gibi elde edilmiştir. En düşük MAPE (%) değerine sahip tahmin yönteminin verileri kullanılmıştır.

Tablo 1'de kullanılan yöntemlerden holt linear trend ve tahmin sayfası yöntemleri Microsoft Excel ortamında uygulanırken, eğri uydurma algoritması Matlab ortamında uygulanmıştır.

Tablo 1. Tahmin yöntemleri ve MAPE değerleri

Tahmin Yöntemi	MAPE (%)		
	Nüfus	KKA	EET
Eğri Uydurma	0.07	16.60	12.02
Tahmin Sayfası	0.62	31.24	39.36
Holt Linear Trend	0.39	22.07	5.90

Tablo 1 incelendiğinde nüfus, KKA ve EET için en düşük MAPE (%) değerleri eğri uydurma algoritması ile elde edilmiştir. Nüfus tahminlerinde MAPE (%) değeri eğri uydurma algoritması ile 0.07 olarak hesaplanırken, buna en yakın tahmin 0.39 ile holt linear trend metodu tarafından gerçekleştirilmiştir. KKA tahmininde eğri uydurma algoritması tarafından yapılan tahminlerde MAPE (%) değeri 16.6 iken, en yakın tahmin 22.07 değeri ile holt linear trend metodu tarafından gerçekleştirilmiştir. EET tahminlerinde ise holt linear trend metodu MAPE (%) değerini 5.9 olarak hesaplamış olup, buna en yakın değer 12.02 ile eğri uydurma algoritması tarafından gerçekleştirilmiştir. Buna göre her üç parametre için gerçek ve tahmini eğriler Şekil 1'deki gibi elde edilmiştir.



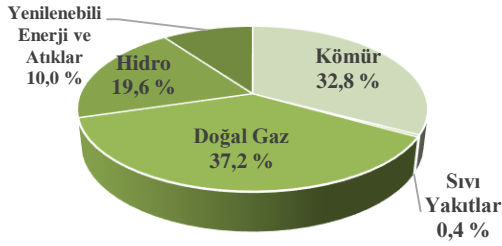
Şekil 1. Nüfus, EET ve KKA miktarlarına ait gerçek ve tahmini eğriler

Şekil 1'deki tahmin eğrilerine denk gelen tahmin verileri ise Tablo 2'deki gibi elde edilmiştir. Nüfus, KKA ve EET değerleri TÜİK'ten alınmıştır.

Tablo 2. Nüfus, EET ve KKA miktarlarına ait tahmini veriler

Yıl	Nüfus	EET (GWh)	KKA (ton/yıl)
2017	-	-	33.327.358
2018	-	115.284	33.551.128
2019	82.672.300	119.846	33.764.942
2020	83.634.000	124.408	33.968.800
2021	84.595.700	128.970	34.162.702
2022	85.557.400	133.532	34.346.648
2023	86.519.100	138.094	34.520.638
2024	87.480.800	142.656	34.684.672
2025	88.442.500	147.218	34.838.750

TÜİK [30]'ten alınan "Türkiye'de 2017 yılı için enerji kaynaklarının elektrik üretim payı" tablosuna göre 2017 yılında toplam elektrik enerjisi üretimi 297.278 GWh'tır. 2017 yılı için bu üretimin farklı enerji kaynaklarına göre yüzdelik olarak dağılımı ise Şekil 2'deki gibidir. TÜİK, "Yenilenebilir enerji ve atıklar" başlığını ise "Yenilenebilir enerji ve jeotermal, güneş, rüzgar, katı biyokütle, biyogaz ve atık içeren atıklar" olarak detaylandırmıştır. Şekilden de görüleceği üzere "Yenilenebilir enerji ve atıklar" başlığı % 10'luk bir paya sahiptir. Bu ise 29.727,8 GWh'a karşılık gelmektedir.



Şekil 2. Türkiye'de 2017 yılı için enerji kaynaklarının elektrik üretim payı

Metan, yüksek enerjili temiz yanan bir gazdır ve elektrik üretiminde doğrudan kullanılabilir. Bu açıdan bakıldığında bu gazın havaya salınımı yerine enerjiye dönüştürülmesi faydalı bir çalışmadır [8]. Biyogaz, enerji üretmek için metan bakımından zengindir. Biyogaz, organik malzemelerin anaerobik biyodegradasyon sürecinin sonucudur. Tarım biyokütlesi, hayvan atıkları ve endüstriden kaynaklanan atıklar biyogaz üretimi için uygun hammadde [31, 32]. KKA'lardan biyogaz üretimi için genelde iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Birincisi, KKA'ların organik kısmının oksijensiz fermantasyonu ile biyogaz üretilmesidir. Gazın kaynağının organik atıklardan oluşması bu yöntem ile gaz üretimini diğer yöntemlere göre daha üstün kılmaktadır. Diğer yöntemde ise katı atıklar doğrudan oksijensiz fermantasyona tabi tutularak biyogaz elde edilir. Bu şekilde üretilen gaz depo gazı olarak da adlandırılmaktadır. Depo gazı, depolama alanındaki katı atıklardaki organik maddelerin kimyasal, fiziksel ve biyolojik dönüşüm süreçlerinden oluşur [14, 33]. Depo gazı

yaklaşık % 50 metan gazından, % 50 karbondioksitten oluşur [13, 34]. Bu çalışmada ikinci yöntem kullanılmıştır.

2.4 LandGEM uygulaması

LandGEM modeli, KKA alanlarından kaynaklı metan ve karbondioksit gibi hava kirleticileri için emisyon oranlarını tahmin etmede kullanılan bir tahmin aracıdır. ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA) tarafından geliştirilmiştir. Bu çalışmada Türkiye'deki KKA'lardan yıllar içinde oluşacak depo gazı ve metan gazı miktarını hesaplamak için LandGEM v.3.02 modeli kullanılmıştır. LandGEM emisyon metodoloji matematiksel olarak Denklem (4)'teki gibi tanımlanır [2, 7, 20]:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 k L_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-k t_{ij}} \quad (4)$$

Q_{CH_4} = hesaplama yılındaki yıllık metan üretimi ($m^3/yıl$)
 $i=1$ -yıllık zaman artışı
 n = Atık kabulü başlangıç yılı
 $j=0,1$ -yıllık zaman artışı
 k = metan üretim oranı ($1/yıl$)
 L_0 = potansiyel metan üretim kapasitesi (m^3/ton)
 M_i = i. yılda kabul edilen atık miktarı (ton)
 T_{ij} = i. yılda kabul edilen M_i atık kütlelerinin j. yaşı.

Modelin çalıştırılırken kullanılan parametre değerleri ise Tablo 3'teki gibidir.

Tablo 3. Modelde kullanılan parametreler ve değerleri

Parametre	Değer
Depo Gazı Karakteristikleri	
Depo gazı açılış yılı	2017
Depo gazı kapanış yılı	2025
Model Parametreleri	
Metan Üretim Oranı, k	0.040 ($yıl^{-1}$)
Potansiyel Metan Üretim Kap. (L_0)	100 (m^3/Mg)
Metan Olmayan Org. Bil. Yoğ.	1 (bir milyon hacimdeki heksan)
Metan İçeriği	50 (% hacim)
Seçilen gazlar/kirleticiler	
Gaz / Kirletici #1:	Toplam Depo Gazı
Gaz / Kirletici #2:	Metan
Gaz / Kirletici #3:	Karbondioksit
Gaz / Kirletici #4:	Metan Olmayan Organik Bileşik

3 Bulgular ve tartışma

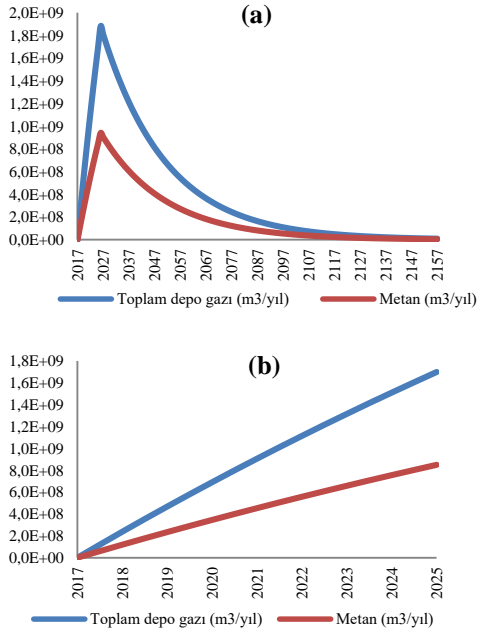
3.1 KKA'dan enerji

Tablo 4'teki parametreler ve kullanılan değerler doğrultusunda LandGEM yazılımı tarafından ilgili yıllar için metan, karbondioksit ve diğer gazların değerleri hesaplanmaktadır. Çalışma yapılırken Türkiye'deki toplam KKA'nın 2018 yılından başlayarak depolanmaya başlandığı ve 2025 yılına kadar atık atıldığı kabul edilmiştir. Depolama alanı kapanış yılı da yine 2025 yılı olarak belirlenmiştir. Buna göre LandGEM uygulaması tarafından elde edilen değerler Tablo 4'teki gibi olmuştur. Tablo 4'te 2035 yılına kadarki değerlere yer verilmiştir.

Tablo 4. LandGEM uygulamasından elde edilen değerler

Yıl	Kabul Edilen Atık (ton/yıl)	Mevcut Atık (ton)	Toplam Depo Gazı (m ³ /yıl)	Metan (m ³ /yıl)
2017	33.327.358	0	0	0
2018	33.551.128	33.327.358	2,381E+08	1,190E+08
2019	33.764.942	66.878.486	4,684E+08	2,342E+08
2020	33.968.800	100.643.428	6,912E+08	3,456E+08
2021	34.162.702	134.612.228	9,068E+08	4,534E+08
2022	34.346.648	168.774.930	1,115E+09	5,576E+08
2023	34.520.638	203.121.578	1,317E+09	6,584E+08
2024	34.684.672	237.642.216	1,512E+09	7,559E+08
2025	34.838.750	272.326.888	1,700E+09	8,502E+08
2026	0	307.165.638	1,883E+09	9,413E+08
2027	0	307.165.638	1,809E+09	9,044E+08
2028	0	307.165.638	1,738E+09	8,689E+08
2029	0	307.165.638	1,670E+09	8,348E+08
2030	0	307.165.638	1,604E+09	8,021E+08
2031	0	307.165.638	1,541E+09	7,706E+08
2032	0	307.165.638	1,481E+09	7,404E+08
2033	0	307.165.638	1,423E+09	7,114E+08
2034	0	307.165.638	1,367E+09	6,835E+08
2035	0	307.165.638	1,313E+09	6,567E+08

LandGEM modeline göre tüm Türkiye’de oluşacak tahmini depo gazı ve metan miktarlarının yıllara göre dağılımı Şekil 3’teki gibi olmuştur.



Şekil 3. LandGEM modeline göre tüm Türkiye’de oluşacak tahmini toplam depo gazı ve metan miktarları (a) 2157 yılına kadar (b) 2025 yılına kadar

Sadece yedi yıllık depolama yapılacağı varsayılmıştır. Buna göre metan gazı üretimi için hesaplamalar LandGEM uygulaması tarafından 2157 yılına kadar hesaplanmıştır. En yüksek depo gazı ve metan değerleri 2026 yılında gerçekleşmiştir. Bu değerler depo gazı için $1,883 \times 10^9$ (m³/yıl), metan için $9,413 \times 10^8$ (m³/yıl)’dir. Grafik 2017 yılından 2026 yılına artış gösterirken, 2026 yılından 2157

yılına doğru azalış göstermiştir. Bu çalışmada kıyaslamada kullanılan 2018 ile 2025 yılları arasında inceleyecek olursak, bu yıllar içerisinde en düşük değer 2018 yılında $1,190 \times 10^8$ (m³/yıl) iken, en yüksek değer 2025 yılında $8,502 \times 10^8$ (m³/yıl) olmuştur. Ancak 2018 yılından 2025 yılına doğru metan üretiminin yüzdelik artışının bir önceki yıla göre düşüşler gösterdiği görülmektedir. Örneğin 2019 yılında bir önceki yıla göre metan üretimi artış oranı % 96.81 iken, 2025 yılında bir önceki yıla göre metan üretimi artış oranı % 12.48 olacağı tahmin edilmiştir.

3.2 Metan gazından enerji

Katı atık depolama sahalarında oluşacak depo gazının tümüyle geri kazanılması mümkün değildir. Geri kazanımı için kullanılan yöntemlerden ikisi direkt ısıtma ve elektrik üretimi yöntemleridir. Öncelikli uygulama ise elektrik üretim teknolojisi. Elektrik üretim teknolojisi ile depolama alanında oluşan gazın en fazla % 60’ı geri kazanılabilmektedir [2, 35]. Bu bölümde Tablo 4’te elde edilen metan gazı miktarına bağlı olarak elde edilen elektrik enerjisi hesaplanmıştır. Metan gazının enerji değeri yaklaşık 13.300 kcal/kg (8.720 kcal/m³) olarak bilinmektedir [7]. 1 kcal ise 1,163 Wh değere eşittir. Buna göre 2018 yılı için yapılan hesaplamalar aşağıdaki gibi olup, 2025 yılına kadarki hesaplamalar Tablo 5’te gösterilmiştir. 2018 yılında $1,190E+08$ (m³/yıl) metan gazı oluşacağı tahmin edilmişti.

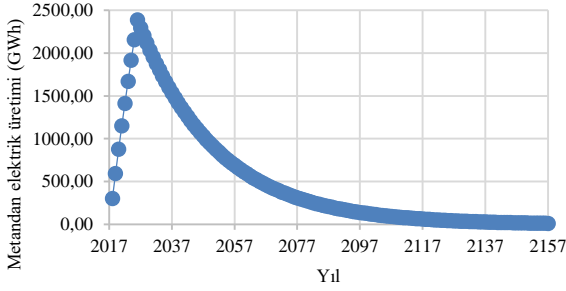
Buna göre:
 $1,190E+08 \times 8.720 = 1.037.680.000.000$ kcal olarak hesaplanır.
 $1.037.680.000.000 \text{ kcal} \times 1,163 = 1.206.821.840.000 \text{ Wh} = 1.206,82 \text{ GWh} = 1,21 \text{ TWh}$
 Hesaplamalarda % 25 elektrik dönüşüm verimi dikkate alındığında;
 $1.206,82 \text{ GWh} \times 25/100 = 301.71 \text{ GWh}$ elde edilir.

Tablo 5. Tahmini kabul edilen atık, metan ve elektrik üretim değerleri (2025 yılına kadar)

Yıl	Kabul Edilen (ton/yıl)	Metan (m ³ /yıl)	Elektrik Üretimi (GWh/yıl)
2017	33.327.358	0	0
2018	33.551.128	1,190E+08	301,71
2019	33.764.942	2,342E+08	593,78
2020	33.968.800	3,456E+08	876,21
2021	34.162.702	4,534E+08	1.149,52
2022	34.346.648	5,576E+08	1.413,71
2023	34.520.638	6,584E+08	1.669,27
2024	34.684.672	7,559E+08	1.916,46
2025	34.838.750	8,502E+08	2.155,55

Çalışmada KKA’nın 2018 yılından başlayarak depolanmaya başlandığı ve 2025 yılına kadar atık atıldığı kabul edilmiştir. Depolama alanı kapanış yılı da yine 2025 olarak belirlenmiştir. Buna göre bu yıllar içerisinde en düşük elektrik enerjisi üretim değeri 2018 yılında 301.71 (GWh/yıl) iken, en yüksek değer 2025 yılında 2.155,55 (GWh/yıl) olmuştur. Ancak metan üretimine paralel olarak elektrik üretim yüzdesi de 2018 yılından 2025 yılına doğru bir önceki yıla göre düşüş göstermiştir. Yine metan üretimine

paralel olarak elektrik üretimi de 2157 yılına kadar devam edecektir. Bu değerler Şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 4. Tahmini elektrik üretim değerleri (2017'den 2157 yılına kadar)

2018 yılından 2025 yılına eğri uydurma (MAPE (%)=0,07) nüfus sonuçlarına göre elde edilen tahmini nüfus değerleri ile aynı yıllar için depo gazından elde edilen tahmini elektrik üretim değerleri dikkate alındığında bu iki parametre arasında Denklem (5) elde edilmektedir. Bu parametrelere ait değerler Tablo 6'daki gibidir.

Tablo 6. Tahmini nüfus ve elektrik enerjisi üretim değerleri (2025 yılına kadar)

Yıl	Nüfus	Elektrik Üretimi (GWh/yıl)
2018	81.929.884	301,80
2019	82.672.300	593,79
2020	83.634.000	876,27
2021	84.595.700	1.149,51
2022	85.557.400	1.413,80
2023	86.519.100	1.669,39
2024	87.480.800	1.916,54
2025	88.442.500	2.155,48

$$MGE \text{ (GWh/yıl)} = 23.859 \times \ln(N) - 434.380 \quad (5)$$

MGE = Metan gazından elektrik enerjisi üretimi
N = Nüfus

3.3 Endüstriyel elektrik tüketimi

Elektrik enerjisi, başta konutlar, sanayi, ulaşım ve sağlık sektörü olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Tüketilen enerjinin % 60'nın sanayide kullanılması ise bu sektörü elektrik kullanımı açısından ön plana çıkarmaktadır [36]. Yapılan araştırmalarda elde edilen tahmini sonuçlara göre 2030 yılında elektrik enerjisi tüketiminde büyük artışların yaşanacağı belirtilmektedir. Bu artış oranlarının ülkemizde % 100, dünyada ise % 60 oranında olacağı düşünülmektedir [37]. Türkiye'deki elektrik tüketimi sektörler bazında incelendiğinde, sanayi kaynaklı elektrik tüketiminin sürekli artış gösterdiği görülmektedir. TÜİK [38]'ten alınan 1970-2017 yılları arasındaki Türkiye elektrik tüketim verileri incelendiğinde EET oranının ortalama % 56,6 olduğu görülmektedir. En yüksek oran % 67,3 ile 1973 yılında gerçekleşirken, en düşük oran % 44,9 ile 2009 yılında gerçekleşmiştir. Ayrıca, yine aynı yıllar arası incelendiğinde

EET'nin bir önceki yıla göre artış miktarı ortalama olarak % 7,21 oranında olmuştur. 2017 yılında Türkiye'deki tüm alanlarda tüketilen net elektrik enerjisi 249.023 GWh iken, bu değer içerisindeki sanayi elektrik enerjisi tüketimi 116.543 GWh olmuştur. Bir başka deyişle, toplam tüketimin % 46,8'i sanayi sektöründe kullanılmıştır. Ayrıca, ülkemizde enerji ithalatı 2013'de % 73,5 iken enerjide dışa bağımlılık sanayileşme faaliyetlerine de bağlı olarak her geçen gün artış göstermektedir. Bu doğrultuda, Türkiye açısından özellikle sanayi sektörü için önemli bir girdi olan enerjinin karşılanmasında yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması önem arz etmektedir [39].

Tablo 7, 2018-2025 arasında düzenli depolama alanı metan gazından elde edilebilecek elektrik enerjisinin EET'yi karşılama oranını göstermektedir. Yıllar ilerledikçe karşılama oranının arttığı görülmektedir. 2018 yılında karşılama oranı % 0,262 iken, 2025 yılında bu oran 1,464'e kadar çıkmıştır. Karşılama oranı 5,59 kat artmıştır. 2018-2025 yılları arasında EET 1,28 kat artarken, KKA tarafından üretilen elektrik enerjisi 7,14 kat artmıştır. EET'deki artışın KKA tarafından üretilen elektrik enerjisine göre daha az artış göstermesine bağlı olarak metan gazından elde edilen elektriğin EET'yi karşılama oranı artış göstermektedir.

Tablo 7. KKA'dan üretilen elektriğin EET'yi karşılama oranı

Yıl	KKA Tarafından Üretilen Elektrik (GWh)	EET (GWh)	Karşılama Oranı (%)
2018	301,71	115.284	0,262
2019	593,78	119.846	0,496
2020	876,21	124.408	0,704
2021	1.149,52	128.970	0,891
2022	1.413,71	133.532	1,059
2023	1.669,27	138.094	1,209
2024	1.916,46	142.656	1,343
2025	2.155,55	147.218	1,464

Buna göre 2018-2025 yılları arasındaki tahmini KKA miktarı ile EET değerini karşılama oranı arasındaki ilişki Denklem (6)'daki gibi elde edilir.

$$KO \text{ (%) } = 31,823 \times \ln(KKA) - 551,15 \quad (6)$$

Burada KKA, Türkiye genelinde üretilen yıllık KKA miktarını gösterirken, KO ise KKA'dan üretilen toplam elektriğin EET'yi karşılama oranını göstermektedir. Buraya kadar yapılan çalışmalarda elde edilen verilere göre 2018 yılı nüfusu 82.003.882 kişi olup, bir önceki yıla göre nüfus % 1,48 oranında artış göstermiştir. KKA da nüfus gibi sürekli artış göstermektedir. KKA miktarı 2016 yılında 31.583.553 ton/yıl olurken, bir önceki yıla göre artış oranı % 12,76 olmuştur. Nüfus artış oranı ile KKA artış oranı karşılaştırıldığında KKA artış oranının nüfus artış oranından fazla olduğu görülmektedir. Türkiye elektrik tüketim verileri incelendiğinde ise EET oranının toplam tüketimin ortalama olarak % 56,6'sı olduğu görülmektedir. Bu oran en yüksek % 67,3 ile 1973 yılında gerçekleşirken, en düşük % 44,9 ile 2009 yılında gerçekleşmiştir. Türkiye'nin 2017 yılı net elektrik enerjisi tüketimi 249.023 GWh'dır. Bu tüketimin %

46,8'ini oluşturan EET 2017 yılında 116.542,6 GWh iken, bir önceki yıla göre EET'deki artış oranı % 7,48 olmuştur.

Bu çalışmada literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak parametrelerin tahminlerinde eğri uydurma, holt linear trend ve excel tahmin sayfası gibi farklı yöntem ve uygulamalar kullanılmıştır. Tahmin sonuçlarının doğruluğunun ölçümünde ise MAPE yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca literatürdeki çalışmalardan bir farkı da elde edilen enerjinin EET'yi karşılamaya yönelik bir çalışma olmasıdır. Güven [7] tarafından yapılan çalışma ile İzmir, Manisa, Aydın, Denizli, Muğla, Afyonkarahisar, Kütahya ve Uşak illeri için depo gazından yıllık ortalama elektrik enerjisi üretim tahminleri yapılmıştır. Bu değerler sırasıyla 125.98 GWh, 53.26 GWh, 30.56 GWh, 25.18 GWh, 19.47 GWh, 9.11 GWh, 6.86 GWh ve 9.12 GWh olarak elde edilmiştir. Bu elektrik değerleri ile de konut elektrik ihtiyacının % 1.6-% 5 arasında karşılanabileceğini tahmin edilmiştir. Gök [5] tarafından yapılan çalışmada 2042 yılında Niğde ili için maksimum elektrik üretiminin 6,9 milyon kWh olacağı tahmin edilmiştir. Özer [15] tarafından yapılan çalışmada 2045 yılında Edirne'de KKA'dan elde edilebilecek elektrik enerjisinin 28.673 MWh olacağı tahmin edilirken, Sarptaş [16] tarafından yapılan çalışmada ise İzmir Harmandalı düzenli depolama alanında üretilen brüt enerjinin 223 milyon kWh/yıl olacağını tahmin edilmiştir. Bu değerlere karşılık bu çalışmada elde edilen değerlere göre Türkiye için 2025 yılında metan gazından elde edilebilecek elektrik enerjisinin 2.155,55 GWh olacağı ve bu üretim değeri ile EET'nin % 1,464'lük kısmının karşılanabileceği tahmin edilmiştir. Buradaki 2.155,55 GWh'lık elektrik enerjisi tüm Türkiye için tahmini değer olup, il bazında düşünülmesi durumunda diğer çalışmalarda elde edilen değerler ile benzerlik göstermektedir.

4 Sonuçlar

Bu çalışma ile Türkiye'deki tüm katı atıkların 2017-2025 yılları arasında düzenli depolama sahalarında depolanması durumunda oluşacak metan gazı miktarı ve bu gazdan elde edilebilecek elektrik enerjisinin hesaplanması amaçlanmıştır. Çalışmada kullanılan nüfus, KKA ve EET değerleri TÜİK'ten alınmıştır. Bu parametrelerin ait değerlerin gelecek yıllara ait tahminleri için eğri uydurma algoritması, tahmin sayfası uygulaması ve holt linear trend yöntemleri kullanılmıştır. Yapılan tahmin çalışmalarına göre 2025 yılında nüfusun 88.442.500 kişi, KKA miktarının 34.838.750 ton/yıl, EET'nin ise 147.218 GWh olacağı tahmin edilmiştir. Metan gazı miktarının hesaplanmasında LandGEM v.3.02 modeli kullanılmıştır. Yapılan hesaplamalara göre 2018-2025 yılları arasında en düşük metan üretim değeri 2018 yılında $1,190 \times 10^8$ (m³/yıl), en yüksek değeri ise 2025 yılında $8,502 \times 10^8$ (m³/yıl) olarak hesaplanmıştır. Bu metan gazı verileri dikkate alınarak 2017-2025 yılları arasında elde edilebilecek elektrik enerjisi üretim miktarları hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalarda 2018 yılında metan gazından elde edilebilecek elektrik enerjisi miktarı 301,71 GWh olarak tahmin edilirken, bu üretim değeri ile EET'nin % 0,262'lik kısmının karşılanabileceği tahmin edilmiştir. 2025 yılında ise bu değerler 2.155,55 GWh tahmini üretim değeri ile % 1,464

olmuştur. 2018 yılı ile 2025 yılı karşılaştırıldığında karşılama oranının 5,59 kat artacağı tahmin edilmiştir. Bu sonuçlara göre KKA'ya bağlı metan gazı ile EET'nin karşılanma oranının gittikçe arttığı görülmektedir. Sonuç olarak KKA'ya bağlı metan gazından elektrik üretiminin ülkelerin sürdürülebilir kalkınmalarına ciddi katkılar sağlayabileceği düşünülmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %9

Kaynaklar

- [1] S. AlzateArias, B. Restrepo-Cuestas and A. Jaramillo-Duque, Electricity generation potential from solid waste in three Colombian municipalities. *Tecnolóicas*, 21(42), 111-128, 2018.
- [2] B. Baran, Atıksu arıtma tesislerinden elde edilen hidroelektrik üretiminin Türkiye mesken elektrik talebini karşılama oranı. *Akademik Platform, Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 8(1), 139-145, 2020. <https://doi.org/10.21541/apjes.503355>.
- [3] C. Görmüş, Türkiye'deki hayvan gübrelere biyogaz enerji potansiyelinin belirlenmesi, Master Thesis, Tekirdağ Namık Kemal University. 2018.
- [4] A.V.S. Melaré, S.M. González, K. Faceli and V. Casadei, Technologies and decision support systems to aid solid-waste management: a systematic review. *Waste Management*, 59, 567-584, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.045>.
- [5] G. Gök, Estimation of methane generation and energy potential of Niğde landfill site using first order mathematical modelling approaches. *Journal of Engineering Sciences and Design*, 7(1), 126-135, 2019. <https://doi.org/10.21923/jesd.405047>.
- [6] N.J. Themelis and P.A. Ulluo, Methane generation in landfills. *Renewable Energy*, 32, 1243-1257, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.04.020>.
- [7] E.D. Güven, Ege Bölgesi'nde kentsel katı atık üretimi ve atığın metan gazı enerji potansiyelinin belirlenmesi. *Dokuz Eylül University Faculty of Engineering Journal of Science and Engineering*, 21(61), 311-322, 2019. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2019216130>.
- [8] Kentsel Katı Atık Metan Gazı Enerji Elde Edilmesi, Sustainable Energy Africa (SEA), Waste to Energy: municipal landfill waste methane gas to energy implementation, Accessed 01 December 2019.
- [9] İ. Şentürk and B. Yıldırım, A Study on Estimating of the Landfill Gas Potential from Solid Waste Storage Area in Sivas, Turkey. *Scientific Journal of Mehmet Akif Ersoy University*, 3(2), 63-76, 2020.
- [10] D. Mboowa, S. Qureshi, C. Bhattacharjee and K. Tonny, S. Dutta, Qualitative determination of energy potential and methane generation from Municipal Solid Waste (MSW) in Dhanbad (India). *Energy*, 2017. [doi: 10.1016/j.energy.2017.02.009](https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.009).
- [11] M.A. Rajaeifar, H. Ghanavati, B. Dashti, R. Heijungs, R. M. Aghbashlo and M. Tabatabaei. Electricity generation and GHG emission reduction potentials

- through different municipal solid waste management technologies: A comparative review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, 79(C), 414-439, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.109>.
- [12] D. Das, B.K. Majhi, S. Pal and T. Jash. Estimation of land-fill gas generation from municipal solid waste in Indian Cities. *Energy Procedia*, 90, 50–56, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.169>.
- [13] A. Yechiel and Y. Shevah. Optimization of energy generation using landfill biogas. *Journal of Energy Storage*, 7, 93-98, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.est.2016.05.002>.
- [14] N. Scarlat, V. Motola, J.F. Dallemand, F. Monforti-Ferrario and L. Mofor, Evaluation of energy potential of Municipal Solid Waste from African urban areas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1269–1286, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.067>.
- [15] B. Özer, A study on energy production and GHG mitigation potential from municipal solid waste of Edirne. *Mugla Journal of Science and Technology*, 4(2), 182-190, 2018. doi: 10.22531/muglajsci.447895.
- [16] H. Sarptaş, Assessment of landfill gas (LFG) energy potential based on estimates of LFG models. *Dokuz Eylül University Faculty of Engineering Journal of Science and Engineering*, 18, 491-501, 2016. doi: 10.21205/deufmd.2016185416.
- [17] D. Surroo and R. Mohee, Power generation from landfill gas, 2nd International Conference on Environmental Engineering and Applications IPCBEE, 17, 237-241, 2011.
- [18] S. Fallahzadeha, M. Rahmatiniac, Z. Mohammadid, M. Vaezzadehe, A. Tajamirif and H. Soleimani, Estimation of methane gas by LandGEM model from Yasuj municipal solid waste landfill, Iran. *MethodsX*, 6, 391–398, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.02.013>.
- [19] S.H. Tercan, A.F. Cabalar and G. Yaman, Analysis of a landfill gas to energy system at the municipal solid waste landfill in Gaziantep, Turkey. *Journal of the Air&Waste Management Association*, 912-918, 2015. <https://doi.org/10.1080/10962247.2015.1036178>.
- [20] A. Aydi. Energy recovery from a municipal solid waste (MSW) landfill gas: A Tunisian Case Study. *Hydrology Current Research* 3(4), 2012. doi: 10.4172/2157-7587.1000137.
- [21] M. Gökçek, Waste to energy: Exploitation of landfill gas in micro-turbines, *Omer Halisdemir University Journal of Engineering Sciences*, 6(2), 710-716, 2017. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.341993>.
- [22] S. Yi, Y.C. Jang and A.K. An, Potential for energy recovery and greenhouse gas reduction through waste-to-energy technologies. *Journal of Cleaner Production*, 176, 503-511, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.103>.
- [23] B.R. Saragih, S.R.H. Siregar and A. Surjosatyo, Evaluation of waste potential in TPST Bantargebang Through Modified Triangular Method, *E3S Web of Conferences* 67(02040), 1-4, 2018.
- [24] Eğri Uydurma, <https://tektasi.net/wp-content/uploads/2019/02/Curve-Fitting>, Accessed 25 September 2019.
- [25] TÜİK-1, Türkiye'nin nüfus ve atık su miktarı verileri. www.tuik.gov.tr, Accessed 4 November 2019.
- [26] Tahmin Sayfası-1, Tahmin Sayfası. <https://www.dummies.com/software/microsoft-office/excel/how-to-create-forecast-worksheets-in-excel-2019/> Accessed 27 November 2019.
- [27] Tahmin Sayfası-2, Tahmin Sayfası. <https://www.myonlinetraininghub.com>, Accessed 27 November 2019.
- [28] Tahmin Sayfası-3, Tahmin Sayfası. <https://www.k2e.com/tech-tips/excel-forecast-sheet/>, Accessed 10 October 2019.
- [29] Y.K. Benli ve A. Yıldız, Altın fiyatının zaman serisi yöntemleri ve yapay sinir ağları ile öngörüsü. *Dumlupınar University Journal of Social Sciences*, 42, 213-224, 2014.
- [30] TÜİK-2, Elektrik üretimi ve enerji kaynaklarına göre dağılımı. <http://www.tuik.gov.tr/UstMenu.do?metod=temelist>, Accessed 22 October 2019.
- [31] W. Uddin, B. Khan, N. Shaukat, M. Majid, G. Mujtaba, A. Mehmood, S.M. Ali, U. Younas, M. Anwar and A.M. Almesha, Biogas potential for electric power generation in Pakistan: A survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 25–33, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.083>.
- [32] P. Mostbauer, L. Lombardi, T. Olivieri and S. Lenz. Pilot scale evaluation of the BABIU process – Upgrading of landfill gas or biogas with the use of MSWI bottom ash. *Waste Management*, 34, 125-133, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.09.016>.
- [33] H. Şenol, E.A. Elibol., Ü. Açikel and M. Şenol, Primary biomass sources for biogas production in Turkey. *BEU Journal of Science*, 6(2), 81-92, 2017.
- [34] EPA, Basic information about landfill gas. <https://www.epa.gov/lmop/basic-information-about-landfill-gas>, Accessed 15 October 2019.
- [35] Global Methane Initiative, 4. Landfill Gas Energy Utilization Technologies, *International Best Practices Guide for LFGE Projects*, 33-50, 2012.
- [36] S. Türkmen, S. Özbek ve M. Karakuş, Türkiye’de elektrik tüketimi ve ekonomik büyüme arasındaki ilişki: Ampirik bir analiz. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 8(2), 129-142, 2018.
- [37] C. Yıldırım ve Ö. Dağdemir, Türkiye’de ekonomik büyüme ve elektrik tüketimi ilişkisi. *Sakarya İktisat Dergisi*, 7(4), 57-76, 2018.
- [38] TÜİK-3, Türkiye elektrik tüketim verisi. www.tuik.gov.tr, Accessed 10 October 2019.
- [39] M.V. Eren, M.A. Polat and H.İ. Aydın, Analysis of relationship between electricity consumption and economic growth with structural breaks tests in Turkey. *Akademik Bakış Uluslararası Hakemli Sosyal Bilimler E-Dergisi*, 56, 275-289, 2016.





Balancing disassembly line under hazardous parts with precise and fuzzy goals Kesin ve bulanık hedeflerle tehlikeli parçaları dikkate alan demontaj hatlarının dengelemesi

Seda Hezer^{1,*} , Yakup Kara² 

^{1,2} Konya Technical University, Industrial Engineering Department, 42250, Konya, Turkey

Abstract

Disassembly is one of the steps of the recovery activities. Since it includes expensive processes, disassembly should be performed with the system that provides efficient and effective outputs. A disassembly line is the most suitable system for disassembly of the returned products. A disassembly line balancing problem (DLBP) is assigning disassembly tasks to consecutive workstations by satisfying a series of constraints and optimizing one or more than one goal. In this paper, the DLBP with multiple conflicting goals which takes into account the negative zone (DLBP-Z) constraints has been proposed. Negative zone constraint is related to hazardous parts. If there are hazardous part/parts in the product and they need to be removed, they may damage the other parts and disassembly line. Therefore, these parts must be assigned to different stations from the other parts. Goal programming (GP) and fuzzy goal programming (FGP) approaches have been proposed in order to optimize three conflicting goals, namely total net recovery profit value, the number of parts to be removed for recycling and cycle time. Through a numerical example, the proposed approaches have been tested and goal programming formulations have been shown to be valid and useful. To the best of the authors' knowledge, the proposed GP and FGP models are the first multi-criteria decision making (MCDM) approaches for DLBP-Z.

Keywords: Disassembly, Disassembly lines, Fuzzy goals, Goal programming, Line balancing.

Introduction

As the world population dramatically increases, the requirements of people also continuously increase, leading to serious environmental and economic problems. The amount of solid waste and the damage to the environment increase with growing resource consumption, the natural balance deteriorates. At this point, the importance of recovery becomes apparent.

Product recovery is to reclaim valuable materials and parts from outdated or old products to minimize the ultimate quantities of waste sent to landfills by means of recovery actions such as remanufacturing, reusing or recycling [1, 2]. Product recovery reduces waste, saves costs, increases profits and creates new jobs, and so achieves sustainability [3].

Özet

Demontaj, geri kazanım faaliyetlerinin adımlarından biridir. Pahalı süreçler içermesi nedeniyle, demontajın etkin ve verimli çıktıları üreten sistemlerde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bir demontaj hattı, ürünlerin demontajı için en uygun sistemdir. Demontaj hattı dengeleme problemi (DHDP) belirli kısıtların sağlanması koşuluyla bir ya da daha fazla hedefe ulaşmak için görevlerin ardışık olarak sıralanmış istasyonlara atanmasıdır. Bu çalışmada negatif bölge kısıtına göre, birbirleriyle çelişen hedeflerin optimize edilmesine odaklanan DHDP (DHDP-Z) önerilmiştir. Negatif bölge kısıtı tehlikeli parçalarla ilgilidir. Eğer bir üründe çıkarılması gereken tehlikeli parça/parçalar varsa, bu parçaların diğer parçalara ve sisteme zarar vermemesi amacıyla farklı bir istasyonda çıkarılmaları gerekmektedir. Birbirleriyle çelişen hedefler toplam net gerikazanım karı, geri dönüştürülecek parçaların sayısı ve çevrim zamanıdır. İlgili hedeflerin en iyilenmesi için hedef programlama (HP) ve bulanık hedef programlama (BHP) yaklaşımları önerilmiştir. Küçük boyutlu bir örnekle, yaklaşımların geçerli ve faydalı olduğu gösterilmiştir. DHDP literatürü gözlemlendiğinde, DHDP-Z'nin çözümü için çok kriterli karar verme (ÇKKV) yaklaşımlarının uygulanmadığı gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Bulanık hedefler, Demontaj, Demontaj hatları, Hat dengeleme, Hedef programlama

All recovery actions require one or more than one process and disassembly is the common process used in all these actions. Disassembly is to separate a product into its constituent parts/subassemblies and materials from the products via a series of technical operations [4, 5]. Disassembly also allows selective extraction of desired parts and materials [3]. Many different problems are encountered during the design and execution of the disassembly process [6, 7]. One of these problems is disassembly line balancing problem (DLBP). A disassembly line consists of consecutive workstations connected by a material handling system. DLBP is assigning disassembly tasks to consecutive workstations by satisfying a series of constraints and optimizing one or more than one performance measure while meeting the demand for the parts. An example layout of a disassembly line is given in Figure 1.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: shezer@ktun.edu.tr (S. Hezer)

Geliş / Received: 28.07.2021 Kabul / Accepted: 01.12.2021 Yayınlanma / Published: 14.01.2022

doi: 10.28948/ngmuh.975730

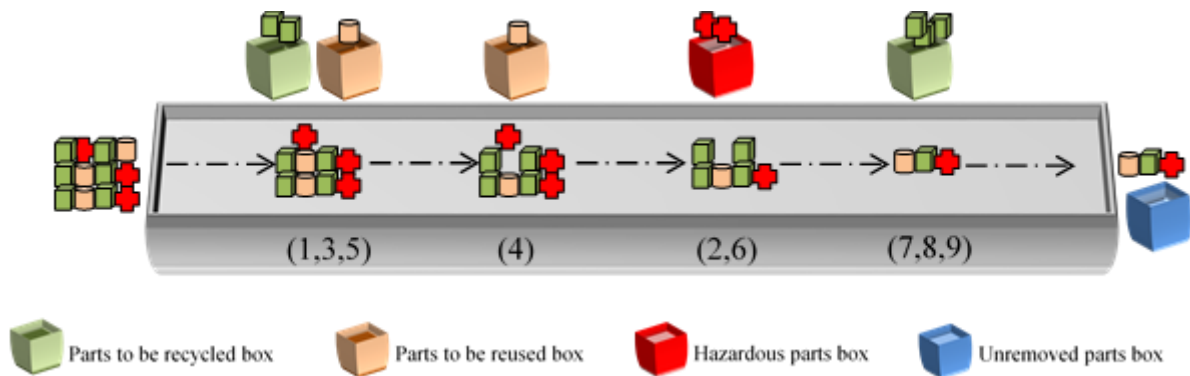


Figure 1. An example illustration of a disassembly line

The disassembly line consists of a total of four workstations and nine tasks in Figure 1. The part or parts removed at each station are placed in boxes separated according to where they will be used later.

The products may be disassembled completely or partially in order to provide economically and environmentally requirements. In complete disassembly, all parts of the product are disassembled, and in partial disassembly, the parts are generally disassembled up to the level that will ensure profitability. Disassembling the product completely, even if all parts have revenue, is often not profitable due to high-cost operations. Therefore, in general, partial disassembly is preferred [6, 8]. Disassembly operations are carried out with one of the two main actions: destructive and non-destructive, regardless of performing partial or complete disassembly. Non-destructive action focuses on part recovery rather than material recovery, and destructive action focuses on material recovery instead of part recovery [9]. Which action will be applied to which part may vary according to the damage status of the parts, the precedence relations between the parts, the demand status of the parts and the goals set by the product recovery facility. For example, non-destructive actions are preferred if parts are to be used in remanufacturing and are easy to disassemble, while destructive actions are performed if parts cannot be removed or they are to be used for recycling [10]. During the performance of the relevant actions, special situations may occur that complicate or restrict the disassembly process. One of these situations is related to parts containing hazardous materials. Some products may have such parts. For example, fuel tanks containing gasoline, diesel etc., cathode ray tubes containing gas such as iron and platinum can be examples of hazardous parts. Disassembly of these parts requires special attention and handling. Otherwise, hazardous materials contained in the parts may harm the worker health and the environment. These materials may also contaminate non-hazardous parts, causing the recovery process of these parts to be canceled. Therefore, these parts should be disassembled at the first stations on the disassembly line as much as possible or at different stations from other parts [6].

The traditional version of DLBP is the straight, single product-type, complete and non-destructive DLBP which

was first described by Gungor and Gupta [6, 11]. McGovern and Gupta [12, 13] provided NP-completeness proof of the decision version of DLBP and showed unary NP-completeness. As the interest in DLBP increased, the problem has been developed by modifying the basic assumptions. Some of the assumptions considered are parallel line layout [14, 15], U-shaped layout [8, 16–18], partial [19–24], destructive [10, 18] and hazardous [6, 13, 18, 20, 25–28].

In studies related with hazardous parts, it has been assumed that the relevant parts are assigned to the earliest stations where they can be assigned and they bring additional costs to the stations where they are assigned, as they require special equipment and labor hazardous [6, 13, 18, 20, 25–28].

Different approaches have been proposed and developed to solve the DLBP. Some researchers have developed mathematical programming techniques to solve DLBP optimally [5, 19, 29–31]. However, the fact that DLBP is NP-hard has caused medium and large sized problems to not be solved in a reasonable time. Therefore, metaheuristic approaches have been proposed [13, 21, 31–43].

In recent years, the studies have focused on real-life conditions. One of these conditions is related to uncertainties regarding the quality of the product, the number of parts it contains, or the duration of the operation. Effective solution approaches have been developed for problems that take into account the relevant situation such as stochastic programming [8, 14, 36, 44–51] and fuzzy programming [32, 41, 42, 52–55]. Other conditions are related to robotics [31, 35, 56–59], green objectives, and sustainability [60–66].

When the DLBP literature is examined in terms of the aims to be achieved, it has been observed that some of the studies focused on a goal [15, 19–22, 27, 29, 30, 57, 67–70]. In practice, however, the managers of the disassembly line may want to achieve compromising solutions between several conflicting goals rather than optimizing a single goal. This means that, they wish to meet high-priority goals before low-priority goals. The goals and priority levels of a DLBP can be different in terms of a disassembly line manager, who is the decision maker (DM), and the decision-making environment. This has motivated researchers to develop multi-criteria (multi objective and multi attribute)

approaches for the DLBP. The DLBP literature contains several studies that consider balancing disassembly lines with multi-criteria [6, 14, 18, 25, 33, 36–38, 41, 45, 47, 53, 56, 68, 71–77]. One of the most common methods used to solve multi-criteria decision making problems is GP method [78].

Goals are precisely defined in GP. For example, one of the exact goals of the DM may be that the cycle time should not exceed 10 minutes. If the cycle time does not exceed 10 minutes, the manager is 'satisfied', otherwise he is 'unsatisfied'. However, the level of dissatisfaction with the 15-minute cycle time ('unsatisfactory level') may be less than the level of dissatisfaction with the 20-minute cycle time ('unsatisfactory level'). The dissatisfaction level of the DM is directly proportional to the amount of deviation variable from the goal value. However, in some cases precise determination of the desired goal values may not be easy, or the disassembly manager may not want to specify the relevant values precisely. After balancing a disassembly line with uncertain goal levels, the manager may be "fully satisfied", 'partially satisfied' or 'fully dissatisfied'. In real life applications, the managers want to be fully satisfied with all conflicting goals, but this may not always be possible. Therefore, the DM should set priorities for various conflicting goals and try to maximize the overall satisfaction level for all goals. Traditional GP fails in being applied for goal values that are not clearly specified [79]. Fuzzy set theory has been adapted to traditional GP to define uncertain request levels and the problem has been transformed into FGP [79–81]. In the DLBP literature, GP and FGP approaches have been applied in the studies of [14, 54], respectively to DLBP problems successfully. Karadag and Turkbey [14] used GP approach to show the effectiveness of the proposed GA. The proposed GP approach has been applied to find the best task assignments for workstations with minimum cost and optimized line balance. Paksoy et. al [54] proposed FGP with multiple conflicting objectives that are minimising the number of disassembly workstations and the cycle time, and providing balanced workload per workstation.

It is noted here that a more comprehensive and detailed review of the DLBP papers can be found in [82] and [83].

When the DLBP literature is examined, it is observed that the number of studies on assumptions and approaches towards real life is increasing. Accordingly, DLBP, which takes into account some realistic properties, has been presented in this paper and solution approaches have been developed to solve this problem. We are inspired by recycling and disposal of waste cathode ray tube (CRT) of the TV sets. CRTs contain hazardous substances such as lead and phosphorus and they must be disassembled separately from the other parts that are not contain hazardous substances. The purpose of the disassembly of CRT is to obtain valuable materials while separate the parts with hazardous substances. However, disassembly of all parts of the CRT may be resulted in environmental and line contamination, and long cycle time (namely expensive line cost). For this reason, a solution method is required to make

a trade-off between cycle time, parts to be recycled and line profit.

The features taken into account also express the contribution of this paper to the literature. These features have been determined in line with the determinations obtained from the literature and summarized below:

- Although non-destructive actions have been observed to be studied more, an increasing number of studies that take into account destructive actions have been conducted in recent years. Because, situations that require destructive action arise in the disassembly of almost every product. Therefore, besides non-destructive actions, destructive actions that are an undeniable reality of the disassembly process and seriously affect the cost of the line, must be taken into account.
- Although the number of studies on hazardous parts (hazardous tasks) is high, it has been observed that the zone constraint is not used for these parts. Zone constraint is about assigning tasks to the same or different stations. It is divided into two as positive and negative zone constraints. Positive zone constraint is that some tasks (requiring the same equipment, requiring the same special action, etc.) are assigned to the same station, while negative zone constraint is that some tasks should not be assigned to the same station. For example, hazardous tasks and non-hazardous tasks should not be assigned to the same stations so that non-hazardous parts are not damaged. In this paper, negative zone constraint has been taken into account. Assigning hazardous tasks to different stations can increase the cost of the line. However, in cases where it is necessary to remove these parts, negative zone restriction is one of the best precautions that can be taken to prevent negative situations in which the line fails or stops, or solid parts are damaged, etc. In addition, considering the negative zone constraint, the possible increase in the cost of the line will not be more than the sum of the cost items caused by the negative situations that arise when this constraint is not applied [25–28, 33, 42, 50, 62, 67, 76, 84–88].
- When DLBP is examined, it has been observed that there are few studies applying GP and FGP approaches. However, the uncertainties arising from the nature of disassembly and the focus on more than one goal indicate that goal programming approaches should be applied more and the goals should be diversified.

In the light of the above, in this paper, the DLBP with multiple conflicting goals which takes into account the negative zone (DLBP-Z) constraints has been proposed. GP and FGP approaches have been developed in order to solve the related problem. It should be kept in mind that the proposed approaches (GP and FGP) are not competitors. They are alternatives to each other. To the best of the authors knowledge, the proposed goal programming approaches are the first MCDM approaches to DLBP-Z.

The remainder of this paper is organized as follows: In **Section 2** the DLBP-Z is defined and a 0-1 integer linear

programming formulation is developed. Section 3 and Section 4 detail GP and FGP for DLBP-Z, respectively. An illustrative example is presented in Section 5. Some concluding remarks and future perspectives are given in Section 6.

Material ve method

2.1. Characteristics of DLBP-Z

Partial disassembly is performed in the proposed problem. The products are disassembled for their materials or parts depending on the type of demand. Here, if a part is subject to reuse or storage, non-destructive action is taken into account, and if it is to be used for recycling, destructive action is applied. All or some parts of the product have demand and therefore revenue. However, it is not necessary to remove every part demanded. A part is disassembled as a result of a task. With the solution of the problem, which stations will be opened, which tasks will be assigned to which stations, which part / parts will be removed, which action and therefore which recovery action (reuse or recycling) will be applied to the parts to be removed are determined depending on the goals of the DM. If there are hazardous parts in the product and they need to be removed, these parts must be assigned to different stations from the other parts. Other assumptions about the proposed problem are as follows:

- The configuration of each part is known in advance.
- The supply is unlimited.
- Part-based precedence relationship diagram and AND / OR precedence relationships are taken into consideration.
- Precedence relationships are known in advance.
- Precedences between parts also show precedences between tasks.
- Each task has cost and duration.
- A task can be carried out by applying only destructive action, by applying only non-destructive action, or by selecting either action.
- Revenue, cost and duration for the task where both actions are likely to be applied vary depending on the type of action.
- If both destructive and non-destructive actions can be applied for a task, the duration, cost and revenue of the destructive action are generally lower than the non-destructive one [85, 89]. Therefore, in order to optimize the goal, either destructive action with less time and cost or non-destructive action with higher revenue can be chosen.
- Since hazardous parts require special attention and handling, the time and cost required to remove these parts may be higher than other parts [88].
- The unit revenue of a part is calculated according to the unit weight if this part is to be used in recycling, and according to one piece if it is to be reused.
- The cost of transport required for transporting non-disassembled parts to the necessary areas for later evaluation has been taken into account.

- Weights and recyclable percentage rates of parts removed for recycling are known in advance.
- All parameters are deterministic and known in advance.
- Both destructive and non-destructive actions can be performed at a workstation.
- Idle time of the operators is not taken into account.

In this paper, traditional GP and FGP formulations were proposed for the solution of DLBP-Z whose assumptions were given above. It was aimed to optimize three conflicting goals with the relevant formulations. The goals are related to the total net profit, the number of parts to be used for recycling and the cycle time. In addition, a 0-1 integer mathematical formulation was presented. Proposed goal programming formulations were structured according to this formulation. The notation used in all proposed formulations was given as follows:

Indices

- i, l : task (part), $i, l = 1, 2, \dots, N$
 j, v : workstation, $j, v = 1, 2, \dots, M_{max}$;
 k : action, $k = 1, 2$ (if action is nondestructive, $k=1$; otherwise $k=2$)

Parameters

- I : set of all tasks;
 J : set of workstations;
 H : set of hazardous tasks;
 K : set of actions;
 M_{max} : maximum number of workstations;
 N : total number of tasks;
 ZN : set of task pairs that cannot be performed on the same workstation.
 $PA(i)$: set of AND predecessors of task i ;
 $PO(i)$: set of OR predecessors of task i ;
 d_i : demand of part i (monthly)
 w_i : weight of part i
 t_{ik} : task time of i if it is processed with action k (min)
 r_{ik} : unit revenue of i if it is processed with action k
 pr_i : recyclable percentage of part i if it is processed with action $k=2$
 ct_{ik} : operation cost of task i if it is processed with action k (monthly)
 tc : average transportation cost from facility to storage (monthly)
 cw : utilization cost of a workstation (worker + fixed costs) (monthly)
 C : cycle time
 TRC : the number of recycled parts
 TNP : the total net recovery profit
 \underline{C} : lower bound for C
 \overline{C} : upper bound for C
 \underline{TRC} : lower bound for TRC
 \overline{TRC} : upper bound for TRC
 \underline{TNP} : lower bound for TNP

- \overline{TNP} : upper bound for TNP
- L^0 : linearisation parameter for C goal;
- P^0 : linearisation parameter for TNP ;
- S^0 : linearisation parameter for TRC
- μ : A big number

Variable decisions

- x_{ijk} : 1, if task i is assigned to workstation j with action k ; 0, otherwise
- y_i : 1, if task i is not done; 0, otherwise.
- z_j : 1, if workstation j is utilized; 0, otherwise
- e^- : under achievement of the total net recovery profit
- e^+ : over achievement of the total net recovery profit
- g^- : under achievement of the number of parts to be recycled
- g^+ : over achievement of the number of parts to be recycled
- h^- : under achievement of the cycle time goal (for FGP);
- h^+ : over achievement of the cycle time goal (for traditional GP);
- h_j^- : under achievement of the cycle time goal (for traditional GP)
- h_j^+ : over achievement of the cycle time goal (for FGP)

The proposed integer mathematical programming model is given as follows:

$$\max \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} r_{ik} d_i w_i p r_i x_{ijk} - \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c_{ik} x_{ijk} - \sum_{i \in I} t c y_i - \sum_{j \in J} c w f_j \quad (1)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} x_{ijk} \leq 1 \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ijk} \leq \sum_{v=1}^j \sum_{k \in K} x_{ilk} \quad \forall i \in I, \forall l \in PA_i, \forall j \in J \quad (3)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ijk} \leq \sum_{v=1}^j \sum_{l \in PO_i} \sum_{k \in K} x_{ilk} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} t_{ik} x_{ijk} \leq C z_j \quad \forall j \in J \quad (5)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ijk} + \sum_{k \in K} x_{ljk} \leq 1 \quad \forall (i, l) \in ZN, \forall j \in J \quad (6)$$

$$y_i = 1 - \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} x_{ijk} \quad \forall i \in I \quad (7)$$

$$x_{ijk}, y_i, z_j \in \{0, 1\} \text{ for } i, j, k \quad (8)$$

The objective function (1) maximizes the total net recovery profit associated with the total revenue earned from parts to be reused, total revenue earned from parts to be recycled, operation cost, transportation cost and workstation utilization. Equation (2) enables that a task can be assigned to at most one work station. In Equations (3) and (4) precedence relations among tasks are satisfied. Equation (3) ensures that task i cannot be assigned until its AND predecessors are assigned to station 1 through j . Equation (4) ensures that task i cannot be assigned to station j until at least one of its OR predecessors is assigned to workstation 1 through j . Equation (5) guarantees that the workload of a workstation does not exceed the cycle time. negative zoning constraint is ensured by the Equation (6). Equation (7) determines the parts which are not disassembled. Equation (8) indicates that all variables are binary variables.

2.2. DLBP-Z with precise goals

The GP is a modelling technique for MCDM problems. GP was introduced by [78] and has been developed by many researchers. GP aims to optimize the several conflicting goals precisely transforming a multi-objective problem to a single-objective problem. There are two basic GP approaches in the literature [74]: (1) weighted (non-preemptive) GP; and (2) pre-emptive GP. In both approaches negative and positive deviational variables are added to the goal equations. According to directions of the equations some of these variables are minimized.

All different deviational variables are formulated with weights to represent their importance level of the corresponding goals in the objective function of a weighted GP model. On the other hand, in a preemptive GP, a priority order of goals is determined. Firstly, the deviational variable of the first goal is minimized and this solution is fixed. Then, the model is solved again by minimizing the deviations of the second goal. This process is repeated until the all goals are solved in the model [79, 90]. The GP model shows whether a goal has been met.

In the GP approaches, it is assumed that the values of all goals can be clearly defined by DM. Determining these values is a difficult task for DM. The DM should set the values of the goals considering account the specific conditions of the problem. No calculations are needed to determine the values of TNP , TRC and \bar{C} . These values are determined entirely by the DM, taking into account the special cases of the problem [90].

In this section, after three precise goals are determined, a pre-emptive GP model is proposed for balancing the disassembly lines using these three precise goals. In the context of this paper the proposed pre-emptive GP model is also referred to as the proposed GP. The goals of DLBP may vary according to the features of the returned products and recovery systems and the preferences of DM. Due to the high costs of disassembly action, it is important for DM to gain profit as a result of the disassembly process. Accordingly, there is a greater tendency to remove parts that have more revenue. Therefore, there is a desire to remove parts to be reused. However, the disassembly manager may need to partially or completely meet the demand of the parts to be used in recycling in order to satisfy the consumers by meeting their demands and to fulfill some legal obligations. It also is desirable that the cycle time be as little as possible to increase efficiency. However, it is not possible to achieve these goals at the same time. For example, the total net profit may decrease when the cycle time decreases. On the other hand, increasing the number of parts to be recycled may reduce the number of parts to be reused and cause the total net profit not to be at the desired levels. Therefore, related goals are conflicting goals, and conflicting goals coexist in practical applications. In this case, a balanced level is tried to be found between them for achieving the goals. This paper focuses on three conflicting goals, namely total net recovery profit value, the number of parts to be removed for recycling and cycle time, and these goals are tried to be optimized. The goals are formulated as follows:

Precise Goal (1) : Total net recovery profit value (TNP)

If the total net recovery profit is equal or greater than an aspiration level (TNP) is desired by the DM, the following equation can be written as below:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} r_{ik} d_i w_i p r_i x_{ijk} - \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c_{ik} x_{ijk} - \sum_{i \in I} t c y_i - \sum_{j \in J} c w f_j \geq \underline{TNP} \quad (9)$$

Then, the goal constraint of the total net recovery profit value can be formulated by adding deviational variables as below:

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} r_{ik} d_i w_i p r_i x_{ijk} - \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c_{ik} x_{ijk} - \sum_{i \in I} t c y_i - \sum_{j \in J} c w f_j - \underline{TNP} + e^- - e^+ = 0 \quad (10)$$

Precise Goal (2): The total number of parts to be recycled (TRC)

The DM wants the total number of parts to be recycled to be equal to or higher than an aspiration level (TRC). This can be formulated with the following equation:

$$\left(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_i w_{ik} p r_{ik} x_{ijk} \right) \geq \underline{TRC} \quad (11)$$

$i \in (I - H), \quad k = 2$

Then, the goal constraint of the total number of parts to be recycled can be formulated by adding deviational variables as below:

$$\left(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_i w_{ik} p r_{ik} x_{ijk} \right) - \underline{TRC} + g^- - g^+ = 0 \quad (12)$$

$i \in (I - H), \quad k = 2$

In Equations (10) and (12), negative deviational variables e^- and g^- represent the amount of under achievement of the total net recovery profit and total number of parts to be recycled, respectively. In the solution of the model, if results of these deviational variables are zero then the goals are achieved, otherwise it is not achieved.

Precise Goal (3): Cycle time (\bar{C})

The last goal considered in this paper is related to the cycle time. The cycle time of a workstation has to be equal or less than upper bound of cycle time (\bar{C}). Then the following equation can be written as below:

$$\left(\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} t_{ik} x_{ijk} \right) \leq \bar{C} f_j \quad \forall j \in J \quad (13)$$

Then, by adding deviational variables, the goal constraint of the cycle time can be formulated as follows:

$$\left(\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} t_{ik} x_{ijk} \right) - \bar{C} f_j + h_j^- - h^+ = 0 \quad \forall j \in J \quad (14)$$

The minimisation of h^+ will minimise the cycle time of disassembly line. When h^+ is found to be zero, the cycle time goal is achieved.

Accordingly, the pre-emptive GP model proposed for DLBP-Z with precise goals is formulated as follows:

$$\text{Min } \{d^-, e^-, h^+\} \quad (15)$$

Subject to

Goal equations : (10), (12) and (14)

System equations : (1) to (8)

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} x_{ijk} - \mu z_j \leq 0 \quad \forall j \in J \quad (16)$$

Non-negativity equations :

$$e^-, e^+, g^-, g^+, h_j^-, h^+ \geq 0 \quad (17)$$

Note that Equation (16) determines whether workstation j is opened.

2.3. DLBP-Z with fuzzy goals

In the proposed GP model, it is assumed that the DM determines the values of the goals precisely and deterministically. However, in many decision-making cases, DM encounters fuzzy, ambiguous or stochastic goals and objectives. That is, they may not be able to determine the goal values precisely. One of the methods used to express the related goals is the fuzzy goal programming method (FGP). FGP is a method used in cases where there are imprecise goals created by applying fuzzy set theory into GP. In FGP, the goals that are used to indicate the demand levels of the purpose include expressions containing uncertainty such as ‘around’ or ‘nearly’ used in fuzzy logic instead of ‘precise’ expressions like in classical logic. In other words, the FGP model determines the success degree of each goal. It provides high flexibility to DM to set goals [79–81, 90, 91].

Zimmerman [80] adapted fuzzy set theory to classical linear programming (LP) problems with several objectives. Later, studies that paved the way for the use of fuzzy logic in LP models followed each other [72, 81, 91–95]. One of these studies belongs to Chang [96], who proposed the binary fuzzy goal programming (BFGP) model, and the BFGP model has been used in the optimization of many operational research problems to date.

In this paper, the BFGP model has been adapted for DLBP-Z with fuzzy goals. It can be considered that the proposed BFGP model is an alternative to the proposed GP model. The BFGP aims to optimize the same goals as the GP model, namely total net profit, the number of parts to be disassembled for recycling and cycle time goals. In the model, these goals have been formulated as fuzzy parameters. The BFGP model suggested by Chang [96] is given below:

$R_p(x)$: the function of resource constraints for the p th goal, $p = 1,2,3, \dots, n$;

c_p : aspiration level set of the goals, $p = 1,2,3, \dots, n$;

b_p : binary decision variable for the p th goal, $p = 1,2,3, \dots, n$; its behaviour (i.e., 0 or 1) is bounded by $R_p(x)$:

$$f_p(x) \cdot b_p \gtrsim c_p \cdot b_p \text{ or } (f_p(x) \cdot b_p \lesssim c_p \cdot b_p), \quad p = 1,2, \dots, n. \quad (18)$$

subject to: $x \in F$ (F is a feasible set);
 $b_p \in R_p(x), p = 1,2, \dots, n$.
Minimise:

$$d_p^-, p = 1,2, \dots, n. \quad (19)$$

Subject to:

$$L_p f_p(x) b_p - L_p^0 b_p + d_p^- - d_p^+ = 1, \quad p = 1,2, \dots, n \text{ for } f_p(x) \gtrsim c_p \quad (20)$$

$$I_p^0 b_p - I_p f_p(x) b_p + d_p^- - d_p^+ = 1, \quad (21)$$

$$p = 1,2, \dots, n \text{ for } f_p(x) \lesssim c_p$$

$$x \in F \text{ (} F \text{ is a feasible set)}$$

$$b_p \in R_p(x), p = 1,2, \dots, n.$$

where:

$$L_p = \frac{1}{c_p - l_p}; L_p^0 = L_p l_p; I_p = \frac{1}{u_p - c_p}; I_p^0 = I_p u_p,$$

where l_p is lower limit and u_p is upper limit for the p th goal, respectively; d_p^- is under achievement and d_p^+ is over achievement of p th goal, respectively.

In this paper, the goals given in Section 3 have been formulated as fuzzy, and the fuzzy goal constraints can be written as below:

Fuzzy Goal (1): Total net recovery profit value (\overline{TNP})

In a disassembly facility, the DM can desire that the total net recovery profit is approximately greater than or equal to \overline{TNP} as formulated in Equation (22).

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} r_{ik} d_i w_i p r_i x_{ijk} - \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c_{ik} x_{ijk} - \sum_{i \in I} t c y_i - \sum_{j \in J} c w f_j \gtrsim \overline{TNP} \quad (22)$$

Then, the total net recovery profit goal constraint can then be obtained as follows:

$$P \left(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} r_{ik} d_i w_i p r_i x_{ijk} - \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c_{ik} x_{ijk} - \sum_{i \in I} t c y_i - \sum_{j \in J} c w f_j \right) - P^0 + e^- - e^+ = 1 \quad (23)$$

Where $P = 1/\overline{TNP} - \underline{TNP}$ and $P^0 = P \underline{TNP}$.

The minimization of e^- will maximize the total net recovery profit. If e^- is calculated as zero, the total net recovery profit is fully-achieved. Or else, it can be level-achieved or not achieved completely.

Fuzzy Goal (2): The total number of parts to be recycled (\overline{TRC})

Equation (24) implies that the total number of parts to be recycled is approximately greater than or equal to \overline{TRC} .

$$\left(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_i w_i p r_i x_{ijk} \right) \gtrsim \overline{TRC} \quad i \in I - H, k = 2 \quad (24)$$

The the total number of reused parts goal constraint can be shown as follows:

$$S \left(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_i w_i p r_i x_{ijk} \right) - S^0 + g^- - g^+ = 1 \quad (25)$$

$i \in I - H, k = 2$

Where $S = 1/\overline{TRC} - \underline{TRC}$ and $S^0 = \underline{STRC}$.

The minimization of g^- will maximize the total number of parts to be recycled. If g^- is found to be zero, the total number of parts to be recycled is fully-achieved. Or else, it can be level-achieved or not achieved completely.

Fuzzy Goal (3): Cycle time (C)

Cycle time is approximately less or equal to \underline{C} and it can be given as below:

$$\left(\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} t_{ik} x_{ijk} \right) \leq \underline{C} f_j \quad \forall j \in J \quad (26)$$

Then, the fuzzy cycle time goal constraint can be formulated as follows:

$$L^0 - L \left(\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} t_{ik} x_{ijk} \right) + h^- - h_j^+ = 1 \quad 0 \quad \forall j \in J \quad (27)$$

where $L = 1/\overline{C} - \underline{C}$ and $L^0 = L\overline{C}$.

If h^- is found to be zero, the cycle time is fully-achieved. Or else, it can be level-achieved or not achieved completely.

According to the fuzzy goal constraints described above, the proposed BFGP model for DLBP-Z with fuzzy goals is presented below:

$$\text{Min} \{ e^-, g^-, h^- \} \quad (28)$$

Subject to

System constraints : (1) to (8), 16

Goal constraints : (23), (25) and (27)

$$\text{Non-negativity constraints} \\ : e^-, e^+, g^-, g^+, h^-, h_j^+ \geq 0 \quad (29)$$

Findings and discussion

3.1. Illustrative example

In this section, the proposed GP and BFGP approaches are illustrated on a small-scaled numerical example problem created by the authors. The related problem has been generated according to the data obtained from some studies in the disassembly literature [6, 9, 85, 89]. The example disassembly facility consists of a disassembly line with eight tasks. The precedence relationships among the tasks are illustrated in Figure 2. The knowledge data of the example problem, including $cw = 2500$ unit and $tc = 850$ currency unit, are given in Table 1.

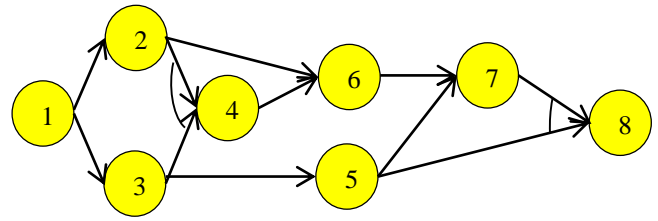


Figure 2. The precedence relationships diagram of the example

Table 1 consists of nine rows and columns. The first column shows the task / part number, the second column shows the actions, and the other columns show the duration of the task required to disassemble part i , unit revenue, task cost, recyclable percentage rate, weight of the part, the amount of demand for the part and the hazard status of the part, respectively.

Table 1. The knowledge data of the example problem

i	k	t_{ik}	r_{ik}	ct_{ik}	pr_i	w_i	d_i	Haz.cont.*
1	1	9	18	2080	-	-	620	No
	2	7	12	1440	1	0.8		
2	2	8	11	1120	0.9	0.6	585	No
3	1	6	13	2060	1	-	420	No
4	2	10	-	2240	-	-	-	Yes
	1	9	14	1760	-	-		
5	2	8	8	960	1	0.8	760	No
	1	9	14	1760	-	-		
6	2	7	11	1140	0.7	0.9	800	No
7	1	9	8	2100	-	-	210	No
8	2	6	10	960	0.8	0.7	160	No

* Hazardous content

Part i is performed with task i . For example, part 1 is performed with task 1, part 2 is performed with task 2. Tasks 1 and 5 are performed with either non-destructive or destructive action. Tasks 3 and 7 are performed using only non-destructive actions, while tasks 2, 6 and 8 are performed using only destructive actions. Task 4 requires special handling as it is applied to remove the hazardous part. It has no demand and no revenue. However, in order to solve the mathematical model in less time, it is taken as $k = 2$ for hazardous parts. Only the duration and the cost of the task are taken into account for these parts. If task 1 is performed with non-destructive action ($k = 1$), the task duration is 9 min, the unit revenue is 18 units / part and the task cost is 2080 currency unit. If the destructive action ($k = 2$) is applied, the duration of the task is 7 min, the unit revenue is 12 units / part, and the task cost is 1440 currency unit. Since the part will be recycled in non-destructive action, weight and recyclable percentage rates should be known when calculating the total revenue. The weight of the part 1 is 0.8 kg, and the recyclable percentage of this weight is 1 kg. In other words, all 0.8 kg is recyclable. The total revenue for both actions is calculated according to the

amount of demand, which is 620 units.

Based on the priority levels, the state-of-the-art LP/MIP solver CPLEX (version 10.2) is used to solve the formulations on Intel(R) Core(TM) i3-5005U CPU, 2.00 GHz equipped (with 8 GB RAM).

Firstly, the results obtained from the proposed GP approach and then the proposed FGP were given.

3.2 The results of the proposed pre-emptive GP

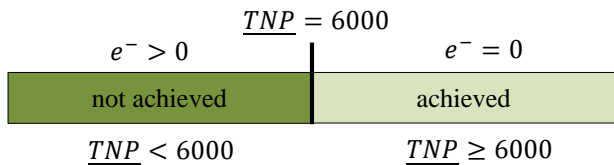
For the proposed GP approach, it was assumed that the disassembly manager determined the priorities among goals and priority values as follows:

Precise goal 1: The total net recovery profit value should be equal or greater than 6000 currency unit ($TNP = 6000$).

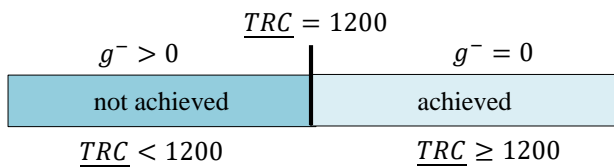
Precise goal 2: The total number of parts to be recycled (TRC) should be equal or greater than 1200 unit ($TRC = 1200$).

Precise goal 3: The cycle time should not exceed 12 min ($\bar{C} = 12$); Considering 20 working days and the highest amount of demand, C was calculated according to the formulation given in Güngör and Gupta, 2002). The values of e^- , g^- , h^+ can be illustrated in Figure 3.

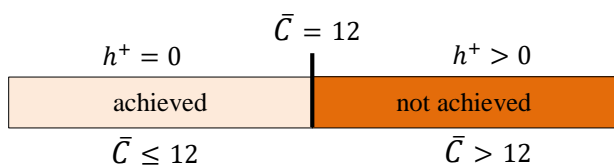
The example problem was solved primarily for the first goal, i.e. to maximize the TNP , and e^- was found to be zero. It means that TNP is larger than 6.000 currency unit ($TNP = 6702.900$) and this goal is achieved. e^- was fixed at zero by using a new constraint. Then, the model is solved again with the objective of maximizing the total number of parts to be recycled.



a) Total net recovery profit



b) Total number of parts to be recycled



c) Cycle time

Figure 3. Achievement of three precise goals, separately.

The negative deviational g^- was calculated as be zero in the solution. This shows that the second goal was achieved as well as the first goal, that is, the TRC is greater than 1200 ($TRC = 1427.900$). g^- was fixed at zero by using a new constraint. The model is solved again to minimise the sum of h^+ of the cycle time.

In the final solution, the objective value was found to be one and the third goal is not achieved. The disassembly line will be run at $12+1=13$ min. Task and action assignments obtained with the last solution of the model are given in Table 2. According to the Table 2, the layout of the disassembly line is shown in Figure 4.

Table 2. Task and action assignments with precise goals

Workstation	Task	Action	Workload
1	1	1	9
2	2	2	8
3	4	-	10
4	3, 6	1, 2	13
5	5	2	8

As shown in Table 2 and Figure 4, the disassembly line consists of five workstations. Tasks 7 and 8 have were not performed, so parts 7 and 8 were not removed. The product enters the disassembly line as a whole and is divided into part / parts at each station. Provided that three precise goals are met, information on which task will be assigned to which station and with which action the tasks will be carried out are obtained as a result of the solution of the proposed GP model. For example, task 1 with two alternative actions at station one is performed with non-destructive action. At station five, task 3 is performed with non-destructive action and task 6 with destructive action.

Three precise goals can be prioritized according to $3! = 6$ different scenarios, and the DM can solve each scenario with the proposed pre-emptive GP model to perform a sensitivity analysis. The sample problem has been solved for 6 different scenarios. It is obtained as the average CPU time of the problems is less than 1 second. The results are summarized in Table 3. Table 3 consists of eight rows and eight columns. The rows show the scenarios. The first column shows the scenario number, the following three columns show priority rows, the fifth column shows the unsatisfied goal, and the following three columns show the TNP , TRC and C values obtained from the scenarios, respectively. In each row, the names of the prioritized goals, and below each goal, the deviation values obtained as a result of the solution are given.

According to Table 3, only TNP in two scenarios, only TRC in two scenarios and only C goals in two scenarios are unsatisfied. The DM has to choose one of the scenarios with less total net recovery profit, fewer total number of parts to be recycled, or longer cycle time, depending on the situation.

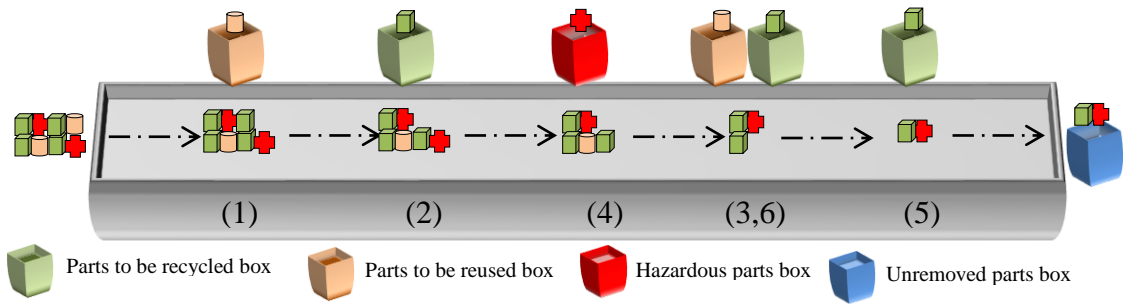


Figure 4. The layout of the disassembly line of the example problem with precise goals

Table 3. Sensitivity analysis according to the priority order of the precise goals

Scenario	Priority 1	Priority 2	Priority 3	Not achieved	<i>TNP</i>	<i>TRC</i>	<i>C</i>
1	<i>TNP</i> $e^- = 0$	<i>TRC</i> $g^- = 0$	<i>C</i> $h^+ = 1$	<i>C</i>	6702.9	1427.9	13
2	<i>TNP</i> $e^- = 0$	<i>C</i> $h^+ = 0$	<i>TRC</i> $g^- = 90.5$	<i>TRC</i>	7464.9	909.5	12
3	<i>TRC</i> $g^- = 0$	<i>TNP</i> $e^- = 0$	<i>C</i> $h^+ = 1$	<i>C</i>	6702.9	1427.9	13
4	<i>TRC</i> $g^- = 0$	<i>C</i> $h^+ = 0$	<i>TNP</i> $e^- = 1389.1$	<i>TNP</i>	4610.9	1315.9	12
5	<i>C</i> $h^+ = 0$	<i>TNP</i> $e^- = 0$	<i>TRC</i> $g^- = 90.5$	<i>TRC</i>	7464.9	909.5	12
6	<i>C</i> $h^+ = 0$	<i>TRC</i> $g^- = 0$	<i>TNP</i> $e^- = 1389.1$	<i>TNP</i>	4610.9	1315.9	12

3.3 The results of the proposed FGP

The same disassembly manager now wants to balance the disassembly line with uncertain goals and defines the following fuzzy goals and priorities:

Fuzzy goal 1 : The total net recovery profit value should be approximately greater than or equal to $\overline{TNP} = 8000$ with a lower tolerance limit of $\underline{TNP} = 2000$.

Fuzzy goal 2: The total number of parts to be recycled value should be greater than or equal to $\overline{TRC} = 1400$ with a lower tolerance limit $\underline{TRC} = 300$ unit.

Fuzzy goal 3: The cycle time value should be with a lower bound limit $\underline{C} = 10$ and with an upper tolerance limit function 0 indicates that the purpose is not met in any way and 1 indicates that it is completely met. Achievement levels of the goals can be showed in Figure 5, Figure 6 and Figure 7.

The results obtained by solving the proposed FGP approach by considering the above priorities are given in Table 4 and the placement of the disassembly line in Figure 8. $\bar{C} = 16$.

The variables are defined on a scale between 0 and 1. The membership function values are found according to the

values of the variables (1-variable value). Membership function 0 indicates that the purpose is not met in any way and 1 indicates that it is completely met.

The results obtained by solving the proposed FGP approach by considering the above priorities are given in Table 4 and the placement of the disassembly line in Figure 8.

According to Table 4 and Figure 8, the disassembly line consists of four stations, tasks 7 and 8 have not been performed as in the proposed pre-emptive GP, and these parts have not been removed. Under achievement variables e^- ve g^- are calculated as zero which represent full-achievement of the total net recovery profit goal and total number of parts to be recycled goal, respectively. So, *TNP* is greater than 8000 and *TRC* is greater than 1400 ($TNP > 8000$ and $TRC > 1400$). However, under achievement variable h^- is calculated as 0.833 which means the cycle time goal is level achieved with the membership value of 0.167 (1-0.833). The cycle time is 15 min.

As in Preemptive GP, three goals are listed according to $3! = 6$ different scenarios. Each scenario have been solved with the proposed pre-emptive FGP model in order to perform sensitivity analysis. According to the results, the

average CPU time of the problems is less than 1 second. The results obtained are given in Table 5.

Table 5 is arranged like Table 4 and only the expression ‘level-achieved’ goal is used instead of ‘not achieved’. According to Table 5, it is observed that all goals are fully achieved in four scenarios and level achieved in two scenarios. *TNP* is fully achieved in the scenarios where it has the first and second priority (1st, 2nd, 3rd, and 5th scenarios). Accordingly, in two scenarios, it has the third priority and is level achieved with a membership function value of 0.367. When *TRC* has the first and second priority in the 1st, 3rd, 4th and 6th scenarios, it is fully-achieved, and when it has the third priority in the second and fifth scenarios, it is the level achieved with the 0.473 membership function. When *C* has the first and second

priority in four scenarios, it is fully achieved, and when it has the third priority in two scenarios, it is level achieved with 0.167 membership function.

The upper and lower bounds for goals of the illustrative example provide the DM to accept either greater total net recovery profit and total number of parts to be recycled, longer cycle time, or greater total net recovery profit, shorter cycle time, less total number of parts to be recycled or greater total number of parts to be recycled, shorter cycle time, less total net recovery profit. On the other hand, the DM can re-set the lower and upper limit values of the goals to obtain better alternatives. This is completely related to the policy that the DM will follow according to the circumstances, and it may change.

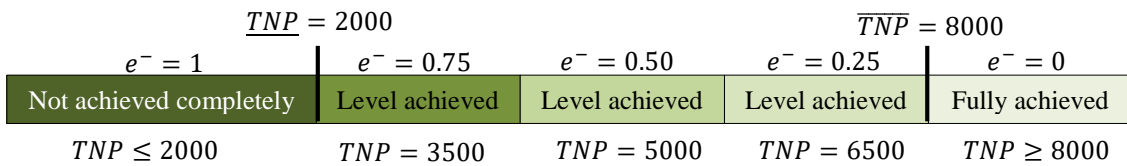


Figure 5. Achievement levels of the total net recovery profit goal.

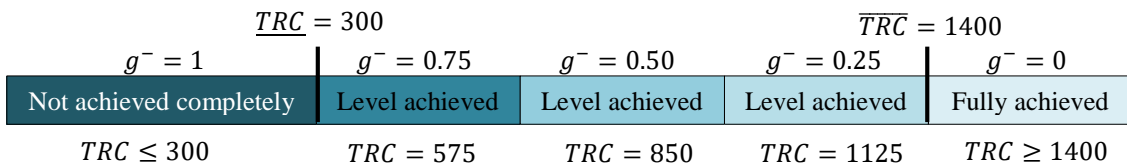


Figure 6. Achievement levels of the total number of parts to be recycled goal.

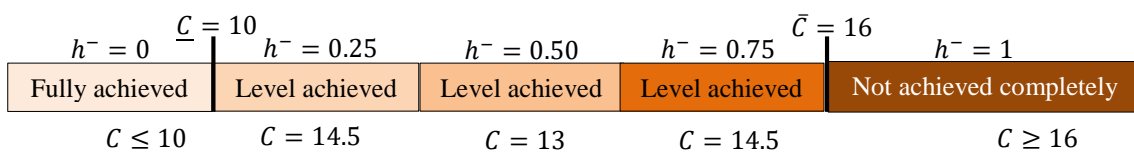


Figure 7. Achievement levels of the cycle time goal.

Table 4. Task and action assignments of the illustrative example with fuzzy goals

Workstation	Task	Action	Workload
1	1	1	9
2	2, 3	2, 1	14
3	4	-	10
4	5, 6	2	15

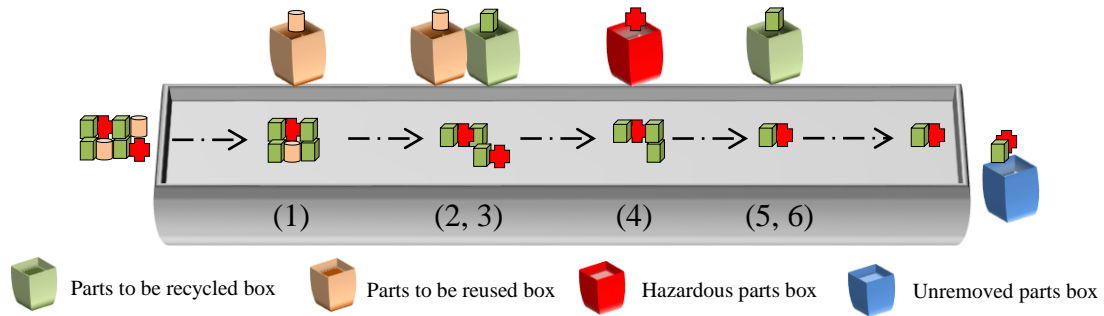


Figure 8. The layout of the disassembly line of the example problem with precise goals

Table 5. Sensitivity analysis according to the priority order of the fuzzy goals

Scenario	Priority 1	Priority 2	Priority 3	Level-achieved Goal	TNP	TRC	C
1	TNP $e^- = 0$	TRC $g^- = 0$	C $h^- = 0.833$	C	9200	1427.5	15
2	TNP $e^- = 0$	C $h^- = 0$	TRC $g^- = 0.527$	TRC	9176	820.3	10
3	TRC $g^- = 0$	TNP $e^- = 0$	C $h^- = 0.833$	C	9200	1427.5	15
4	TRC $g^- = 0$	C $h^- = 0$	TNP $e^- = 0.633$	TNP	4202	1427.5	10
5	C $h^- = 0$	TNP $e^- = 0$	TRC $g^- = 0.527$	TRC	9176	820.3	10
6	C $h^- = 0$	TRC $g^- = 0$	TNP $e^- = 0.633$	TNP	4202	1427.5	10

Conclusion

Disassembly is one of the important steps of the recovery process, and the places where it is efficiently carried out are disassembly lines. If there are hazardous parts in the disassembly of the products on the disassembly lines, these parts should be made with special handling and one or more objectives are tried to be optimized. In real-life applications, multiple conflicting goals are taken into account at the same time to achieve effective and realistic solutions. Some goals can easily be set as precise goals by DM. However, some goals should be set as ambiguous goals because these goals can be imprecise, vague, or uncertain. In this paper, first of all, an IP formulation that takes into account the DLBP-Z problem have been proposed. Later, a preemptive GP model for precise goals and an FGP model for imprecise goals have been proposed in solving the problem by adhering to this formulation. The proposed GP and FGP models are the first MCDM approaches applied for this problem. Three conflicting goals have been taken into account.

Through a numerical example, the proposed approaches have been tested and goal programming formulations have been shown to be valid and useful. One of these approaches can be adopted by DM according to the decision environment. The proposed approaches provide flexibility to DM by considering multiple choice of goals and priorities.

This paper may guide recovery facilities in meeting environmental laws declared by the government, such as “take-back policies,” and ensuring the efficiency of the facility. However, This paper is limited to some assumptions to balance the straight and single product-type disassembly lines with deterministic parameters such as demand, time, cost. It is also limited to optimize three goals, namely total net recovery profit value, the number of parts to be removed for recycling and cycle time.

According to these limitations, there are several interesting directions for future research about problem as follows: In DLBP-Z, goal programming approaches can be applied by taking into account mixed model products and/or different layouts such as u-type, parallel and two-sided. Parameters such as task times and demand estimates can be evaluated as fuzzy. New goals such as reducing the number of stations or decreasing the total cost of the task or increasing the number of parts to be removed for reused can be added or replaced with existing goals. Resource savings can be achieved by ensuring that tasks performed with common destructive or non-destructive actions are assigned to the same stations. In this way, goals can be improved. Due to the combinatorial structure of DLBP-Z, heuristic approaches can be developed for the solution of medium and large sized problems.

Conflict of interest

Authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): % 16

References

- [1] M. Thierry, M. Salomon, J. Van Nunen, and L. Van Wassenhove, Strategic Issues in Product Recovery Management: 37 (2), 114–135, 1995. <https://doi.org/10.2307/41165792>.
- [2] A. Gungor, and S.M. Gupta, Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery: a survey. Computers & Industrial Engineering, 36 (4), 811–853, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0360-8352\(99\)00167-9](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(99)00167-9).
- [3] M.A. Ilgin, and S.M. Gupta, Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO): A review of the state of the art. Journal of Environmental Management, 91 (3), 563–591, 2010. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2009.09.037>.
- [4] S.M. GUPTA, and K.N. TALEB, Scheduling disassembly.32 (8), 1857–1866, 2007. <https://doi.org/10.1080/00207549408957046>.
- [5] A. Koc, I. Sabuncuoglu, and E. Erel, Two exact formulations for disassembly line balancing problems with task precedence diagram construction using an AND/OR graph. IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers), 41 (10), 866–881, 2009. <https://doi.org/10.1080/07408170802510390>.
- [6] A. Güngör, and S.M. Gupta, Disassembly line in product recovery. International Journal of Production Research, 40 (11), 2569–2589, 2002. <https://doi.org/10.1080/00207540210135622>.
- [7] Ö. Tozanlı, E. Kongar, and S.M. Gupta, Trade-in-to-upgrade as a marketing strategy in disassembly-to-order systems at the edge of blockchain technology. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1712489>, 58 (23), 7183–7200, 2020. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1712489>.
- [8] S. Agrawal, and M.K. Tiwari, A collaborative ant colony algorithm to stochastic mixed-model U-shaped disassembly line balancing and sequencing problem. International Journal of Production Research, 46 (6), 1405–1429, 2008. <https://doi.org/10.1080/00207540600943985>.
- [9] E. Kongar, and S.M. Gupta, Disassembly to order system under uncertainty. Omega, 34 (6), 550–561, 2006. <https://doi.org/10.1016/J.OMEGA.2005.01.006>.
- [10] K. Igarashi, T. Yamada, and M. Inoue, 2-Stage Optimal Design and Analysis for Disassembly System With Environmental and Economic Parts Selection Using the Recyclability Evaluation Method. Industrial Engineering and Management Systems, 13 (1), 52–66, 2014. <https://doi.org/10.7232/iems.2014.13.1.052>.
- [11] A. Güngör, and S.M. Gupta, A solution approach to the disassembly line balancing problem in the presence of task failures. International Journal of Production Research, 39 (7), 1427–1467, 2001. <https://doi.org/10.1080/00207540110052157>.
- [12] S.M. McGovern, and S.M. Gupta, Combinatorial optimization analysis of the unary NP-complete disassembly line balancing problem. International Journal of Production Research, 45 (18–19), 4485–4511, 2007. <https://doi.org/10.1080/00207540701476281>.
- [13] S.M. McGovern, and S.M. Gupta, A balancing method and genetic algorithm for disassembly line balancing. European Journal of Operational Research, 179 (3), 692–708, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.03.055>.
- [14] A. Aydemir-Karadag, and O. Turkbey, Multi-objective optimization of stochastic disassembly line balancing with station paralleling. Computers and Industrial Engineering, 65 (3), 413–425, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.03.014>.
- [15] S. Hezer, and Y. Kara, A network-based shortest route model for parallel disassembly line balancing problem. International Journal of Production Research, 53 (6), 1849–1865, 2015. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.965348>.
- [16] Z. Li, I. Kucukkoc, and Z. Zhang, Iterated local search method and mathematical model for sequence-dependent U-shaped disassembly line balancing problem. Computers and Industrial Engineering, 137 (September), 106056, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106056>.
- [17] S. Avikal, R. Jain, and P. Mishra, A heuristic for U-shaped disassembly line balancing problems. MIT International Journal of Mechanical Engineering, 3 (1), 51–56, 2013.
- [18] K. Wang, L. Gao, and X. Li, A multi-objective algorithm for U-shaped disassembly line balancing with partial destructive mode. Neural Computing and Applications, 32 (16), 12715–12736, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-04721-0>.
- [19] F.T. Altekin, L. Kandiller, and N.E. Ozdemirel, Profit-oriented disassembly-line balancing. International Journal of Production Research, 46 (10), 2675–2693, 2008. <https://doi.org/10.1080/00207540601137207>.
- [20] M.L. Bentaha, A. Dolgui, O. Battaïa, R.J. Riggs, and J. Hu, Profit-oriented partial disassembly line design: dealing with hazardous parts and task processing times uncertainty. International Journal of Production Research, 56 (24), 7220–7242, 2018. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1418987>.
- [21] Y. Ren, D. Yu, C. Zhang, G. Tian, L. Meng, and X. Zhou, An improved gravitational search algorithm for profit-oriented partial disassembly line balancing problem. International Journal of Production Research, 55 (24), 7302–7316, 2017. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1341066>.
- [22] S. Parsa, and M. Saadat, Intelligent selective disassembly planning based on disassemblability characteristics of product components. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 104 (5–8), 1769–1783, 2019. <https://doi.org/10.1007/>

- s00170-019-03857-1.
- [23] K. Wang, X. Li, L. Gao, and A. Garg, Partial disassembly line balancing for energy consumption and profit under uncertainty. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 59 (May), 235–251, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.04.014>.
- [24] Q. Xiao, X. Guo, and D. Li, Partial disassembly line balancing under uncertainty: robust optimisation models and an improved migrating birds optimisation algorithm. *International Journal of Production Research*, 59 (10), 2977–2995, 2021. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1744765>.
- [25] K. Wang, X. Li, and L. Gao, Modeling and optimization of multi-objective partial disassembly line balancing problem considering hazard and profit. *Journal of Cleaner Production*, 211, 115–133, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.114>.
- [26] S.M. McGovern, and S.M. Gupta, Local search heuristics and greedy algorithm for balancing a disassembly line. *International Journal of Operations and Quantitative Management*, 11 (2), 91–114, 2005.
- [27] M.L. Bentaha, O. Battaia, and A. Dolgui, An exact solution approach for disassembly line balancing problem under uncertainty of the task processing times. *International Journal of Production Research*, 53 (6), 1807–1818, 2015. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.961212>.
- [28] C.B. Kalayci, and S.M. Gupta, A tabu search algorithm for balancing a sequence-dependent disassembly line. *Production Planning and Control*, 25 (2), 149–160, 2014. <https://doi.org/10.1080/09537287.2013.782949>.
- [29] F.T. Altekin, and C. Akkan, Task-failure-driven rebalancing of disassembly lines. *International Journal of Production Research*, 50 (18), 4955–4976, 2012. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.616915>.
- [30] E.G. Kalaycilar, M. Azizoğlu, and S. Yeralan, A disassembly line balancing problem with fixed number of workstations. *European Journal of Operational Research*, 249 (2), 592–604, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.09.004>.
- [31] Y. Fang, Q. Liu, M. Li, Y. Laili, and D.T. Pham, Evolutionary many-objective optimization for mixed-model disassembly line balancing with multi-robotic workstations. *European Journal of Operational Research*, 276 (1), 160–174, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.12.035>.
- [32] Z. Zhang, K. Wang, L. Zhu, and Y. Wang, A Pareto improved artificial fish swarm algorithm for solving a multi-objective fuzzy disassembly line balancing problem. *Expert Systems with Applications*, 86 1339–1351, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.05.053>.
- [33] L. Zhu, Z. Zhang, and Y. Wang, A Pareto firefly algorithm for multi-objective disassembly line balancing problems with hazard evaluation. *International Journal of Production Research*, 56 (24), 7354–7374, 2018. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1471238>.
- [34] S. Wang, X. Guo, and J. Liu, An efficient hybrid artificial bee colony algorithm for disassembly line balancing problem with sequence-dependent part removal times. *Engineering Optimization*, 51 (11), 1920–1937, 2019. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2018.1564918>.
- [35] Y. Fang, H. Ming, M. Li, Q. Liu, and D.T. Pham, Multi-objective evolutionary simulated annealing optimisation for mixed-model multi-robotic disassembly line balancing with interval processing time. *International Journal of Production Research*, 58 (3), 846–862, 2020. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1602290>.
- [36] G. Bin Qin, X.W. Guo, M.C. Zhou, S.X. Liu, and L. Qi, Multi-Objective Discrete Migratory Bird Optimizer for Stochastic Disassembly Line Balancing Problem. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2020-Octob 420–425, 2020. <https://doi.org/10.1109/SMC42975.2020.9283371>.
- [37] S.M. McGovern, and S.M. Gupta, Ant colony optimization for disassembly sequencing with multiple objectives. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 30 (5–6), 481–496, 2006. <https://doi.org/10.1007/s00170-005-0037-6>.
- [38] L.P. Ding, Y.X. Feng, J.R. Tan, and Y.C. Gao, A new multi-objective ant colony algorithm for solving the disassembly line balancing problem. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 48 (5–8), 761–771, 2010. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2303-5>.
- [39] C.B. Kalayci, and S.M. Gupta, Ant colony optimization for sequence-dependent disassembly line balancing problem. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 24 (3), 413–427, 2013. <https://doi.org/10.1108/17410381311318909>.
- [40] C.B. Kalayci, and S.M. Gupta, A particle swarm optimization algorithm with neighborhood-based mutation for sequence-dependent disassembly line balancing problem. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69 (1–4), 197–209, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-4990-1>.
- [41] C.B. Kalayci, A. Hancilar, A. Gungor, and S.M. Gupta, Multi-objective fuzzy disassembly line balancing using a hybrid discrete artificial bee colony algorithm. *Journal of Manufacturing Systems*, 37 672–682, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.11.015>.
- [42] M. Seidi, and S. Saghari, The balancing of disassembly line of automobile engine using Genetic Algorithm (GA) in fuzzy environment. *Industrial Engineering and Management Systems*, 15 (4), 364–373, 2016. <https://doi.org/10.7232/iems.2016.15.4.364>.
- [43] S. Xiao, Y. Wang, H. Yu, and S. Nie, An entropy-based adaptive hybrid particle swarm optimization for disassembly line balancing problems. *Entropy*, 19 (11), , 2017. <https://doi.org/10.3390/e19110596>.
- [44] M.L. Bentaha, O. Battaia, and A. Dolgui, A sample average approximation method for disassembly line

- balancing problem under uncertainty. *Computers and Operations Research*, 51 111–122, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.05.006>.
- [45] J. He, F. Chu, F. Zheng, M. Liu, and C. Chu, A multi-objective distribution-free model and method for stochastic disassembly line balancing problem. *International Journal of Production Research*, 58 (18), 5721–5737, 2020. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1656841>.
- [46] J. He, F. Chu, F. Zheng, and M. Liu, A green-oriented bi-objective disassembly line balancing problem with stochastic task processing times. *Annals of Operations Research*, 296 (1–2), 71–93, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03558-z>.
- [47] K. Wang, X. Li, and L. Gao, A multi-objective discrete flower pollination algorithm for stochastic two-sided partial disassembly line balancing problem. *Computers and Industrial Engineering*, 130 (September 2018), 634–649, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.03.017>.
- [48] F.T. Altekin, Z.P. Bayındır, and V. Gümüşkaya, Remedial actions for disassembly lines with stochastic task times. *Computers and Industrial Engineering*, 99 78–96, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.06.027>.
- [49] F.T. Altekin, A comparison of piecewise linear programming formulations for stochastic disassembly line balancing. *International Journal of Production Research*, 55 (24), 7412–7434, 2017. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1351639>.
- [50] F. Zheng, J. He, F. Chu, and M. Liu, A new distribution-free model for disassembly line balancing problem with stochastic task processing times. *International Journal of Production Research*, 56 (24), 7341–7353, 2018. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1430909>.
- [51] K. Liu, and Z.H. Zhang, Capacitated disassembly scheduling under stochastic yield and demand. *European Journal of Operational Research*, 269 (1), 244–257, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.08.032>.
- [52] S. Avikal, P.K. Mishra, and R. Jain, A Fuzzy AHP and PROMETHEE method-based heuristic for disassembly line balancing problems. *International Journal of Production Research*, 52 (5), 1306–1317, 2014. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.831999>.
- [53] Y. Yang, G. Yuan, Q. Zhuang, and G. Tian, Multi-objective low-carbon disassembly line balancing for agricultural machinery using MDFOA and fuzzy AHP. *Journal of Cleaner Production*, 233 1465–1474, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.035>.
- [54] T. Paksoy, A. Güngör, E. Özceylan, and A. Hancılar, Mixed model disassembly line balancing problem with fuzzy goals. *International Journal of Production Research*, 51 (20), 6082–6096, 2013. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.795251>.
- [55] S. Avikal, R. Jain, and P.K. Mishra, A Kano model, AHP and M-TOPSIS method-based technique for disassembly line balancing under fuzzy environment. *Applied Soft Computing Journal*, 25 519–529, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.08.002>.
- [56] J. Liu, Z. Zhou, D.T. Pham, W. Xu, J. Yan, A. Liu, C. Ji, and Q. Liu, An improved multi-objective discrete bees algorithm for robotic disassembly line balancing problem in remanufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97 (9–12), 3937–3962, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2183-7>.
- [57] Z.A. Çil, S. Mete, and F. Serin, Robotic disassembly line balancing problem: A mathematical model and ant colony optimization approach. *Applied Mathematical Modelling*, 86 335–348, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.05.006>.
- [58] Y. Laili, F. Tao, D.T. Pham, Y. Wang, and L. Zhang, Robotic disassembly re-planning using a two-pointer detection strategy and a super-fast bees algorithm. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 59 (December 2018), 130–142, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.04.003>.
- [59] J. Liu, Z. Zhou, D.T. Pham, W. Xu, C. Ji, and Q. Liu, Collaborative optimization of robotic disassembly sequence planning and robotic disassembly line balancing problem using improved discrete Bees algorithm in remanufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61 (February 2018), 101829, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101829>.
- [60] L. Zhang, X. Zhao, Q. Ke, W. Dong, and Y. Zhong, Disassembly Line Balancing Optimization Method for High Efficiency and Low Carbon Emission. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, 8 (1), 233–247, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40684-019-00140-2>.
- [61] K. Wang, X. Li, L. Gao, and P. Li, Energy consumption and profit-oriented disassembly line balancing for waste electrical and electronic equipment. *Journal of Cleaner Production*, 265 121829, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121829>.
- [62] K. Wang, X. Li, L. Gao, and P. Li, Modeling and Balancing for Green Disassembly Line Using Associated Parts Precedence Graph and Multi-objective Genetic Simulated Annealing. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, (0123456789), , 2020. <https://doi.org/10.1007/s40684-020-00259-7>.
- [63] A. Budak, Sustainable reverse logistics optimization with triple bottom line approach: An integration of disassembly line balancing. *Journal of Cleaner Production*, 270 , 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122475>.
- [64] Y. Kazancoglu, and Y.D. Ozkan-Ozen, Sustainable disassembly line balancing model based on triple bottom line. *International Journal of Production Research*, 58 (14), 4246–4266, 2020. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1651456>.
- [65] Y. Gao, Q. Wang, Y. Feng, H. Zheng, B. Zheng, and

- J. Tan, An energy-saving optimization method of dynamic scheduling for disassembly line. *Energies*, 11 (5), , 2018. <https://doi.org/10.3390/en11051261>.
- [66] S. Smith, and P.Y. Hung, A novel selective parallel disassembly planning method for green design. *Journal of Engineering Design*, 26 (10–12), 283–301, 2015. <https://doi.org/10.1080/09544828.2015.1045841>.
- [67] Y.K. Hao, and S. Hasan, The improvement of line efficiency on disassembly line balancing problem: An HRRCD's heuristic rule. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11 (10), 6428–6433, 2016.
- [68] F. Pistolesi, B. Lazzerini, M.D. Mura, and G. Dini, EMOGA: A Hybrid Genetic Algorithm with Extremal Optimization Core for Multiobjective Disassembly Line Balancing. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14 (3), 1089–1098, 2018. <https://doi.org/10.1109/TII.2017.2778223>.
- [69] J. Li, X. Chen, Z. Zhu, C. Yang, and C. Chu, A branch bound, and remember algorithm for the simple disassembly line balancing problem. *Computers and Operations Research*, 105 47–57, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.01.003>.
- [70] M. Colledani, and O. Battaia, A decision support system to manage the quality of End-of-Life products in disassembly systems. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65 (1), 41–44, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.121>.
- [71] J. Cao, X. Xia, L. Wang, Z. Zhang, and X. Liu, A Novel Multi-Efficiency Optimization Method for Disassembly Line Balancing Problem. *Sustainability (Switzerland)*, 11 (24), , 2019. <https://doi.org/10.3390/su11246969>.
- [72] E.L. Hannan, Linear programming with multiple fuzzy goals. *Fuzzy Sets and Systems*, 6 (3), 235–248, 1981. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(81\)90002-6](https://doi.org/10.1016/0165-0114(81)90002-6).
- [73] Y. Laili, Y. Li, Y. Fang, D.T. Pham, and L. Zhang, Model review and algorithm comparison on multi-objective disassembly line balancing. *Journal of Manufacturing Systems*, 56 (December 2019), 484–500, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.07.015>.
- [74] J.P. Ignizio, *Linear programming in single- & multiple-objective systems* Prentice-Hall, 1982.
- [75] Y. Ren, C. Zhang, F. Zhao, G. Tian, W. Lin, L. Meng, and H. Li, Disassembly line balancing problem using interdependent weights-based multi-criteria decision making and 2-Optimal algorithm. *Journal of Cleaner Production*, 174 1475–1486, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.308>.
- [76] L. Li, Z. Zhang, L. Zhu, and B. Zou, Modeling and Optimizing for Multi-objective Partial Disassembly Line Balancing Problem. *Jixie Gongcheng Xuebao/Journal of Mechanical Engineering*, 54 (3), 125–136, 2018. <https://doi.org/10.3901/JME.2018.03.125>.
- [77] G. Yuan, Y. Yang, and D.T. Pham, Multiobjective Ecological Strategy Optimization for Two-Stage Disassembly Line Balancing with Constrained-Resource. *IEEE Access*, 8 88745–88758, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2994065>.
- [78] Abraham Charnes, and William W. Cooper, *Management models and industrial applications of linear programming, Volume I*, by Abraham Charnes and William W. Cooper. John Wiley and Sons, New York, 467 pp. 1961.
- [79] Y. Kara, H. Gökçen, and Y. Atasagun, Balancing parallel assembly lines with precise and fuzzy goals. *International Journal of Production Research*, 48 (6), 1685–1703, 2010. <https://doi.org/10.1080/00207540802534715>.
- [80] H.J. Zimmermann, Fuzzy programming and linear programming with several objective functions. *Fuzzy Sets and Systems*, 1 (1), 45–55, 1978. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(78\)90031-3](https://doi.org/10.1016/0165-0114(78)90031-3).
- [81] R. Narasimhan, goal programming in a fuzzy environment. *Decision Sciences*, 11 (2), 325–336, 1980. <https://doi.org/10.1111/J.1540-5915.1980.TB01142.X>.
- [82] E. Özceylan, C.B. Kalayci, A. Güngör, and S.M. Gupta, Disassembly line balancing problem: a review of the state of the art and future directions. *International Journal of Production Research*, 57 (15–16), 4805–4827, 2019. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1428775>.
- [83] N. Deniz, and F. Ozcelik, An extended review on disassembly line balancing with bibliometric & social network and future study realization analysis. *Journal of Cleaner Production*, 225 697–715, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.188>.
- [84] J. Liang, S. Guo, B. Du, Y. Li, J. Guo, Z. Yang, and S. Pang, Minimizing energy consumption in multi-objective two-sided disassembly line balancing problem with complex execution constraints using dual-individual simulated annealing algorithm. *Journal of Cleaner Production*, 284 125418, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125418>.
- [85] S.K. Das, P. Yedlarajiah, and R. Narendra, An approach for estimating the end-of-life product disassembly effort and cost. *International Journal of Production Research*, 38 (3), 657–673, 2000. <https://doi.org/10.1080/002075400189356>.
- [86] I. Kucukkoc, Z. Li, and Y. Li, Type-E disassembly line balancing problem with multi-manned workstations. *Optimization and Engineering*, 21 (2), 611–630, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11081-019-09465-y>.
- [87] E.B. Edis, M.A. Ilgin, and R.S. Edis, Disassembly line balancing with sequencing decisions: A mixed integer linear programming model and extensions. *Journal of Cleaner Production*, 238 117826, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117826>.
- [88] M.L. Bentaha, O. Battaia, A. Dolgui, and S.J. Hu, Second order conic approximation for disassembly line design with joint probabilistic constraints. *European Journal of Operational Research*, 247 (3), 957–967, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.06.019>.

- [89] S.K. Das, and S. Naik, Process planning for product disassembly. *International Journal of Production Research*, 40 (6), 1335–1355, 2002. <https://doi.org/10.1080/00207540110102142>.
- [90] U. Özcan, and B. Toklu, Multiple-criteria decision-making in two-sided assembly line balancing: A goal programming and a fuzzy goal programming models. *Computers & Operations Research*, 36 (6), 1955–1965, 2009. <https://doi.org/10.1016/J.COR.2008.06.009>.
- [91] R.N. Tiwari, S. Dharmar, and J.R. Rao, Fuzzy goal programming - An additive model. *Fuzzy Sets and Systems*, 24 (1), 27–34, 1987. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(87\)90111-4](https://doi.org/10.1016/0165-0114(87)90111-4).
- [92] T. Yang, J.P. Ignizio, and H.J. Kim, Fuzzy programming with nonlinear membership functions: Piecewise linear approximation. *Fuzzy Sets and Systems*, 41 (1), 39–53, 1991. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(91\)90156-K](https://doi.org/10.1016/0165-0114(91)90156-K).
- [93] S.S. Rao, K. Sundararaju, B.G. Prakash, and C. Balakrishna, Fuzzy goal programming approach for structural optimization. <https://doi.org/10.2514/3.11079>, 30 (5), 1425–1432, 2012. <https://doi.org/10.2514/3.11079>.
- [94] J.R. Rao, R.N. Tiwari, and B.K. Mohanty, A preference structure on aspiration levels in a goal programming problem — A fuzzy approach. *Fuzzy Sets and Systems*, 25 (2), 175–182, 1988. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(88\)90185-6](https://doi.org/10.1016/0165-0114(88)90185-6).
- [95] R.N. Tiwari, S. Dharmar, and J.R. Rao, Priority structure in fuzzy goal programming. *Fuzzy Sets and Systems*, 19 (3), 251–259, 1986. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(86\)90054-0](https://doi.org/10.1016/0165-0114(86)90054-0).
- [96] C. Ter Chang, Binary fuzzy goal programming. *European Journal of Operational Research*, 180 (1), 29–37, 2007. <https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2006.03.030>.





Farklı uydu sistemi kombinasyonlarının gerçek zamanlı hassas nokta konumlamaya etkisi

The effect of different satellite system combinations on real-time precise point positioning

Cevat İnal¹, Burhaneddin Bilgen^{2,*}, Sercan Bülbül³, Musa Başbük⁴

^{1, 2, 3, 4} Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 42250, Konya, Türkiye

Özet

Hassas Nokta Konumlama (PPP) yöntemi, gerçek zamanlı (RT-PPP) ve ölçü sonrası değerlendirme (PP-PPP) olmak üzere iki şekilde uygulanmaktadır. Bu çalışmada, jeomanyetik aktivitelerin GNSS gözlemleri üzerindeki bozucu etkisinin sonuçlara yansımaması amacıyla Kp, Dst ve F10.7 indisleri incelenmiş ve jeomanyetik aktivitelerin olmadığı 30 ardışık gün belirlenmiştir. Yüksek, orta ve alçak enlem bölgelerinde bulunan Uluslararası GNSS Servisi-Multi GNSS Experiment istasyonlarından KIR8, PADO, NKLK'nin bu ardışık günlere ait Alıcıdan Bağımsız Veri Değişim Formatı (RINEX) verileri RTKLIB v2.4.3 yazılımı ile çözümlenmiştir. Daha sonra, elde edilen kartezyen koordinatlar gerçek değerlerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca, her bir istasyona ait koordinat eksenleri yönündeki karesel ortalama hatalar ve konum ortalama hataları hesaplanarak farklı uydu sistemi kombinasyonlarının RT-PPP'ye etkisi incelenmiş, genellikle desimetre mertebesinde ortalama hatalar elde edilmiştir. Elde edilen ortalama hatalar değerlendirildiğinde; RT-PPP yönteminin jeodezik uygulamalardan beklenen doğruluğu henüz sağlayamadığı görülmekte, fakat gelecekte hem alıcı hem de antenlerin RT-PPP'yi destekler hâle gelmesi ve yayınlanan gerçek zamanlı düzeltmelerin iyileştirilmesiyle jeodezik uygulamalar için gerekli doğruluğu sağlayabileceği beklenmektedir.

Anahtar kelimeler: MGEX, Multi-GNSS, PPP, RT-PPP, RTKLIB

1 Giriş

Başlangıçta jeodezik nokta konumlarının belirlenmesinde sadece klasik yersel teknikler kullanılmaktayken, teknolojinin gelişmesiyle birlikte özellikle 1978 yılında Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Savuna Bakanlığı'nın askeri amaçlı çalışmalar için ürettiği Küresel Konum Belirleme Sistemi'nin (GPS) hizmete girmesiyle konum belirleme farklı bir boyut ve hız kazanmıştır. GPS her ne kadar başlangıçta askeri amaçlı ortaya çıkmış olsa da daha sonraları tüm dünyanın hizmetine sunulmuş ve sivil kullanıma izin verilmiştir. ABD'nin bu çalışmalarının yanı sıra özellikle Avrupa Birliği ülkeleri, Çin, Japonya, Rusya ve Hindistan kendi navigasyon

Abstract

Precise Point Positioning (PPP) method is applied in two ways: real-time (RT-PPP) and post-process (PP-PPP). In this study, Kp, Dst and F10.7 indices were examined in order not to reflect the disturbing effect of geomagnetic activities on GNSS observations on the results, and 30 consecutive days without geomagnetic activities were determined. Receiver Independent Exchange Format (RINEX) data of KIR8, PADO, NKLK which are International GNSS Service-Multi GNSS Experiment stations located in high-, mid- and low-latitude regions processed with RTKLIB v2.4.3 software. Then, the obtained cartesian coordinates were compared with the actual values. In addition, the effect of different satellite system combinations on RT-PPP was examined by calculating both the root mean square errors (RMSE) in the direction of the coordinate axes and 3D RMSE of each station. Generally, the RMSE in decimeter (dm) level were obtained. When the obtained RMSE are evaluated, the RT-PPP method has not yet provided the accuracy desired from geodetic applications. However, in the future, it is expected that both the receivers and antennas will support RT-PPP and with the improvement of broadcasted real-time corrections, it will provide the necessary accuracy for geodetic applications.

Keywords: MGEX, Multi-GNSS, PPP, RT-PPP, RTKLIB

uydularını yaparak bölgesel/global konum belirleme sistemlerini kurmuşlardır.

Günümüzde aktif olarak hizmet veren Uydularla Konum Belirleme Sistemleri (GNSS); GPS (ABD), GLONASS (Rusya), Galileo (Avrupa Birliği), BEIDOU/COMPASS (Çin), QZSS (Japonya) ve IRNSS/GAGAN (Hindistan) olarak sıralanabilir. Tüm bu sistemler bir arada kullanılarak gerçekleştirilen konum belirleme uygulamaları da Çoklu GNSS veya Multi-GNSS gözlemleriyle konum belirleme olarak tanımlanmaktadır. GNSS ile konum belirleme yöntemleri, mutlak konum belirleme ve bağıl (görel) konum belirleme olarak iki ana başlıkta incelenebilir. Mutlak konum belirlemede tek bir alıcı ile dört ya da daha fazla uydudan

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: bbilgen@ktun.edu.tr (B. Bilgen)

Geliş / Received: 15.09.2021 Kabul / Accepted: 14.10.2021 Yayımlanma / Published: 14.01.2022

doi: 10.28948/ngumuh.996018

kod/faz gözlemleri yapılarak alıcının kurulu olduğu noktanın koordinatları uzayda geriden kestirme esasına göre hesaplanmaktadır. Bağlı konum belirleme ise, en az iki alıcıdan biri koordinatı bilinen referans noktasına diğeri de koordinatı hesaplanacak olan noktaya kurularak en az 4 uydudan eş zamanlı kod/faz gözlemleri yapılarak koordinatı bilinmeyen noktanın koordinatının hesaplanmasına dayanmaktadır.

Mutlak konum belirleme yöntemlerinden biri olan Hassas Nokta Konumlama (PPP), 1997 yılında ilk defa Zumberge vd. [1] tarafından kod ve taşıyıcı faz gözlemleri birlikte kullanılarak tek GNSS alıcısıyla gerçekleştirilmiş bir yöntemdir. PPP, gerçek zamanlı (RT-PPP) ve ölçü sonrası değerlendirme (PP-PPP) olmak üzere iki şekilde uygulanmaktadır. PPP'de hem kod hem de taşıyıcı faz gözlemleri birlikte kullanılırken diğer mutlak konum belirleme yöntemlerinde sadece kod gözlemleri kullanılmaktadır. Ayrıca PPP'de hassas uydü yürünge/saat bilgileri de kullanılmaktadır. Bu yöntemde ölçü süresi ve kullanılan alıcının tek ya da çok frekanslı olması durumuna göre metre (m) ile santimetre (cm) mertebesinde konum doğruluğu elde edilebilmektedir [1-5].

Uluslararası GNSS Servisi (IGS) 2013 yılından itibaren GNSS kullanıcılarına gerçek zamanlı servis hizmeti sunmaya başlamıştır. Böylece kullanıcıların RT-PPP uygulamalarında kullanılan yayın efemerisi, GNSS uydü yürünge ve saat düzeltme verilerine erişimi sağlanmıştır. Bu sayede, geliştirilen özel yazılımlar kullanılarak RT-PPP yöntemiyle konum belirleme uygulamaları gerçekleştirilebilmektedir.

Günümüzde, RT-PPP yöntemi güncel araştırma konusu olarak dikkat çekmekte ve bu konuda pek çok araştırma yapılmaktadır [6-17]. Gerçekleştirilen çalışmalarda; RT-PPP yönteminin yakınsama süresi, konum doğruluğu ve hassasiyeti, kinematik PP-PPP ile kıyaslanması gibi konular araştırılmıştır. Bu çalışmada, bugüne kadar yapılan çalışmalardan farklı olarak, yüksek, orta ve alçak enlem bölgelerinde farklı uydü sistemi kombinasyonlarının (GPS, GPS+GLONASS, GPS+Galileo, GPS+BEIDOU, GPS+GLONASS+Galileo+BEIDOU) RT-PPP'ye etkisi RTKLIB v2.4.3 yazılımı ile araştırılmıştır. Bu kapsamda, jeomanyetik aktivitelerin GNSS gözlemleri üzerindeki bozucu etkisinin sonuçlara yansımaması amacıyla Kp, Dst ve F10.7 indeksleri incelenmiş ve jeomanyetik aktivitelerin olmadığı 30 ardışık gün belirlenmiştir. Farklı enlem bölgelerinde bulunan Uluslararası GNSS Servisi-Multi GNSS Experiment (IGS-MGEX) istasyonlarından KIR8, PADO, NKL8'nin bu ardışık günlere ait Alıcıdan Bağımsız Veri Değişim Formatı (RINEX) verileri RTKLIB v2.4.3 yazılımı ile çözümlenmiştir. Çözümlemede yayınlanan gerçek zamanlı yürünge/saat düzeltmeleri (CLK93) kullanılmıştır. Farklı uydü sistemi kombinasyonları ile off-line modda RT-PPP çözümü yapılarak elde edilen 30 günlük kartezyen koordinatlar gerçek değerlerle karşılaştırılmış ve koordinat eksenleri yönündeki karesel ortalama hataları (KOH) ve konum ortalama hataları belirlenmiştir.

2 Gerçek zamanlı PPP yöntemi ve RTKLIB yazılımı

IGS tarafından gerçek zamanlı hassas yürünge ve saat düzeltme veri akışlarının kullanıma sunulmasıyla,

kullanıcılar için tek alternatif gibi görünen ölçü sonrasındaki değerlendirme işlemi zorunluluk dışında artık sadece bir tercih olarak kullanılmaktadır. RT-PPP yönteminde tam sayı belirsizlik çözümünün yanı sıra uydü sayısı ve uydü geometrisi yöntemin doğruluğunu etkilemektedir. GPS uydularıyla birlikte GLONASS, Galileo, BEIDOU uydü saat ve yürünge düzeltmelerinin (CLK93) de Uzay Çalışmaları Ulusal Merkezi (CNES) tarafından yayınlanmasıyla, RT-PPP uygulamalarında konum doğruluğunu artırmak ve yakınsama süresini azaltmak amacıyla dört uydü sistemi birlikte değerlendirilebilmektedir. Her ne kadar sistemlerin birlikte kullanılmasının birçok avantajı olsa da sistemler arasındaki farklılıktan kaynaklanan problemler konum doğruluğunu olumsuz etkileyebilmektedir.

RTKLIB yazılımı açık kaynak kodlu (open-source and free software) bir GNSS veri işleme yazılımıdır. RTKLIB Tokyo Üniversitesi Deniz Bilimi ve Teknolojisi bölümü (Tokyo Univ. of Marine Science and Technology) tarafından geliştirilmiştir. Gerçek zamanlı ve ölçü sonrası değerlendirme şeklinde çeşitli GNSS uygulamalarını (statik, kinematik, DGNSS, PPP vb.) gerçekleştirebilmektedir. GPS, GLONASS, Galileo, QZSS, BEIDOU ve SBAS'a ait veriler RTKLIB yazılımında işlenebilmektedir. Ayrıca yazılım standart GNSS veri protokollerini (RINEX, NMEA, RTCM) desteklemektedir. Yazılımla ilgili ayrıntılı bilgi Takasu [18] tarafından verilmiştir.

3 GNSS gözlemlerini etkileyen jeomanyetik aktiviteler

Kp indeksi, Dst indeksi, güneş patlaması ve güneş akısı değerleri iyonosferdeki değişimlerin büyüklüğünü yansıtan kriterlerdir. GNSS veri sonuçlarının yorumlanmasında bu kriterler çok önemlidir [19-22].

Kp indeksi, güneş parçacıklarının radyasyonunu manyetik etkileriyle ölçmek için tasarlanmıştır. 1932'den beri, Uluslararası Jeomanyetizma ve Havacılık Derneği (IAGA) bünyesinde faaliyet gösteren Uluslararası Jeomanyetik İndeksler Servisi (ISGI) gibi kuruluşlar tarafından üç saatlik aralıklarla üretilmektedir [23]. Kullanılan veriler dünyanın orta enlem bölgesinde yer alan 13 istasyondan elde edilmektedir [19]. Manyetik alanın etkilerindeki farklılıklara göre Kp indeksi 0-9 arasında değerler almaktadır [19, 24-25].

Dst, iyonosfer tabakasındaki değişiklikleri, manyetik fırtınaları ve derecelerini gösteren bir indekstir [19]. Dünya çapında 4 farklı gözlemeviden 1 saatlik zaman aralığında elde edilmektedir (<http://wdc.kugi.kyotou.ac.jp/dstdir/dst2/onDstindex.html>). Kp indeksi ve Dst indeksinin manyetik fırtına dereceleri Tablo 1'de gösterilmiştir. Güneş Akısı Kriteri (F10.7) ise iyonosfer tabakasındaki değişikliklerin gözlemlenmesinde dalga boyu 10.7 cm olan bir dalga vasıtasıyla güneş akısı ölçümleri ile belirlenebilmektedir.

Tablo 1. Kp ve Dst endekslerinin manyetik fırtına dereceleri

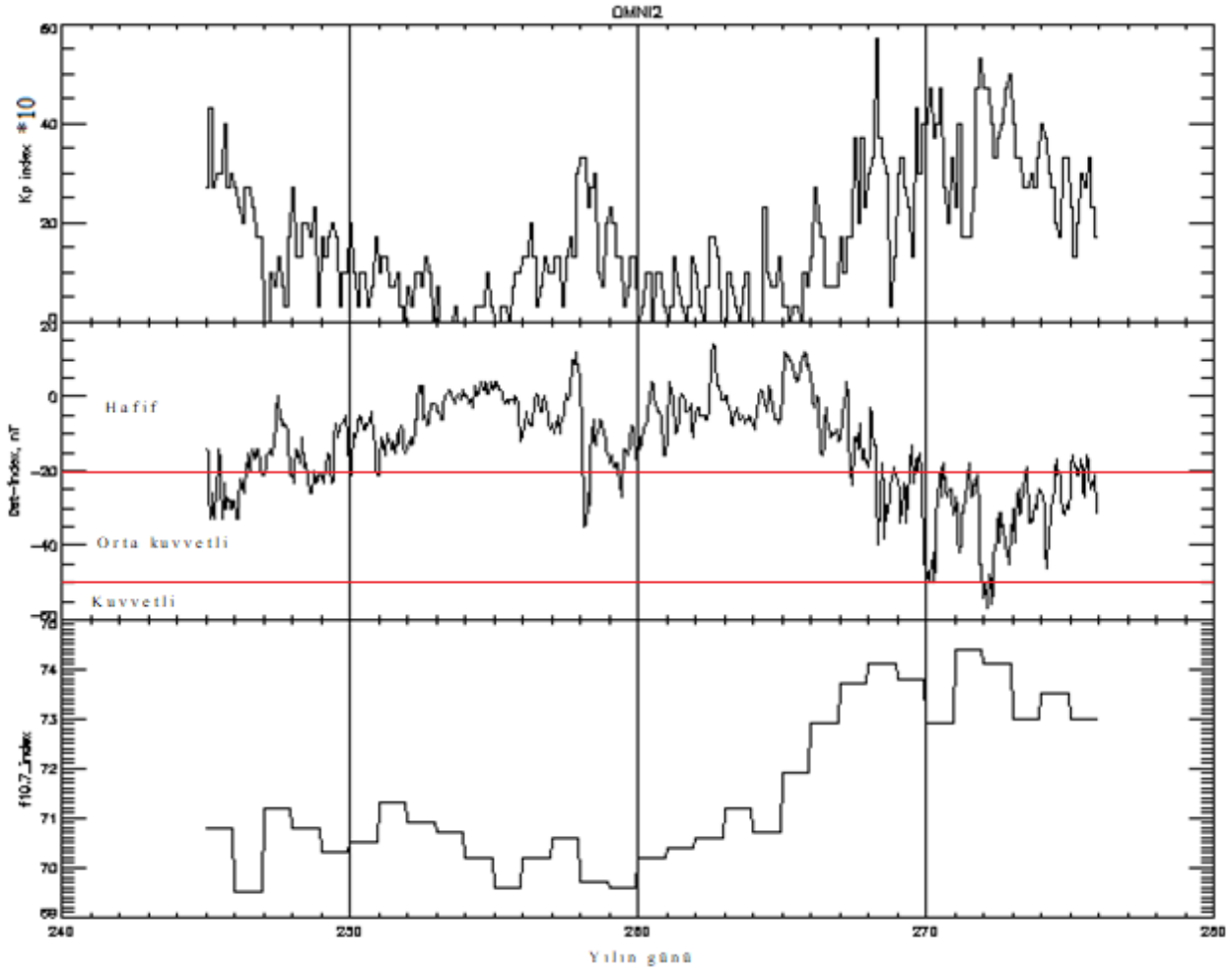
Manyetik fırtına dereceleri	Kp indeksi	Dst indeksi
G1 Hafif	5	Dst > -20
G2 Orta kuvvetli	6	-20 > Dst > -50
G3 Kuvvetli	7	-50 > Dst > -100
G4 Çok kuvvetli	8	-100 > Dst > -300
G5 Aşırı	9	-300 > Dst

4 Uygulama

Farklı uydu sistemi kombinasyonlarının RT-PPP'ye etkisinin araştırılmasında, jeomanyetik aktivitelerin GNSS gözlemleri üzerindeki bozucu etkisinin sonuçlara yansımaması amacıyla Kp, Dst ve F10.7 indeksleri incelenmiş ve jeomanyetik aktivitelerin hafif ve kısmen orta seviyede olduğu 30 ardışık gün (1-30 Eylül 2020) belirlenmiştir (Bk. Şekil 1). Kp, Dst ve F10.7 indeksleri <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html> web adresinden temin edilmiştir. Yüksek enlem bölgesinde KIR8, orta enlem bölgesinde PADO ve alçak enlem bölgesindeki NKLG istasyonlarının RINEX verileri temin edilmiş, CNES tarafından yayınlanan uydu saat ve yörünge düzeltmeleri (CLK93) kaydedilmiştir (Bk. Tablo 2).

Şekil 1, Kp indeksinin 0 nt ile 5.7 nt, Dst indeksinin -57 nt ile 14 nt ve F10.7 indeksinin 69.5 nt ile 74.4 nt arasında değiştiğini göstermektedir. Tablo 1 ve Şekil 1 birlikte değerlendirildiğinde, Kp ve Dst indekslerinin hafif ve kısmen orta seviyede olduğu, F10.7 indeksinin ise çok büyük bir dalgalanma göstermediği görülmektedir.

Kullanılan IGS-MGEX istasyonlarına ait veriler her bir gün için GPS (G), GPS+GLONASS (G+R), GPS+Galileo (G+E), GPS+BEIDOU (G+C), GPS+GLONASS+Galileo+BEIDOU (G+R+E+C) olmak üzere 5 farklı uydu kombinasyonu kullanılarak RTKLIB v2.4.3 yazılımında daha önce kaydedilen CLK93 verisi kullanılarak RT-PPP yöntemiyle off-line modda çözülmüştür.



Şekil 1. Ölçü günlerine ait Kp, Dst ve F10.7 indeksleri

Tablo 2. Kullanılan IGS-MGEX istasyonları

Bölge	Nokta Adı	Ülke	Enlem	Boylam	h (m)
Yüksek enlem	KIR8	İsveç	67° 52' 39.16''	21° 03' 36.66''	498.126
Orta enlem	PADO	İtalya	45° 24' 40.15''	11° 53' 45.82''	64.699
Alçak enlem	NKLG	Gabon	00° 21' 14.07''	09° 40' 19.65''	31.501

Tablo 3. IGS-MGEX istasyonlarının 2010.00 epoğunda koordinat ve hızları

İstasyon	X (m)	Y (m)	Z (m)	V _x (m/yıl)	V _y (m/yıl)	V _z (m/yıl)
KIR8	2248127.0657	865685.6020	5886424.5526	-0.01681	0.01288	0.00453
PADO	4388881.9292	924567.5481	4519588.7741	-0.01620	0.01830	0.01200
NKLG	6287385.7445	1071574.6406	39133.0007	-0.00416	0.02192	0.01934

RTKLIB yazılımı RINEX verisi içerisinde yer alan her bir epok için koordinat çözümü gerçekleştirdiğinden, günlük çözümlerin içerisindeki aykırı gözlemler 3 sigma (3σ) kuralına göre ayıklandıktan sonra ortalaması alınarak her bir güne ilişkin nokta koordinatları elde edilmiştir. Noktaların 2010.00 epoğundaki gerçek koordinatları ve yıllık hız bilgileri (<http://ftp.aiub.unibe.ch/BSWUSER52/STA/>) web sitesinden temin edilmiştir (Bk. Tablo 3).

Gerçek koordinatlar ölçü epoğuna kaydırılarak, RTKLIB yazılımından hesaplanan günlük koordinatlarla karşılaştırması yapılmıştır. Bu amaçla her bir gün için gerçek hatalar;

$$\varepsilon_{X_t} = X_t - X_G, \quad \varepsilon_{Y_t} = Y_t - Y_G, \quad \varepsilon_{Z_t} = Z_t - Z_G \quad (1)$$

eşitlikleri ile hesaplanmıştır. Burada, altsimge t yılın gününü, altsimge G ise ölçü epoğundaki gerçek koordinatları göstermektedir. Denklem (1)'den hesaplanan gerçek hatalar kullanılarak her bir uydu sistemi kombinasyonu için KOH;

$$m_x = \pm \sqrt{\frac{[\varepsilon_{X_t} \varepsilon_{X_t}]}{n}}$$

$$m_y = \pm \sqrt{\frac{[\varepsilon_{Y_t} \varepsilon_{Y_t}]}{n}} \quad (2)$$

$$m_z = \pm \sqrt{\frac{[\varepsilon_{Z_t} \varepsilon_{Z_t}]}{n}}$$

eşitlikleri kullanılarak hesaplanmıştır. Denklem (2)'de n gün sayısını göstermektedir. Bu hesaplamalar her üç istasyonda da 5 farklı uydu kombinasyonu için gerçekleştirilmiştir. İstasyonlara ait KOH Tablo 4, 5 ve 6'da verilmiştir.

Tablo 4. KIR8 istasyonunda elde edilen KOH

Uydu Sistemi	m_x (cm)	m_y (cm)	m_z (cm)
G	±10.3	±5.4	±1.9
G+R	±15.4	±6.7	±2.9
G+E	±8.9	±3.4	±4.4
G+C	±27.3	±11.6	±1.6
G+R+E+C	±17.9	±9.3	±2.2

Tablo 4, yüksek enlem bölgesinde bulunan KIR8 istasyonuna ait KOH'u göstermektedir. KIR8 istasyonunda koordinat bileşenleri yönündeki KOH ±1.6 cm ile ±27.3 cm arasında değişmektedir.

Tablo 5. PADO istasyonunda elde edilen KOH

Uydu Sistemi	m_x (cm)	m_y (cm)	m_z (cm)
G	±15.7	±15.1	±2.4
G+R	±18.6	±10.6	±2.7
G+E	±9.3	±15.2	±3.0
G+C	±53.9	±19.8	±2.6
G+R+E+C	±29.3	±9.8	±3.8

Tablo 5'te orta enlem bölgesindeki PADO istasyonuna ait KOH görülmektedir. PADO istasyonunda koordinat bileşenleri yönündeki KOH ±2.4 cm ile ±53.9 cm arasında değişmektedir.

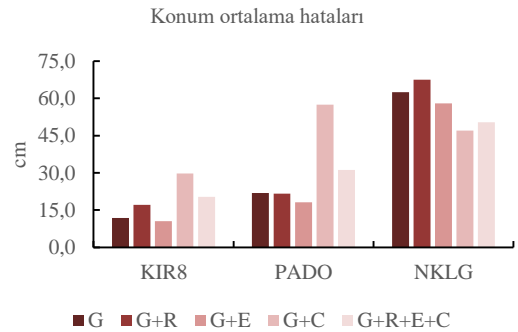
Tablo 6. NKLG noktasında elde edilen KOH

Uydu Sistemi	m_x (cm)	m_y (cm)	m_z (cm)
G	±19.3	±59.3	±4.3
G+R	±25.8	±62.3	±4.0
G+E	±12.5	±56.5	±2.6
G+C	±20.8	±41.9	±3.9
G+R+E+C	±16.5	±47.5	±2.6

Tablo 6'da alçak enlem bölgesindeki NKLG istasyonuna ait KOH sunulmuştur. NKLG istasyonunda koordinat bileşenleri yönündeki KOH ±2.6 cm ile ±62.3 cm arasında değişmektedir. Farklı enlem bölgelerinde Z eksen yönündeki KOH'un diğer eksenler yönündeki (X, Y) KOH'tan daha iyi olduğu görülmektedir. Farklı enlem bölgelerinde bulunan noktalara ilişkin konum ortalama hataları;

$$m_p = \sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2} \quad (3)$$

Denklem (3) kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan konum ortalama hataları Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Konum ortalama hataları

Tablo 7. Aynı uydu sistemi kombinasyonlarının karşılaştırılması

Uydu Sistemi	G		G+R		G+E		G+C		G+R+E+C	
	KIR8	PADO	KIR8	PADO	KIR8	PADO	KIR8	PADO	KIR8	PADO
PADO	3.459*	-	1.603	-	2.965*	-	3.744*	-	2.353*	-
NKLG	28.140*	8.136*	15.709*	9.800*	30.466*	10.276*	2.497*	1.499	6.157*	2.616*

* anlamlı test büyüklükleri

Yüksek enlem bölgesi için en iyi konum doğruluğu G+E uydu kombinasyonunda elde edilmiş ve bunu sırasıyla G, G+R, G+R+E+C, G+C kombinasyonları izlemiştir. Orta enlem bölgesi için en iyi konum doğruluğu G+E uydu kombinasyonunda elde edilmiş ve bunu sırasıyla G+R, G, G+R+E+C, G+C kombinasyonları izlemiştir. Alçak enlem bölgesi için en iyi konum doğruluğu G+C uydu kombinasyonunda elde edilmiş ve bunu sırasıyla G+R+E+C, G+E, G, G+R kombinasyonları izlemiştir.

Normal dağılımlı iki ölçü grubunun varyanslarının istatistiksel olarak uyumlu olup olmadığının test edilmesinde Fisher dağılımı kullanıldığı için, farklı enlem bölgelerinde elde edilen konum ortalama hatalarının istatistiksel olarak birbirleri ile karşılaştırılmasında F-testinden yararlanılmıştır. Karşılaştırmada, test büyüklüğü;

$$F_{test} = \frac{m_i^2}{m_j^2} \quad (4)$$

eşitliği ile hesaplanmıştır [26]. Test büyüklüğünün hesaplanmasında, büyük olan varyans değeri paya yazılmalıdır. Denklem (4)'te, m_i ve m_j : i ve j ölçü gruplarının varyanslarını göstermektedir. f_i , f_j ölçü gruplarının serbestlik dereceleri ve α yanılma ihtimali olmak üzere, F_{test} değeri $F_{tablo} = F_{f_i, f_j, 1-\alpha}$ değeri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalarda; $F_{tablo} = F_{30, 30, 0.95} = 1.841$ olarak alınmıştır. Farklı enlem bölgelerinde aynı uydu sistemi kombinasyonlarının birbirleri ile karşılaştırılmasında test büyüklükleri hesaplanmış ve Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7, yüksek enlem ve orta enlem bölgesinde G ile orta enlem ve alçak enlem bölgesinde G+C haricinde, farklı enlem bölgelerinde aynı uydu sistemleri için hesaplanan konum ortalama hatalarının birbirleriyle uyumlu olmadığını göstermektedir. Aynı uydu sistemi kombinasyonlarından farklı enlem bölgelerinde elde edilen sonuçlar istatistiksel olarak eşit değildir. Farklı enlem bölgelerinde aynı uydu sistemi kombinasyonları karşılaştırıldıktan sonra, aynı enlem bölgelerinde farklı uydu sistemi kombinasyonlarının istatistiksel olarak karşılaştırılması yapılmış ve test büyüklükleri Tablo 8, 9 ve 10'da sunulmuştur. Tablolardaki * işaretiyle anlamlı test büyüklükleri gösterilmiştir.

Tablo 8. Yüksek enlem bölgesinde (KIR8) farklı uydu sistemi kombinasyonlarının karşılaştırılması

Uydu Sistemi	G	G+R	G+E	G+C	G+R+E+C
G	-	2.092*	1.261	6.355*	2.965*
G+R		-	2.637*	3.038*	1.418
G+E			-	8.012*	3.739*
G+C		simetrik		-	2.143*
G+R+E+C					-

Tablo 8'de, G ile G+E'nin ve G+R ile G+R+E+C'nin uyumlu olduğu, diğer uydu sistemi kombinasyonları ile hesaplanan konum ortalama hatalarının yüksek enlem bölgesinde istatistiksel olarak eşit olmadığı görülmektedir.

Tablo 9. Orta enlem bölgesinde (PADO) farklı uydu sistemi kombinasyonlarının karşılaştırılması

Uydu Sistemi	G	G+R	G+E	G+C	G+R+E+C
G	-	1.031	1.471	6.880*	2.018*
G+R		-	1.426	7.096*	2.081*
G+E			-	10.119*	2.967*
G+C		simetrik		-	3.410*
G+R+E+C					-

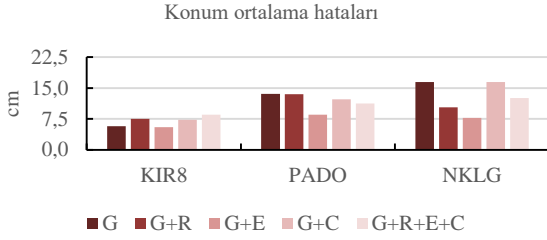
Tablo 9 incelendiğinde, orta enlem bölgesinde C uydu sisteminin konumlamaya dahil edildiği durumlarda hesaplanan konum ortalama hatalarının istatistiksel olarak eşit olmadığı, G ile G+R ve G+E'nin ayrıca G+R ile G+E'nin uyumlu olduğu görülmektedir.

Tablo 10. Alçak enlem bölgesinde (NKLG) farklı uydu sistemi kombinasyonlarının karşılaştırılması

Uydu Sistemi	G	G+R	G+E	G+C	G+R+E+C
G	-	1.168	1.165	1.773	1.541
G+R		-	1.360	2.071*	1.800
G+E			-	1.523	1.323
G+C		simetrik		-	1.151
G+R+E+C					-

Tablo 10, alçak enlem bölgesinde G+E ve G+C ile hesaplanan konum ortalama hataları haricinde, tüm uydu sistemleri ile elde edilen konum ortalama hatalarının istatistiksel olarak uyumlu olduğunu göstermektedir.

Kartezyen koordinatlara göre hesaplanan KOH nokta hızlarındaki hataları da içerdiğinden, bu hataları elemine etmek için günlük olarak elde edilen koordinatların tekrar edilebilirliği incelenmiştir. Bu amaçla, 30 günlük değerlerin ortalamasından sapmalar (STD) hesaplanmış ve **Şekil 3**'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Konum ortalama hataları

Şekil 3 incelendiğinde, hız bileşenlerine ait hatalar elemine edildikten sonra hesaplanan konum ortalama hatalarının genel olarak ± 15 cm'nin altında kaldığı görülmektedir. Bu durum da günlük olarak hesaplanan koordinatların daha tutarlı olarak belirlenebildiğini göstermektedir.

5 Sonuç ve öneriler

Günümüzde IGS tarafından gerçek zamanlı yörünge/saat bilgilerinin yayınlanmaya başlamasıyla birlikte bu amaç için geliştirilen yazılımlar kullanılarak RT-PPP yöntemiyle konum belirleme uygulamaları gerçekleştirilebilmektedir. Günümüz itibarıyla dört farklı küresel konum belirleme sisteminin tam kapasiteyle kullanımda olması ve bunlara ilişkin hassas yörünge ve saat düzeltmelerinin kullanıcılar sunulması RT-PPP uygulamalarında Multi-GNSS gözlemlerinin etkisinin araştırılması ilgi çekici konulardan biri haline getirmiştir. Bu çalışmada; yüksek, orta ve alçak enlem bölgesinde seçilen üç adet IGS-MGEX istasyonu kullanılarak farklı uydu sistemi kombinasyonlarının RT-PPP'ye etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda, GNSS ölçüleri üzerinde bozucu etkiye sahip jeomanyetik aktiviteelerin fazla olmadığı günler seçilmiştir. Seçilen günlere ait RINEX verileri RTKLIB v2.4.3 yazılımında RT-PPP yöntemi ile beş farklı uydu kombinasyonu kullanılarak off-line modda çözümlenmiştir. Elde edilen koordinatlar gerçek koordinatlarla karşılaştırılmış ve konum ortalama hataları hesaplanmıştır.

Konum ortalama hataları dikkate alındığında; BEIDOU'nun GPS ve diğer uydular üzerinde yüksek ve orta enlemlerde bozucu bir etkiye sahip olduğu görülmüş, fakat GPS uydularına Galileo uyduları eklenince her üç enlem bölgesinde de daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. GPS uydularına GLONASS uyduları eklenince yüksek ve alçak enlem bölgesinde bozucu etkiler ortaya çıkmış, orta enlem bölgesinde ise sonuçlar iyileşmiştir. 4 farklı uydu sisteminin birlikte kullanılması durumunda yüksek ve orta enlem

bölgelerinde G+R ve G+E ikili kombinasyonlarına göre daha kötü sonuçlar verdiği görülmektedir. Ancak alçak enlem bölgesinde ise tüm uydu sistemlerinin bir arada kullanılması G+R ve G+E ikili uydu kombinasyonlarından daha iyi sonuçlar vermiştir. Bunlara ilaveten, farklı enlem bölgeleri bakımından en iyi sonuçlar yüksek enlem bölgesinde elde edilmiş ve bunu orta enlem bölgesi takip etmiştir. Yüksek ve orta enlem bölgelerinde en iyi sonuçlar G+E uydu kombinasyonunda elde edilirken, Alçak enlem bölgesinde ise G+C uydu kombinasyonunda elde edilmiştir.

Farklı enlem bölgelerinde elde edilen sonuçlar istatistiksel olarak değerlendirildiğinde, aynı uydu sistemi kombinasyonlarında eşit doğruluk elde edilememektedir. Yani, enlem bölgelerinin değişmesi elde edilen konum ortalama hatalarını anlamlı ölçüde değiştirmektedir. Aynı enlem bölgelerinde farklı uydu sistemi kombinasyonlarının istatistiksel olarak karşılaştırılmasında, yüksek enlem bölgesinden alçak enlem bölgesine doğru inildikçe konum ortalama hatalarının birbirleri ile uyumlu olma oranlarının arttığı görülmüştür. Dolayısıyla, alçak enlem bölgelerinde tüm uydu sistemi kombinasyonlarında benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Gerçekleştirilen çalışma sonucunda; yüksek enlem bölgesindeki G ve G+E kombinasyonları haricinde çoğunlukla dm mertebesinde hatalar elde edilmiştir. Bu durumda, RT-PPP yönteminin jeodezik uygulamalardan beklenen doğruluğu henüz sağlayamadığı, fakat gelecekte hem alıcı hem de antenlerin RT-PPP'yi destekler hâle gelmesi ve yayınlanan gerçek zamanlı düzeltmelerin de iyileştirilmesiyle jeodezik uygulamalar için gerekli doğruluğu sağlayabileceği düşünülmektedir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %10

Kaynaklar

- [1] J. F. Zumberge, M. B. Hefflin, D. C. Jefferson, M. M. Watkins and F. H. Webb, Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, Journal of Geophysical Research, 102 (B3), 5005, 1997.
- [2] J. Kouba and P. Héroux, Precise point positioning using IGS orbit and clock products. GPS Solutions, 5 (2), 12–28, 2001. <https://doi.org/10.1007/PL00012883>.
- [3] Y. Gao and K. Chen, Performance analysis of precise point positioning using Real-Time orbit and clock products, Journal of Global Positioning Systems, 3 (1-2), 95-100, 2004.
- [4] J. Kouba, A guide to using international GNSS service (IGS) products. https://www.igs.org/wp-content/uploads/2019/08/UsingIGSProductsVer21_cor.pdf, Accessed 10 September 2021.
- [5] M. E. Elsobeiey, An improved model for precise point positioning with modernized global positioning system, Master Thesis, Zagazig University, Egypt, 2012.
- [6] J. Chen, H. Li, W. Wu, Y. Zhang, J. Wang and C. Hu, Performance of Real-Time precise point positioning,

- Marine Geodesy, 36 (1), 98-108, 2013. <https://doi.org/10.1080/01490419.2012.699503>.
- [7] B. Erdoğan, F. Karlıtepe ve T. Öcalan, Farklı IGS kombine yörünge/saat ürünleri (Clk10&Clk11) kullanarak gerçek zamanlı PPP (RT-PPP) tekniği performansının araştırılması, 8. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, İstanbul, 2016.
- [8] N. Abdi, A. A. Ardalan, R. Karimi and M. H. Rezvani, Performance assessment of Multi-GNSS Real-Time PPP over Iran, *Advances in Space Research*, 59, 2870-2879, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.03.024>.
- [9] B. Erdoğan, F. Karlıtepe ve T. Öcalan, GPS kinematik PPP'nin gerçek zamanlı PPP (RT-PPP) çözümleri ile karşılaştırılması üzerine bir çalışma, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 16. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara, 2017.
- [10] F. Karlıtepe, Gerçek zamanlı hassas nokta konumlama (RT-PPP) tekniği ile karşılaştırmalı deneysel çözümler, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2017.
- [11] N. Nadarajah, A. Khodabandeh, K. Wang, M. Choudhury and P. J. G. Teunissen, Multi-GNSS PPP-RTK: From large- to small-scale networks, *Sensors*, 18 (4) 1078, 2018. <https://doi.org/10.3390/s18041078>.
- [12] M. Turgut, Gerçek zamanlı hassas nokta konumlama (RT-PPP) yönteminin performansının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2019.
- [13] L. Wang, Z. Li, M. Ge, F. Neitzel, Z. Wang and H. Yuan, Validation and assessment of Multi-GNSS Real-Time precise point positioning in simulated kinematic mode using IGS Real-Time service, *Remote Sensing*, 10 (2), 337, 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10020337>.
- [14] S. Xin, X. Li, J. Geng, E. Jiang and Q. Wen, The implementation of multi-GNSS real-time precise point positioning service system: GPS/GLONASS, 2017 Forum on Cooperative Positioning and Service (CPGPS), Harbin, 2017.
- [15] S. Alçay, Gerçek zamanlı hassas nokta konumlama (RT-PPP) yönteminin konum belirleme performansının doğruluk ve hassasiyet bakımından incelenmesi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8 (1), 121-133, 2019. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.516842>.
- [16] M. Turgut ve S. Alçay, Gerçek zamanlı hassas nokta konumlama (RT-PPP) yönteminin konumlama ve zenit troposferik gecikme (ZTD) bakımından karşılaştırmalı analizi, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 17. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, Ankara, 2019.
- [17] S. Alçay ve Ö. F. Atiz, Farklı yazılımlar kullanılarak gerçek zamanlı hassas nokta konum belirleme (RT-PPP) yönteminin performansının incelenmesi, *Geomatik Dergisi*, 6 (1), 77-83, 2021. <https://doi.org/10.29128/geomatik.687709>.
- [18] Takasu, T. 2013, RTKLIB 2.4.2 Manual, http://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.2.pdf, Accessed 10 September 2021.
- [19] N. Arslan, GPS ile iyonosfer toplam elektron yoğunluğu değişimlerinin koordinatlara etkilerinin araştırılması, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2004.
- [20] N. Jakowski, A. Wehrenpfening, S. Heise, S. Schluter, and T. Noack, Space weather effects in the ionosphere and their impact on positioning, *Space Weather Workshop: Looking Towards a Future European Space Weather Programme*, Noordwijk, Netherlands, 17-19 December 2001.
- [21] P. J. Stewart, and R. B. Langley, Ionospheric modelling for WADGPS at northern latitudes. *Proceedings of ION-GPS 98, The 11. International Technical Meeting*, 1998.
- [22] S. İnyurt, Investigation of ionospheric variations during magnetic storm over Turkey, *Geomagnetism and Aeronomy*, 60, 131-135, 2020. <https://dx.doi.org/10.1134/S001679322001012011>
- [23] S. İnyurt and R. M. Ghaffari, Regional application of ANFIS in ionosphere time series prediction at severe solar activity period, *Acta Astronautica*, 179, 450-461, 2021.
- [24] T. Arslan, M. Shah, S. İnyurt, M. A. Shah, and L. Liu, Comparison of TEC from IRI-2016 and GPS during the low solar activity over Turkey, *Astrophysics and Space Science*, 365 (11), 2020.
- [25] M. Menvielle, The geomagnetic indices: Derivation, meaning and availability, *Space Weather Workshop: Looking Towards a Future European Space Weather Programme*, Noordwijk, Netherlands, 2001.
- [26] C.D. Ghilani, and P.R. Wolf, *Adjustment computations: spatial data analysis*. Wiley, USA, 2006.





Investigation of transportation investments in Bursa in terms of urban-environment-community relations

Bursa'daki ulaştırma yatırımlarının kent-çevre-toplum ilişkileri açısından incelenmesi

Ahmet Ünal^{1,*} , Ahmet Tortum² 

¹ Erzurum Technical University, Engineering and Architecture Faculty, Civil Engineering Department, 25050, Erzurum, Turkey

² Atatürk University, Engineering Faculty, Civil Engineering Department, 25240, Erzurum, Turkey

Abstract

Distribution of public investments by sectors is an important indicator in understanding the economic conditions of countries. While developing countries make intensive spending in the transportation, health and construction sectors; developed countries, on the other hand, work in the fields of open industry, software, space and aviation. In Turkey, which is among the developing countries in areas such as defense and military industry mega investments made significant investments in transportation is done. In the case of Bursa is Turkey's 4th largest city is also one of the most important cities in the automotive sector. Due to this location of Bursa, it has been one of the provinces affected by mega projects (Osman Gazi Bridge, Istanbul-Bursa-İzmir highway, etc.) made in the field of transportation in recent years. Apart from these projects, significant transportation investments have been made in Bursa in the city center in recent years. Within the scope of this study, transportation investments made in Bursa province in recent years have been examined. The urban-environment-community relationship has been investigated by investigating the positive and negative sides of these projects.

Keywords: Bursa, Transportation investments, Transportation sector, Mega projects

1 Introduction

One of the most important parameters in the development indicators of countries is the distribution of rates in public investments by sectors. While investments in technology, space and aviation fields in developed countries have an important share; investments in construction, transportation and health sectors are given priority in developing and undeveloped countries. Investments in technology in the third quarter of 2019 was around 55 billion dollars in the United States and in Europe \$ 9 billion in Turkey stood at 36 million dollars [1]. On the other hand, when we examine the construction and transportation investments of the countries, when the budgets allocated to these areas are proportioned according to the annual income, the ranking of the countries shows the opposite direction. In short, while the

Özet

Kamu yatırımlarının sektörlere göre dağılımı, ülkelerin ekonomik durumlarının anlaşılmasında önemli bir göstergedir. Gelişmekte olan ülkeler ulaşım, sağlık ve inşaat sektörlerinde yoğun harcamalar yaparken; gelişmiş ülkeler ise sanayi, yazılım, uzay ve havacılık alanlarında çalışmaktadır. Gelişmekte olan ülkeler arasında yer alan Türkiye'de savunma ve askeri sanayi gibi alanlarda mega yatırımlar yapılıyorken ulaştırma alanında da önemli yatırımlar yapılmaktadır. Bursa Türkiye'nin 4. büyük şehri olmasının yanında otomotiv sektörünün de en önemli şehirlerinden biridir. Bursa'nın bu konumundan dolayı son yıllarda ulaşım alanında yapılan mega projelerden (Osman Gazi Köprüsü, İstanbul-Bursa-İzmir karayolu vb.) etkilenen illerden biri olmuştur. Bu projelerin dışında Bursa'da son yıllarda şehir merkezinde de önemli ulaşım yatırımları yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında Bursa ilinde son yıllarda yapılan ulaşım yatırımları incelenmiştir. Bu projelerin olumlu ve olumsuz yanları incelenerek kent-çevre-toplum ilişkisi araştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Bursa, Ulaştırma yatırımları, Ulaştırma sektörü, Mega projeler

appropriations allocated to fields such as technology, space and aviation in developed countries have a large share in annual budgets; in developing countries, the appropriations allocated for construction, health, and transportation have a larger share within the annual budget. Turkey is OECD and the G-20 countries, although there is not yet completed the development literally but transport in recent years, health care, besides it has accelerated its efforts in the area of infrastructure work in the defense and arms industry, as do other developed countries are located in important activities.

When we examine the transportation investments in Turkey appears to be especially great strides in the last 20 years. Some of the investments such as Marmaray, Yavuz Sultan Selim Bridge, Istanbul New Airport, 1915 Çanakkale Bridge, Osman Gazi Bridge, which are mentioned as

* Corresponding author, e-mail: ahmet.unal@erzurum.edu.tr (A. Ünal)

Geliş / Received: 30.12.2020 Kabul / Accepted: 09.09.2021 Yayınlanma / Published: 14.01.2022

doi: 10.28948/ngumuh.850147

national scale mega investments, have been completed and some of them have come to the stage of completion. Apart from these major investments in the country experienced a great leap forward in the last 20 years, divided highway construction and the total length of divided highways in Turkey as of 01.01.2020 was 25 705 km [2]. In addition to these transportation investments in the national scale, many studies related to urban public transportation and transportation activities were carried out locally. These; as well as works such as tram and metro, studies on maritime public transportation have been carried out, especially through organizations such as Bursa Sea Bus Operations (BUDO) and Istanbul Sea Bus Operations (IDO) in Bursa and Istanbul.

This study examines the transportation investments made in the case of Turkey's 4th largest city of Bursa and this work is evaluated in terms of urban-environment-society relations. In addition to the completed studies, it was tried to express the positive and negative aspects of the future planned studies by evaluating them. With this study, it is aimed to contribute to the correction of errors in the transportation investments currently made in Bursa province. In addition, the study aims to act as a bridge between the transportation investments made in the past, ongoing and planned in the future. Thus, this article will serve as a projection for future investments.

2 Literature review

Managers are required to distribute investments between regions and cities in a balanced way. In order to reveal this relationship and to provide a detailed projection of the investments made, studies are carried out especially by the relevant ministries and scientists.

Kalaycıoğlu [3] examined transport relations in different geographical levels for regional transportation planning in Turkey. In the study, he stated that there is a need to develop a transportation system formed by relations and priorities at different geographical levels in order to plan regional transportation investments outside the urban transportation infrastructure.

Bilgiç [4] emphasized the importance of the decision-making process in the evaluation of transport investment in Turkey. He stated in his study that the organizational structure of an investment system for transportation investments and the decision-making process should be based on scientific principles and should not contradict the principles of transparency.

Karaman and Altan [5] evaluated transportation investments financially. In their studies, they analyzed the indicators about the economic conditions of countries such as transportation investments, welfare level and transportation investments in developed economies.

Bilgiçler [6] multi-criteria for the evaluation of transport investment in Turkey has been associated with the development of a method. In his study, he determined one of the multi-criteria evaluation methods as the cost of money cost. The study also proposed 18 criteria for other effects ranging from time values to compliance with transport plans. Durmus [7] transportation investment and economic growth

relationship has worked on Turkey's economy.

Oytun [8] examined the impact of transportation networks on economic integrations and the Turkish world dimension. He studied the effects of transport infrastructures and networks on welfare levels. In addition, the relationship between welfare systems and economic integrations has been examined.

Sobieralski [9] stated between 1990 and 2018, he studied the effects of transportation investments on employment in the field of statistics in 11 metropolitan cities in the USA. In his study, he concluded that highway infrastructure investments have the greatest positive effect on employment in general. However, he stated that attention should be paid to other social externalities related to transportation.

Jiang et al. [10] discussed the two-way relationship between multimodal transport investment and economic development.

Rizelioglu [11] carried out the study of modeling the Bursa light rail system line as a metrobus. In his study, the status of the existing Light Rail System (HRS) in Bursa was analyzed with PTV VISSIM, which is one of the important traffic simulation programs. Then, a comparison was made with other public transportation (Metrobus) that could be substituted, taking into account some performance criteria such as capacity and comfort.

Şimit et al. [12] analyzed Turkey's first domestic tram silkworm. In the study, the silkworm line was evaluated with the SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) analysis method.

Rizelioglu and Arslan [13] assessed the existing Bursa light rail transportation system.

3 Study area

Bursa has always been one of the important cities of the states to which it is connected in the historical process. The fact that Bursa is on the route of the road named as Silk Road has been a factor in the fact that it is one of the important cities in the industry especially in the textile sector (Figure 1) [14]. During the foundation period of the Ottoman Empire, Bursa became the capital and due to this feature, there are many historical buildings in the city, which is especially effective for tourists to come to the city at the point of cultural tourism. In the Republican period, many textile factories were established and made a significant contribution to the national economy in terms of employment and economic activities.



Figure 1. The location of Bursa [14]

When we evaluate the location of Bursa in the country, it is located in the middle of the Istanbul-Izmir highway and forms one leg of the Istanbul-Bursa-Izmir highway connecting these two important cities. In addition, it is one of the compulsory waypoints to go to our cities, such as Antalya and Mugla, which are among the important tourism cities of the country. With all these aspects, Bursa city has an important place in the country's economy, investments and employment resources.

4 Transportation investments in Bursa province

Especially, the investments made on transportation activities in Bursa, whose population has increased rapidly as a result of human migration from other cities in the last 20 years, draw attention. Along with the projects on a national scale, which concern other cities, investments made especially in public transportation in the city attract attention. The costs of the projects directly and indirectly related to the province of Bursa are shown in Table 1.

Table 1. Project costs

The Project Name	Cost	Construction Year
Osmangazi Bridge	1.2 billion Dollars [15]	2015
Istanbul-Bursa-Izmir Highways	11 billion Dollars [16]	2019
T-1 Tram Line	8,5 million Euro [17]	2013
T-2 Tram Line	30 million Dollars [18]	continues
T-3 Tram Line	3,5 million Euro [17]	2011
High Speed Train	3 billion TL [19]	continues

Undoubtedly, capacity is an important factor in the choice of public transportation vehicles. When the capacity of public transportation types is examined, it is seen that rail system transportation is more advantageous than other public transportation types in terms of capacity (Table 2).

Table 2. Public transport types capacity values [20]

Passenger Transport System	Passenger Capacity (passenger/hour/direction)
Commuter Train	40.000-60.000
Light Rail System	15.000-22.000
Articulated Bus (on private roads)	12.000-20.000
Articulated Bus	10.000-15.000
Bus	8.000-12.000
Minibus	6.000-10.000
Automobile	2.000-5.000

Below, the most important of the transportation investments made in Bursa in recent years are examined; positive and negative aspects of these investments within the framework of the urban-environment-community relationship are explained.

4.1 Light rail system

The construction of the light rail system started on 08.07.1998 and the first passenger was transported on 23.04.2002 [21]. This line consists of 2 different routes, two routes starting from the Small Industry and Organized Industrial Zones joined at the Acemler and then ended at the Şhreküstü station [22]. Over time, the first and third stages followed. After this stage, the rail system line was extended

from Şhreküstü to Arabayatığı, and then the eastern stage was completed by extending from Arabayatığı to Kestel. On the west side of the Light Rail System, the line from Küçük Sanayi to the University has been extended and the line from Organize Sanayi station to Emek has been extended (Figure 2) [23].

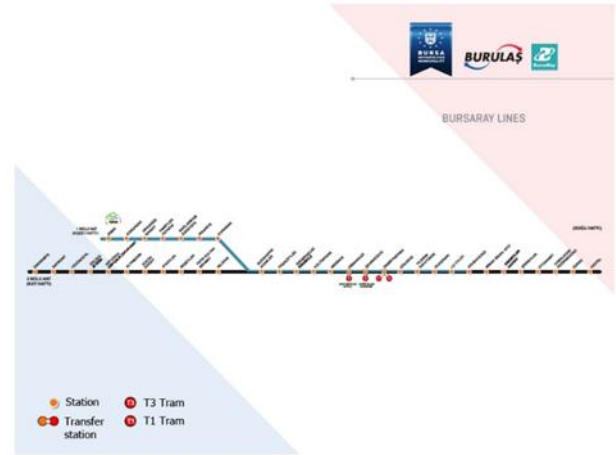


Figure 2. Light rail system line [23]

Finally, the efforts to extend the Light Rail System to Bursa City Hospital have started today. In addition, with the arrival of the Highspeed Train Line, which is expected to be completed soon, the rail system line is also expected to be extended to Balat.

4.2 T-1 (Silkworm) tram line

The Silkworm Tram line is an investment to meet the passenger demand in the city center. This line is defined as the T1 tram line and makes ring trips between Kent Square and Sculpture. This line mostly proceeds in the same place as road traffic and there is no special part reserved for it. The length of the line is 6.5 kilometers and there are total of 15 stops (Figure 3) [23,24]. In fact, the carrying capacity of the operating tram is about 320 people, including 48 seated passengers [25]. This line was put into operation at the beginning of 2014 and still provides services.

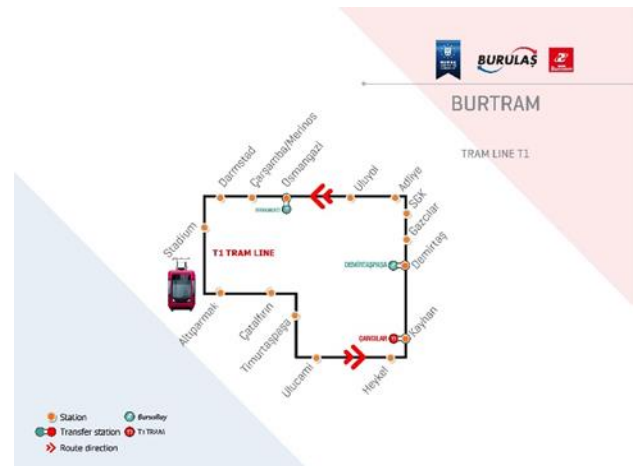


Figure 3. Silkworm tram line [24]

In addition, the tram used for transportation on the line is 100% local and is also produced in Bursa. The construction cost of this line is approximately € 8.5 million, excluding vehicles on it [17].

4.3 T-2 tram line

The T-2 tram line is perhaps one of the most controversial transportation investments for Bursa, which is still under construction today. This line will be operated between City Square and Bus Terminal, it is 8.3 kilometers long and will consist of 11 stations [26]. The fact that Bursa will connect two dense regions together shows the necessity of the line; Whether this line should be a light rail system or not will be revealed in the coming years. The fact that the line is not built underground and is at the same level with the highway will cause inadequacy of the existing highway. In addition, if we consider that the passengers coming to the intercity bus station will transfer from Kent Square station using T1 or Light Rail System, they will have to walk about 200 meters from Kent Square, the last stop of the T2 line, to other transfer stops (Figure 4) [27].

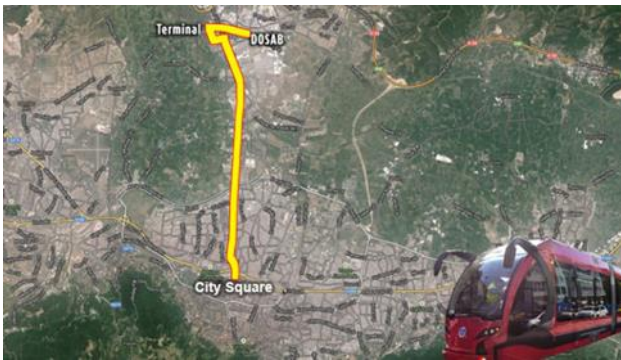


Figure 4. T-2 Tram line [23]

4.4 Nostalgic tram line

The nostalgic tram line starts from Çınarönü and ends at Zafer Plaza stop and is approximately 2.2 kilometers long. It even has 9 stops in total and has a capacity of about 60 passengers [28]. With this line built and passenger transportation started, almost a 100-year dream has come true and transportation has started to the Hanlar Region, the city's busy commercial area (Figure 5) [23].



Figure 5. T-3 Tram line [23]

With the construction and completion of this line, Cumhuriyet Street, one of the most important streets of the city, was closed to vehicle traffic, only for pedestrians and nostalgic trams. The cost of this project is 3.5 million Euros, excluding vehicles to be used for transportation on the line, and the estimated number of passengers carried is around 7000 per day [17, 29].

4.5 High speed train line

With the acceleration of rail transportation in our country in the last 20 years, high-speed railway lines have been started to be built. The high-speed railway line, which was first completed between Ankara and Eskişehir, continued with the completion of the Konya-Ankara and Eskişehir-Istanbul lines. The construction of the Eskişehir-Bursa line is still ongoing. about 70% of them are at the finishing stage (Figure 6) [30, 31].



Figure 6. High speed train line [30]

4.6 Istanbul-Bursa-Izmir highway

In the event of Turkey's most important city project linking the Istanbul-Bursa-Izmir highway construction with the completion of these cities work together even closer and long-distance travel have been easier. Undoubtedly, the important cultural, tourism and trade centers of the country are located in these provinces, and the importance of this project has increased even more. The total length of this highway is 384 kilometers, the highway is 426 kilometers along with connection roads, and the time between Istanbul and Izmir, which lasted 9 hours, reduced to 3.5 hours (Figure 7) [32].



Figure 7. Istanbul-Bursa-Izmir highways [32]

5 Conclusions

Significant investments have been made in the transportation sector in Bursa, especially in the last 20 years. This investment further enhances the importance of Bursa, which is already an important city for Turkey. There is no

doubt that these transportation investments, like all projects, have shortcomings. Especially in Bursa, where the country's important agricultural product needs are met together with its fertile plain, the implementation of projects over the agricultural areas without considering these agricultural activities negatively affects the agricultural activities of the farmers.

Errors in feasibility studies before projects are implemented lead to misuse of the public budget. For example, when a tram project is applied to a place where a light rail system is required, both time and money are lost for a project that will be insufficient in the future. In order to prevent such wrong practices, feasibility studies should be done comprehensively and priority should be given to projects that will save the future rather than the policies that save the day. Otherwise, the investments made will not be effective on the expected problems and will also waste money.

6 Results and discussions

Population growth in metropolitan cities especially in recent years causes many problems in cities. Problems such as transportation, traffic density, healthcare concentrations, and infrastructure problems can be cited as the main problems. Managers are working to solve these problems. There are projects that they have been successful in solving these problems, as well as projects where they have not found a permanent solution to the problems. In order for the budget allocated to public investments to be used efficiently, it is necessary to work in coordination with the experts and non-governmental organizations. Otherwise, the projects will cease to be solution-oriented and further increase confusion. In this study, suggestions were made whether the transportation investments made in Bursa in the last 20 years were effective in solving the problems, and the projects that were effective and not used effectively would increase the efficiency.

- The Bursaray Light Rail System project was sufficient to meet the demand for public transportation in the first years of its use. However, over the years, the demand for travel has increased with the expansion of the Bursaray line and the integration of other transportation systems to Bursaray. As a result, passenger density is experienced, especially at certain times of the day. When we examine the harmony of Bursaray with the city, it causes narrowing of the highway and increases the traffic density especially in the regions where the city has a dense population.

- When we examine the T-1 tram line, the expected efficiency from the tram transportation system in terms of passenger transportation cannot be obtained. In order for the tram system to be feasible, it must be 15.000 passengers / day. As of 2018, the daily usage amount on the T-1 tram line was 8.500 passengers / day. This shows that the T-1 line is far below its purpose. The emergence of this result is that there are many different types of public transportation in the same direction as the route of the T-1 tram line. In order to use this line efficiently, especially buses moving on the route where the T-1 line passes must be integrated and operated.

- The T-2 tram line was perhaps one of the most

discussed projects among the existing projects. Discussions continued both in the selection of the type of public transportation and in the location of the stations. At first, metrobus transportation was considered instead of tram transportation. Later, it was decided on tram transportation, but unlike traditional tram projects, this project is planned to leave the highway and enter it on its own line. Considering the minimum required number of passengers in tram transportation and the number of passengers carried by buses on the current route this project has passed, it may be considered that this project will not be feasible at first. However, with this current increase of Bursa, which has a population of increasing population, it is clear that the presence of Demirtaş Organized Industrial Zone and other industrial facilities on the line will increase the travel demand of the region in the future. For this, at least the project that was made had to be designed in such a way that it would be integrated into the light rail system in case the demand for passengers increased.

- The T-3 nostalgic tram line is currently on the agenda and the desired efficiency could not be obtained from the line. In fact, this line is advantageous in accessing the touristic areas of Bursa by its location. To activate this line, firstly integrating 1326 Panorama Bursa with the Conquest Museum; It is necessary to ensure that the tour buses carrying especially the tourist groups coming from outside the city park in this region. Thus, buses will not cause traffic problems by not entering the area where historical artifacts are located, and people coming to the city for touristic activities will have used the T-3 nostalgic tram line.

- Construction work on the high-speed train line is currently ongoing, and work on electromechanical activities has not started yet. With the completion of this project, a new stage will be started in Bursa's transportation with Ankara and Eskişehir.

- The opening of the Istanbul-Bursa-İzmir highway caused a decrease in the time spent on transportation of these cities. However, the fact that this road is not preferred by the majority of the society is due to the fact that the Osman Gazi Bridge passage fee, which provides great advantage in crossing the Gulf of İzmit, is high. Effective use of this project will be ensured by updating this bridge and highway prices.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 9%

References

- [1] KPMG, <https://home.kpmg/tr/tr/home/medya/press-releases/2020/02/teknoloji-girisimlerine-milyarlar-yagiyor.html>, Accessed 20 July 2020.
- [2] KGM, Available from: <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Kurumsal/YolAgi.aspx>, Accessed 20 July 2020.
- [3] M. Kalaycıoğlu, Different geographical regional transportation planning in Turkey examining transportation relations at levels, 12. Transportation

- Congress, 135-146, Adana, Turkey, 24-26 May 2017.
- [4] Ş. Bilgiç, Evaluation of transportation investment decision process in Turkey, 7. Transportation Congress, 17-26, Eskişehir, Turkey, 19-21 September 2007.
- [5] E. Karaman, and M.F. Altan, Evaluation of transportation infrastructure investments in terms of finance, Journal of Istanbul Aydın University, 77-87, 2017.
- [6] Ş. Bilgiç and G. Evren, A suggestion for evaluation of transportation investments in Turkey, Itu Journal 1(2), 88-89, 2002.
- [7] D. Özay, Transport investment relationship and growth: economic sample. Msc Thesis, Namık Kemal University, Tekirdağ, 2019.
- [8] O. Meçik, The impact of transportation networks to the economic integrations, and Turkish world dimension. Uşak University Journal of Social Sciences, 5(2), 22-33, 2012.
- [9] J.B. Sobieralski, Transportation infrastructure and employment: Are all investments created equal?, Research in Transportation Economics, Article in Press, 2020.
- [10] X. Jiang, X. He, L. Zhang, H. Qin, F. Shao, Multimodal transportation infrastructure investment and regional economic development: A structural equation modeling empirical analysis in China from 1986 to 2011, Transport Policy, 54, 43-53, 2017.
- [11] M. Rizelioğlu, Modelling Bursa Irt system as bus rapid transit. Msc Thesis, Uludağ University, Bursa, 2015.
- [12] K.O. Şimit, M. Rizelioğlu, T. Arslan, An analyzing on the Turkey's first local tram silkworm line. Uludağ University, Journal of Engineering Faculty, 21 (2), 489-498, 2016.
- [13] M. Rizelioğlu and T. Arslan, Assessing the existing Bursa light rail transportation system. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2674 (3), 1-11, 2020.
- [14] Silk Road, <http://depts.washington.edu/silkroad/cities/turkey/bursa/bursa-map.jpg>, Accessed 20 July 2020.
- [15] Osmangazi Bridge Highway Cost, <https://www.ensonhaber.com/gundem/istanbul-izmir-otoyoluaciliyor#:~:text=dolara%20mal%20oldu,%C4%B0stanbul%2D%C4%B0zmir%20Otoyolu%2C%2011%20milyar%20dolara%20mal%20oldu,%C4%B0zmir%20Otoyolu%20a%C3%A7%C4%B1%C4%B1%C5%9F%C4%B1nda%20vatanda%C5%9Flara%20eslendi.,> Accessed 20 July 2020.
- [16] H. Kılıçaslan, Expanding the rail transport services of municipalities: the case of bursa metropolitan municipality, Journal Of Management And Economics, 22(2), 451-466, 2015.
- [17] T-2, <https://rayhaber.com/2018/12/aktastan-mujde-t2-tramvay-hatti-bursaraya-entegre-olacak/>, Accessed 20 July 2020.
- [18] High Speed Train, <https://www.olay.com.tr/yazar/ahmet-emin-yilmaz/trenimiz-de-kume-dustu-adi-artik-hizli-tren-degil-282818>, Accessed 20 July 2020.
- [19] Burulaş, <https://www.burulas.com.tr/bursaray-genel-bilgiler.aspx>, Accessed 20 July 2020.
- [20] M.A. Gençer and T. Eren. Ankara metro line movement hours be scheduled m1 (Kızılay-Batıkent). APJES 4 (2), 25-36, 2016.
- [21] Bursaray, https://www.wikiwand.com/tr/Bursa_metrosu_istasyonlar%C4%B1_listesi, Accessed 20 July 2020.
- [22] Burulaş, <https://www.burulas.com.tr/hatguzergahi.aspx>, Accessed 20 July 2020.
- [23] Bursaray, <https://rayhaber.com/2012/11/bursaray-guzergahi-nereler-kac-istasyon-var/>, Accessed 20 July 2020.
- [24] İpekböceği, <https://tr.railturkey.org/2015/04/30/durmaray-ipekbocegi-tramvay/>, Accessed 20 July 2020.
- [25] T-2Tramvay, <http://www.protamuhendislik.com.tr/TR/haberler/bursa-kent-meydani-terminal-t2-tramvay-hatti#:~:text=8.3%20km%20hat%20uzunlu%C4%9Fu%20ve,%C3%A7al%C4%B1%C5%9Fmalar%C4%B1%20Prota%20M%C3%BChendislik%20taraf%C4%B1nda%20ger%C3%A7ekle%C5%9Ftirilmektedir.,> Accessed 20 July 2020.
- [26] T-2Tramvay, <https://www.trthaber.com/haber/ekonomi/bursada-t2-tramvay-hattinda-imzalar-atildi-212478.html>, Accessed 20 July 2020.
- [27] G. Baştürk, Review of urban rail mass transport systems and comparing with world samples, Transportation and Communication Expertise Thesis, Ankara, 2014.
- [28] T-3 Tramvay, <https://www.bursa.bel.tr/tramvay-gunde-7-bin-yolcu-tasiyor/haber/11965>, Accessed 20 July 2020.
- [29] High Speed Train, <https://tr.railturkey.org/2015/11/03/bandirma-bursa-osmaneli-hizli-tren-hatti/>, Accessed 20 July 2020.
- [30] YHT, <https://www.bilecikhaber.com.tr/bursa-bilecik-yht-projesinde-son-durum-333947h.htm>, Accessed 20 July 2020.
- [31] Bursa Highways, <http://wowturkey.com/forum/viewtopic.php?p=2810504>, Accessed 20 July 2020.
- [32] Istanbul-Izmir, <https://www.sozcu.com.tr/2019/ekonomi/istanbul-izmir-arasi-mesafe-azaliyor-otoyol-erken-acilacak-5183679/>, Accessed 20 July 2020.





Değişken kesitli Timoshenko kolonlarının tamamlayıcı fonksiyonlar yöntemiyle burkulma analizi

Buckling analysis of Timoshenko columns having variable cross-section by complementary functions method

Burkay Sivri^{*1} , Beytullah Temel¹ 

¹ Çukurova Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 01330, Adana Türkiye

Özet

Bu çalışmada, eksenel yük altında değişken kesitli kolonların burkulması Tamamlayıcı Fonksiyonlar Yöntemi (TFY) ile incelenmiştir. Eleman boyunca kesit özellikleri sürekli değişen kolonlar Timoshenko giriş teorisine göre modellenmiştir. İç kuvvet-şekil değiştirme ilişkileri ve denge denklemleri kullanılarak burkulma davranışını idare eden birinci mertebeden adi diferansiyel denklem takımı elde edilmiştir. Farklı sınır koşulları için eleman boyunca farklı koniklik değerlerinin ve uzunluk/kalınlık oranlarının burkulma yükü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Hesaplanan boyutsuz burkulma yükleri literatürdeki mevcut değerler ve Abaqus sonlu elemanlar programından elde edilen sonuçlar ile test edilmiştir. TFY'nin değişken kesitli kolonların elastik burkulma problemine uygulanabilirliği gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Burkulma analizi, Tamamlayıcı fonksiyonlar yöntemi, Timoshenko kolonu

1. Giriş

Taşıyıcı sistemlerde kullanılan kolon elemanlar, çubuk eksenli doğrultusunda basınç kuvveti etkisi altındadır. Bu etkiden dolayı burkulma davranışlarının bilinmesi tasarım için önemlidir. Havacılık, uzay, tıp, makina ve inşaat mühendisliği gibi alanlarda üniform kesitler ve homojen-izotrop malzeme özellikleri istenilen mekanik özellikleri sağlayabilir. Mimari ve optimum mühendislik tasarımı için yapı elemanı boyunca değişken kesit ve malzeme özellikleri kullanılmaktadır. Gelişen eleman üretim teknikleriyle birlikte yapı elemanları bu talepleri karşılayabilecek şekilde imal edilebilir. Malzeme ve kesit özelliklerinin eleman eksenli ve/veya kesiti boyunca sürekli olarak değiştiği yapı elemanlarının mekanik davranışlarının bilinmesi bu sebepten gereklidir. Bu elemanların burkulma, serbest titreşim, zorlanmış titreşim, yorulma, aşınma, tokluk gibi mekanik özelliklerinin araştırılması önem kazanmıştır. Li [1], uygulamada sıklıkla karşılaşılan durumlar için değişken kesitli kolonların burkulma analizlerinde Bessel denklemlerini kullanmıştır. Elishakoff [2], homojen-izotrop olmayan kolonların burkulma yükünü, polinom tipi malzeme fonksiyonları için bulmuştur. Lee ve Lee [3], malzeme ve

Abstract

In this study, the buckling of variable cross-section columns under axial load is investigated by the Complementary Functions Method (CFM). Columns whose cross-sectional properties change continuously throughout the element are modeled according to the Timoshenko beam theory. By using the internal force-strain relations and equilibrium equations, a set of first-order ordinary differential equations governing the buckling behavior is obtained. The effects of different taper values and length/thickness ratios on the buckling load along the element are investigated for different boundary conditions. The calculated dimensionless buckling loads are tested with the available values in the literature and the results obtained from the Abaqus finite element program. The applicability of the CFM to the elastic buckling problem of variable cross-section columns has been demonstrated.

Keywords: Buckling analysis, Complementary functions method, Timoshenko column

kesit özelliklerinin kolon eksenli boyunca doğrusal değiştiği Euler-Bernoulli kolonlarının serbest titreşim ve burkulma analizini integral metodu ile çözmüşlerdir. Coşkun ve Atay [4], üniform ve değişken kesitli Euler-Bernoulli teorisine dayanan kolonların burkulmasını varyasyonel iterasyon yöntemiyle bulmuşlardır. Shahbaa ve arkadaşları [5], eksenel yönde fonksiyonel derecelenmiş girişlerin stabilite ve serbest titreşim analizini sonlu eleman metodu kullanarak yapmışlardır. Analizler için kullanılan giriş eleman modelini, şekil fonksiyonları kullanarak elde etmişlerdir. Gören ve Erim [6], on farklı kademeli ve kademesiz girişin kritik burkulma yüklerini sonlu eleman ve sonlu eleman-transfer matris metotlarını kullanarak hesaplamışlardır. Huang ve Li [7], üniform olmayan ve eksen boyunca eğilme rijitliği değişen Euler-Bernoulli kolonlarının burkulma davranışlarını idare eden diferansiyel denklemi, Fredholm integraline indirgemişlerdir. Soltani [8], elastik zemine oturan eksenel yönde derecelenmiş Timoshenko kolonlarının burkulma analizini sonlu eleman modeli kullanarak gerçekleştirmiştir. Rajasekaran [9], malzeme ve kesit özelliklerinin fonksiyonel olarak değiştiği kolonların titreşim ve burkulmasını diferansiyel transformasyon yöntemiyle araştırmıştır. Shahba ve arkadaşları [10], elastik

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: bsivri@cu.edu.tr (B. Sivri)

Geliş / Received: 13.09.2021 Kabul / Accepted: 11.10.2021 Yayınlanma / Published: 14.01.2022

doi: 10.28948/ngumuh.994891

mesnetli aksel yönde derecelenmiş Timoshenko teorisine dayalı kolonların serbest titreşim ve stabilite analizlerini sonlu elemanlar analiziyle incelemişlerdir. Soltani ve Asgarian [11], aksel yönde fonksiyonel derecelenmiş Timoshenko kolonlarının sonlu elemanlar formülasyonu ile lineer stabilite analizini gerçekleştirmişlerdir. Akgöz [12], değişken kesitli kolonların burkulma yükünü Ritz yöntemiyle bulmuştur. Kiriş modellerinde klasik kiriş teorisi kullanılmış olup, sınır koşullarının ve koniklik oranının burkulma yüküne etkisini parametrik olarak incelemiştir.

Bu çalışmada Timoshenko teorisine dayalı modellenen akseni boyunca değişken kesitli kolonların burkulma analizi TFY ile gerçekleştirilmiştir. TFY kullanmanın temel amacı sınır değer problemini başlangıç değer problemine dönüştürmektir. Yöntem sayesinde bilinmeyen fonksiyonların tamamı bir kerede elde edilebilir. Diferansiyel denklem çözümünde kullanılan Shooting Metodu başlangıç koşullarını belirlemek için deneme yanılma yöntemini kullanırken, TFY bağımsız başlangıç koşulları kullanarak daha az matematiksel işleme ihtiyaç duyar. Bu sayede farklı kesit değişim fonksiyonlarına sahip kolonların analizleri daha kısa sürede yapılabilir. Yazarların bilgisine göre, literatürde değişken kesitli Timoshenko kolonlarının burkulma yüklerinin TFY ile çözümüne rastlanmamıştır. Analizler, Python dilinde hazırlanan program aracılığıyla çözülmüştür. Çözümlerde homojen-izotrop malzeme kullanılmıştır. Bu çalışmada elde edilen burkulma yükleri, literatürdeki mevcut sonuçlar ve sonlu eleman programından bulunan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Farklı sınır koşulları için koniklik değerlerinin ve uzunluk/kalınlık oranlarının burkulma yüküne etkisi parametrik olarak incelenmiştir.

2. Materyal ve metot

Burkulma davranışını idare eden kanonik denklemler, iç kuvvet-şekil değiştirme ilişkisinden ve serbest cisim diyagramı üzerinden yazılan denge denklemlerinden elde edilecektir.

Timoshenko teorisine göre aksel yer değiştirme U_x ile düşey yer değiştirme U_z Denklem (1)'deki gibi ifade edilebilir. Aksel birim şekil değiştirme ε_x ve açılmal birim şekil değiştirme γ_{xz} ifadeleri Denklem (2-3)'deki gibi yazılır [13].

$$U_x = u(x) + z\theta(x) \quad , \quad U_z = w(x) \quad (1)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\partial U_x}{\partial x} = u' + z\theta' \quad (2)$$

$$\gamma_{xz} = \theta + w' \quad (3)$$

Eksel P basınç kuvveti taşıyan dikdörtgen kesitli kolonlarda; N normal kuvveti, M eğilme momenti, Q kesme kuvveti olmak üzere iç kuvvet-şekil değiştirme ilişkileri Denklem (4-6) 'da verilmektedir.

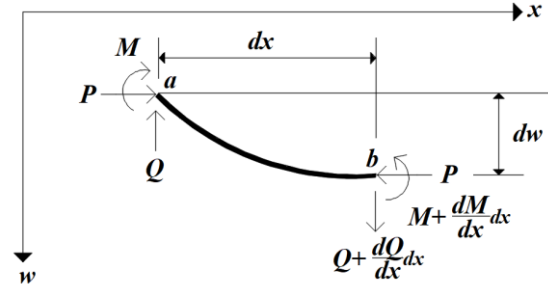
$$N = P \quad (4)$$

$$M = EI(x)\theta' \quad (5)$$

$$Q = k_s A(x)G(\theta + w') \quad (6)$$

Burada, E elastisite modülünü, G kayma modülünü, k_s kesite bağlı kayma düzeltme katsayısını, ν poisson oranını, θ dönme, w düşey yer değiştirmeyi göstermektedir.

Eksel P kuvveti altındaki kolonun serbest cisim diyagramı Şekil 1. üzerinden b noktasına göre toplam moment dengesi yazılırsa, moment değişimi Denklem (7)'deki gibi bulunabilir.



Şekil 1. Aksel P kuvveti altındaki kolonun serbest cisim diyagramı

$$M' = Q + Pw' \quad (7)$$

Düşey ve yatay kuvvetlerin dengesinden, normal ve kesme kuvvetlerindeki değişimler Denklem (8)'de verilmiştir.

$$Q' = 0, \quad N' = 0 \quad (8)$$

Yukarıda verilen denklemler kullanılarak, burkulma davranışını idare eden diferansiyel denklemler, kanonik formda aşağıdaki gibi bu çalışmada elde edilmiştir.

$$\frac{du}{dx} = \frac{N}{EA(x)} \quad (9)$$

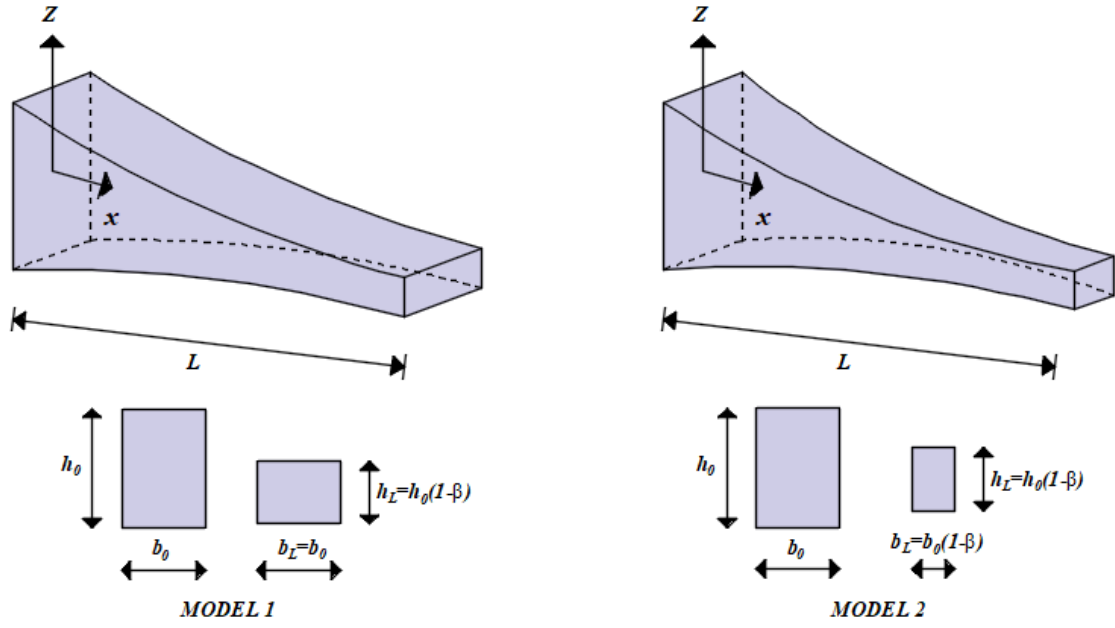
$$\frac{dw}{dx} = - \left(\frac{k_s GA(x)}{k_s GA(x) - P} \right) \theta \quad (10)$$

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{M}{EI(x)} \quad (11)$$

$$\frac{dN}{dx} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{dQ}{dx} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{dM}{dx} = Q - P \left(\frac{k_s GA(x)}{k_s GA(x) - P} \right) \theta \quad (14)$$



Şekil 2. Ekseni boyunca değişken kesitli kolon modelleri

Denklem (9-14)'de verilen adi diferansiyel denklem takımı, TFY [13-16] ile çözülecektir. TFY, lineer sınır değer problemini başlangıç değer problemine dönüştüren bir çözüm yöntemidir. Başlangıç değer problemi çözümleri beşinci mertebeden Runge-Kutta (RK5) algoritması ile yapılacaktır [17].

$$F(y) = k_n y^{(n)} + k_{n-1} y^{(n-1)} + \dots + k_1 y' + k_0 \quad (15)$$

Denklem (15)'de verilen n. mertebeden diferansiyel denklem, n adet adi diferansiyel denklem takımına indirgenir. Bu denklem takımı, n adet homojen ve bir adet homojen olmayan başlangıç değer problemi olarak çözülür. İntegrasyon sabitleri ise problemin sınır koşullarından elde edilir. Bu çalışmada ele alınan problemlerin çözümlerinde Tablo 1'de verilen üç farklı sınır koşulu kullanılmıştır.

Tablo 1. Sınır koşulları

Sınır Koşulu	$u=0$	$w=0$	$\theta=0$
Ankastre Mesnet (A)	$u=0$	$w=0$	$\theta=0$
Sabit Mesnet (S)	$u=0$	$w=0$	$M=0$
Serbest Uç (Se)	$u=0$	$Q=0$	$M=0$

Analizi yapılan problemin P burkulma yükleri, sınır koşulları dikkate alınarak, diferansiyel denklem takımının homojen çözümünden elde edilen katsayılar matrisinin determinantını sıfır yapan değerlerden elde edilmektedir. Burkulma yükleri, Secant metoduyla iteratif olarak bulunmaktadır.

Ekseni boyunca değişken kesit özelliklerine sahip iki ayrı kolon modeli Şekil 2'de gösterilmiştir. Model 1'de eksen boyunca sadece yükseklik değişirken, Model 2'de hem yükseklik hem de genişlik birlikte değişmektedir. Her iki model için kesit alanı $A(x)$ ve kesit atalet momenti $I(x)$ değişimi Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2. Kesit alanı ve atalet momenti değişimi

Model No	$I(x)$	$A(x)$
Model 1	$I_0(1-\beta \frac{x}{L})^3$	$A_0(1-\beta \frac{x}{L})$
Model 2	$I_0(1-\beta \frac{x}{L})^4$	$A_0(1-\beta \frac{x}{L})^2$

3. Sayısal Uygulamalar

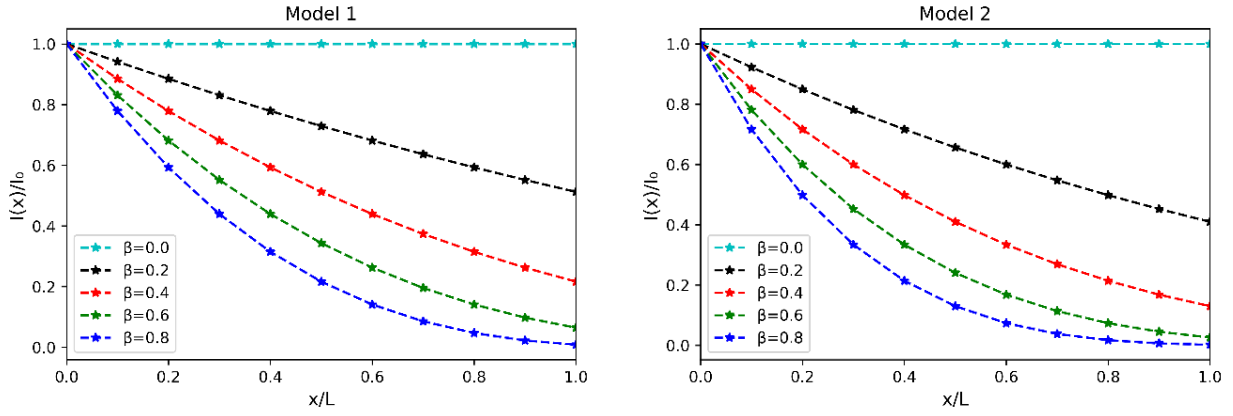
3.1. Uygulama 1

Kullanılan çözüm yönteminin uygunluğu, yakınsaması ve etkinliğini göstermek için literatürde analitik çözümü verilen homojen-izotrop malzemeye sahip bir kolon ele alınmıştır. Kolonun burkulma analizlerinde kullanılan boyutsuzlaştırma parametreleri Denklem (16)'da verilmiştir.

$$r = \frac{I_0}{A_0 L^2} \quad \bar{P}_{cr} = \frac{P_{cr} L^2}{EI_0} \quad (16)$$

Analizlerde, $r = 0.01$, $L = 1 m$, $k_s = 5/6$ ve $\nu = 0.3$ olarak alınmıştır. $x = 0$ başlangıç noktasında kesit atalet momenti ve alanı sırasıyla $I_0 = b_0 h_0^3 / 12$ ve $A_0 = b_0 h_0$ bağlantılarından hesaplanmıştır.

Model 1 ve Model 2 için çeşitli β değerlerine göre kolon boyunca atalet momentinin değişimi Şekil 3'de gösterilmiştir. Tablo 2'de verilen değişim fonksiyonlarında $\beta = 0$ alınırsa, problem sabit kesitli kolon problemine dönüşmektedir. Bu durumda homojen-izotrop malzemeli Timoshenko kolonun çeşitli adım aralıkları ve Sabit-Sabit (S-S), Ankastre-Sabit (A-S), Ankastre-Ankaste (A-A) ve Ankastre-Serbest (A-Se) sınır koşulları için bulunan boyutsuz burkulma yükleri, Tablo 3'de literatürde verilen analitik sonuçlar [18] ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 3. Çeşitli β değerleri için kolon boyunca atalet momentinin değişimi

Tablo 3. Homojen-izotrop Timoshenko kolonların boyutsuz burkulma yükleri

Sınır Koşulları	Bu Çalışma			Wang [18]
	$N = 5$	$N = 10$	$N = 20$	
S-S	7.546	7.546	7.546	7.546
A-S	12.385	12.387	12.387	12.387
A-A	17.676	17.689	17.690	17.690
A-Se	2.291	2.291	2.291	2.291

Tablo 3 incelendiğinde, $N = 10$ adım aralığında sabit kesitli kolonlarda yeterli derecede yakınsamanın sağlandığı görülmektedir.

Değişken kesitli Timoshenko kolonunun farklı koniklik değerleri ve A-Se sınır koşulu için bulunan boyutsuz burkulma yükleri Tablo 4'de verilmiştir. Tablo 4 incelendiğinde, A-Se sınır koşuluna sahip değişken kesitli Timoshenko kolonları için TFY ile bulunan boyutsuz burkulma yüklerinin, literatürde verilen sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu görülmektedir.

Tablo 4. A-Se kolonun farklı koniklik değerleri için boyutsuz burkulma yükleri

β	Model 1		Model 2	
	Bu Çalışma $N = 10$	Soltani [11]	Bu Çalışma $N = 10$	Soltani [11]
0.1	2.089	2.088	2.016	2.016
0.2	1.884	1.884	1.742	1.742
0.3	1.676	1.676	1.471	1.471
0.4	1.465	1.465	1.203	1.203
0.5	1.250	1.250	0.941	0.941
0.6	1.029	1.029	0.688	0.688
0.7	0.800	0.800	0.448	0.447
0.8	0.561	0.560	0.234	0.236
0.9	0.301	0.301	0.069	0.073

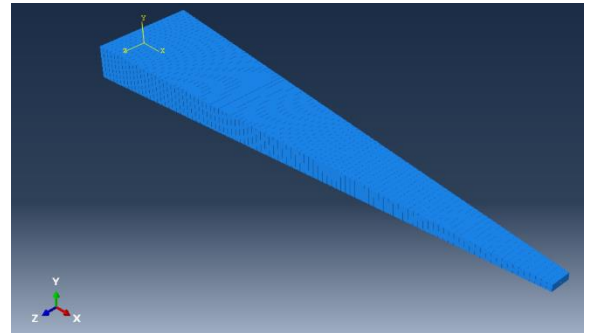
İki kesit değişim modeli için bulunan boyutsuz burkulma yükleri arasındaki farkın, β değeri ile birlikte artmakta olduğu, ayrıca Model 1 kesit değişimi için daha büyük boyutsuz burkulma yüklerinin elde edildiği anlaşılmaktadır.

3.2. Uygulama 2

Bu problemde ilk olarak, uzunluk/kalınlık oranının değişken kesitli kolonların burkulma yüküne etkisi TFY ve Abaqus [19] sonlu elemanlar programı ile araştırılmıştır. Analizlerde kullanılan boyutsuzlaştırma parametresi Denklem (17)'de verilmiş ve $L = 1 m$, $\nu = 0.3$ ve $k_s = 0.85$ alınmıştır.

$$\overline{P}_{cr} = \frac{P_{cr} L^2}{EI_0} \quad (17)$$

Uzunluk/kalınlık oranı $L/h_0 = 5$ olan değişken kesitli Timoshenko kolonlarının burkulma analizlerinin, sonlu eleman (SE) çözümleri iki boyutlu düzlemde yapılmıştır. Kesit değişimini modelleyebilmek için kolon uzunluğu doğrultusunda 50, 100 ve 200 homojen-izotrop elemana bölünmüştür. SE analizlerinde kayma deformasyonlarının dikkate alındığı B21 elemanı kullanılmıştır. Birbiri ardına gelen her iki eleman arasına giriş tipi bağlantı tanımlanmıştır. Modelin SE programı arayüzündeki görüntüsü Şekil 4'de gösterilmiştir. TFY ile çözümlerde $N = \{5, 10, 20, 50\}$ integrasyon adım aralıkları kullanılarak, çeşitli koniklik oranları ve sınır koşulları için bulunan boyutsuz burkulma yükleri, Tablo 5'de Abaqus programından elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4. Değişken kesitli kolonun SE modeli

Tablo 5. $L/h_0 = 5$ oranı için kolonunun farklı koniklik değerleri için boyutsuz burkulma yükleri

		A-A		A-S		S-S		A-Se		
		Model 1	Model 2	Model 1	Model 2	Model 1	Model 2	Model 1	Model 2	
$\beta = 0.2$	Abaqus	50 Eleman	21.3893	19.0245	12.2303	10.8761	6.5561	5.8328	1.9755	1.8348
		100 Eleman	21.3889	19.0241	12.2306	10.8765	6.5565	5.8328	1.9755	1.8348
		200 Eleman	21.3881	19.0234	12.1481	10.8000	6.5558	5.8324	1.9756	1.8349
	TFY	N=5	21.3573	18.9863	12.3941	11.0003	6.5560	5.8326	1.9756	1.8349
		N=10	21.3836	19.0106	12.3969	11.0027	6.5562	5.8327	1.9756	1.8349
		N=20	21.3843	19.0112	12.3969	11.0028	6.5562	5.8327	1.9756	1.8349
		N=50	21.3843	19.0112	12.3969	11.0028	6.5562	5.8327	1.9756	1.8349
$\beta = 0.4$	Abaqus	50 Eleman	14.8838	11.2335	8.3220	6.2828	4.4010	3.3201	1.5335	1.2727
		100 Eleman	14.8830	11.2328	8.3228	6.2831	4.4014	3.3203	1.5336	1.2728
		200 Eleman	14.8811	11.2309	8.2523	6.2239	4.4010	3.3200	1.5336	1.2728
	TFY	N=5	14.8466	11.1802	8.4065	6.3216	4.4013	3.3204	1.5336	1.2728
		N=10	14.8722	11.2016	8.4084	6.3229	4.4012	3.3203	1.5336	1.2728
		N=20	14.8729	11.2025	8.4084	6.3229	4.4012	3.3203	1.5336	1.2728
		N=50	14.8729	11.2025	8.4084	6.3229	4.4012	3.3203	1.5336	1.2728
$\beta = 0.6$	Abaqus	50 Eleman	8.8620	5.2103	4.8514	2.8530	2.5452	1.4865	1.0747	0.7325
		100 Eleman	8.8601	5.2084	4.8525	2.8537	2.5456	1.4869	1.0748	0.7327
		200 Eleman	8.8568	5.2046	4.7955	2.8124	2.5453	1.4867	1.0749	0.7327
	TFY	N=5	8.8250	5.1953	4.8852	2.8561	2.5459	1.4873	1.0749	0.7328
		N=10	8.8453	5.1728	4.8857	2.8564	2.5456	1.4870	1.0749	0.7327
		N=20	8.8469	5.1755	4.8857	2.8564	2.5456	1.4869	1.0749	0.7327
		N=50	8.8469	5.1755	4.8857	2.8563	2.5456	1.4869	1.0749	0.7327
$\beta = 0.8$	Abaqus	50 Eleman	3.6635	1.3539	1.9686	0.7244	1.0435	0.3723	0.5841	0.2535
		100 Eleman	3.6591	1.3509	1.9701	0.7253	1.0442	0.3728	0.5844	0.2538
		200 Eleman	3.6498	1.3421	1.9302	0.7040	1.0442	0.3728	0.5845	0.2539
	TFY	N=5	3.7632	1.0304	1.9645	0.6897	1.0434	0.3698	0.5844	0.2531
		N=10	3.6416	1.3301	1.9769	0.7219	1.0445	0.3730	0.5845	0.2539
		N=20	3.6482	1.3335	1.9767	0.7221	1.0444	0.3730	0.5845	0.2539
		N=50	3.6483	1.3340	1.9767	0.7221	1.0444	0.3729	0.5845	0.2539

Tablo 5 incelendiğinde, A-A sınır koşuluna sahip kolonların Abaqus sonlu elemanlar programından 50 ve 200 eleman kullanılarak elde edilen boyutsuz burkulma yüklerinin bağıl farkları sırasıyla, $\beta = 0.2$ ve {Model 1 ve Model 2} için $\{ \%5.61 \times 10^{-3}, \%5.78 \times 10^{-3} \}$ iken, $\beta = 0.8$ ve {Model 1 ve Model 2} için $\{ \%0.375, \%0.879 \}$ olarak elde edilmiştir.

Aynı sınır koşuluna sahip Timoshenko kolonlarının TFY ile $N = \{10, 50\}$ adım aralıkları için bulunan boyutsuz

burkulma yüklerinin bağıl farkları sırasıyla, $\beta = 0.2$ ve {Model 1 ve Model 2} için $\{ \%3.27 \times 10^{-3}, \%3.16 \times 10^{-3} \}$ iken, $\beta = 0.8$ ve {Model 1 ve Model 2} için $\{ \%0.184, \%0.292 \}$ olarak bulunmaktadır. Farklı L/h_0 oranları için değişken kesitli Timoshenko kolonlarının iki ayrı kesit değişim modeli ve çeşitli koniklik oranlarındaki boyutsuz burkulma yükleri Tablo 6-7'de verilmiştir. Analizlerde $N = 20$ adım aralığı kullanılmıştır.

Tablo 6. $L/h_0 = 10$ oranı için kolonunun farklı koniklik değerleri için boyutsuz burkulma yükleri

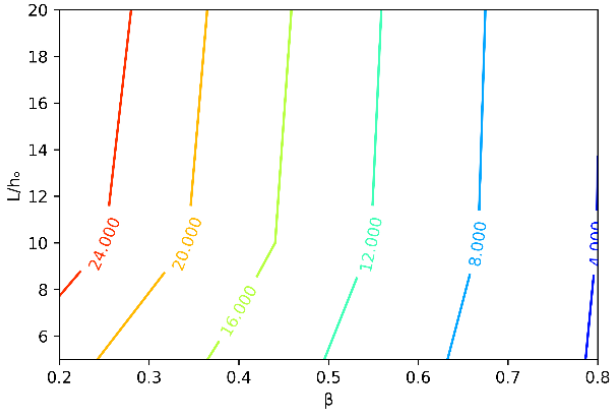
β	A-A		A-S		S-S		A-Se	
	Model 1	Model 2	Model 1	Model 2	Model 1	Model 2	Model 1	Model 2
0.2	26.2033	23.3500	13.9063	12.3828	6.9492	6.1883	2.0111	1.8711
0.4	17.5229	13.3253	9.2323	7.0080	4.6109	3.4920	1.5600	1.3000
0.6	10.0194	5.9926	5.2537	3.1291	2.6389	1.5552	1.0925	0.7505
0.8	3.9674	1.5114	2.0817	0.7848	1.0725	0.3891	0.5937	0.2616

Tablo 7. $L/h_0 = 20$ oranı için kolonunun farklı koniklik değerleri için boyutsuz burkulma yükleri

β	A-A		A-S		S-S		A-Se	
	Model 1	Model 2	Model 1	Model 2	Model 1	Model 2	Model 1	Model 2
0.2	27.7665	24.7585	14.3427	12.7829	7.0549	6.2840	2.0202	1.8804
0.4	18.3374	13.9801	9.4637	7.2018	4.6664	3.5376	1.5668	1.3070
0.6	10.3605	6.2327	5.3541	3.2047	2.6633	1.5731	1.0970	0.7551
0.8	4.0551	1.5614	2.1095	0.8019	1.0798	0.3934	0.5961	0.2636

Tablo 6-7 incelendiğinde L/h_0 oranı arttıkça dört farklı sınır koşulu için de boyutsuz burkulma yüklerinin arttığı görülmüştür. En büyük boyutsuz burkulma yükleri A-A sınır koşuluna sahip kolonlarda elde edilirken, en küçük boyutsuz burkulma yükleri ise, A-Se sınır koşulu için elde edilmiştir.

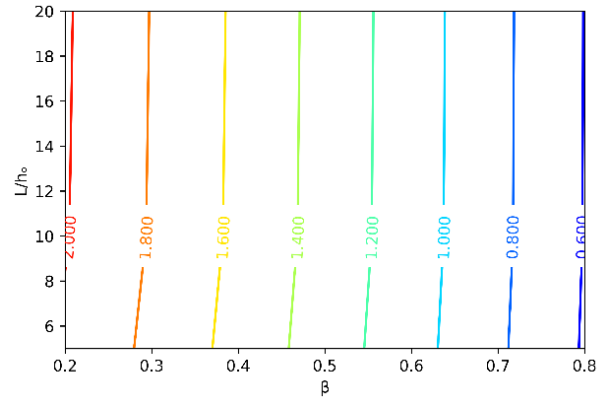
İki farklı sınır koşulu için Model 1 kesit değişimine sahip Timoshenko kolonlarının, koniklik oranı ve uzunluk/kalınlık oranına bağlı boyutsuz burkulma yüklerinin eşdeğer eğrileri Şekil 5-6'da verilmiştir.



Şekil 5. A-A sınır koşulu için kolonun boyutsuz burkulma yüklerinin eşdeğer eğrileri

Şekil 5 incelendiğinde, A-A sınır koşuluna sahip kolonlarda, düşük β değerleri için L/h_0 oranının boyutsuz burkulma yüküne etkisinin, yüksek β değerlerine kıyasla daha fazla olduğu görülmektedir.

Şekil 6'ya göre ise, A-Se sınır koşulu altında kolonda çeşitli β değerleri için elde edilen boyutsuz burkulma yüklerinin L/h_0 oranlarından çok az etkilendiği anlaşılmaktadır.



Şekil 6. A-Se sınır koşulu için kolonun boyutsuz burkulma yüklerinin eşdeğer eğrileri

4. Sonuçlar

Bu çalışmada değişken kesitli, Timoshenko kiriş teorisine dayalı kolonların burkulma analizi TFY kullanılarak yapılmıştır. Araştırmada iki farklı kesit değişim modeli kullanılmıştır. Analizlerde, β değeri arttıkça, elde edilen boyutsuz burkulma yükleri azalmaktadır. Dolayısıyla, çözüm yöntemlerinde kullanılan eleman sayısı ve adım aralıklarının önemi artmaktadır. L/h_0 oranı azaldıkça kayma deformasyonlarının boyutsuz burkulma yüküne etkisinin artmakta olduğu görülmektedir. Ayrıca, değişken kesitli kolonlarda L/h_0 oranının, burkulma yükü üzerindeki etkisinin, sınır koşullarına bağlı olarak değiştiği anlaşılmaktadır. Yapılan çalışma sonucunda, TFY'nin değişken kesitli kolonların burkulma analizinde etkin bir şekilde kullanılabilirdiği gösterilmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): % 10

Kaynaklar

- [1] Q. S. Li, Exact solutions for buckling of non-uniform columns under axial concentrated and distributed loading. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 20 (3), 485-500, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0997-7538\(01\)01143-3](https://doi.org/10.1016/S0997-7538(01)01143-3).
- [2] I. Elishakoff, Inverse buckling problem for inhomogeneous columns. *International Journal of Solids and Structures*, 38 (3), 457-464, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(00\)00049-4](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(00)00049-4).
- [3] J. K. Lee and B. K. Lee, Free vibration and buckling of tapered columns made of axially functionally graded materials. *Applied Mathematical Modelling*, 75, 73-87, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.05.010>.
- [4] S. B. Coşkun and M. T. Atay, Determination of critical buckling load for elastic columns of constant and variable cross-sections using variational iteration method. *Computers & Mathematics with Applications*, 58 (11-12), 2260-2266, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2009.03.072>.
- [5] A. Shahba, R. Attarnejad, and S. Hajilar, Free vibration and stability of axially functionally graded tapered Euler-Bernoulli beams. *Shock and Vibration*, 18 (5), 683-696, 2011. <https://doi.org/10.3233/SAV-2010-0589>.
- [6] G. Binnur ve S. Erim, Değişken kesitli ankastre timoshenko kirişin statik stabilite analizi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2(2), 75-86, 2000.
- [7] Y. Huang and X. F. Li, Buckling analysis of nonuniform and axially graded columns with varying flexural rigidity. *Journal of engineering mechanics*, 137(1), 73-81, 2011. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000206](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000206).
- [8] M. Soltani, Finite element modelling for buckling analysis of tapered axially functionally graded Timoshenko beam on elastic foundation. *Mechanics of Advanced Composite Structures*, 7(2), 203-218, 2020.
- [9] S. Rajasekaran, Buckling and vibration of axially functionally graded nonuniform beams using differential transformation based dynamic stiffness approach. *Meccanica*, 48(5), 1053-1070, 2013. <http://dx.doi.org/10.1007/s11012-012-9651-1>
- [10] A. Shahba, R. Attarnejad, M. T. Marvi and S. Hajilar, Free vibration and stability analysis of axially functionally graded tapered Timoshenko beams with classical and non-classical boundary conditions. *Composites Part B: Engineering*, 42(4), 801-808, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.01.017>.
- [11] M. Soltani and B. Asgarian, Finite element formulation for linear stability analysis of axially functionally graded nonprismatic timoshenko beam. *International Journal of Structural Stability and dynamics*, 19(02), 1950002, 2019. <https://doi.org/10.1142/S0219455419500020>.
- [12] B. Akgöz, Ritz yöntemi ile değişken kesitli kolonların burkulma analizi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(2), 452-458, 2019. <https://doi.org/10.21923/jesd.539288>.
- [13] T. A. Aslan, A. R. Noori ve B. Temel, Fonksiyonel derecelenmiş malzemeli kirişlerin sönümlü ve sönümsüz zorlanmış titreşim analizi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(2), 497-510, 2020. <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.792455>.
- [14] T. A. Aslan, A. R. Noori ve B. Temel, Daire eksenli yapı elemanlarının tamamlayıcı fonksiyonlar yöntemi ile statik analizi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(1), 23-30, 2017. <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.310041>.
- [15] A. R. Noori, T. A. Aslan and B. Temel, An efficient approach for in-plane free and forced vibrations of axially functionally graded parabolic arches with nonuniform cross section. *Composite Structures*, 200, 701-710, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.05.077>.
- [16] H. Rasooli ve B. Temel, Değişken kesitli ve tabakalanmış kompozit malzemeli doğru ve daire eksenli karma sistemlerin tamamlayıcı fonksiyonlar yöntemi ile statik analizi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(3), 46-56, 2019. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.627482>
- [17] S.C. Chapra ve R. P. Canale, *Yazılım ve Programlama Uygulamalarıyla Mühendisler İçin Sayısal Yöntemler*. Literatür Yayınevi, 2003.
- [18] C.M. Wang, C.Y. Wang and J.N.Reddy, *Exact Solutions for Buckling of Structural Members*. Florida CRC Press, 2005.
- [19] Dassault Systèmes, ABAQUS/CAE v6.14, 2016.





Basitleştirilmiş tasarım ilkelerinin betonarme binaların kat ötelemelerine tesiri üzerine bir inceleme

An investigation on the effect of simplified design principles on the storey drift of RC buildings

Hakan Dilmaç^{1,*} 

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye

Özet

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (TBDY) düzenli yerinde dökme betonarme binalar için basitleştirilmiş tasarım kuralları ayrıntılı olarak verilmektedir. Bu tasarım kurallarında, taşıyıcı sistem türüne bağlı olarak kolon ve perde elemanların kesit boyutları için ön tasarım koşulları belirtilmektedir. Çalışma kapsamında, taşıyıcı sistemi çerçevesel olan üç ve beş katlı, farklı yapısal özellikleri olan 38 adet model bina tasarımı yapılmıştır. Model binaların tasarım kuralları ve kolon elemanlarının kesit boyutları, TBDY' de belirtilen sınır şartlarını sağlayacak şekilde dikkate alınmıştır. Analizlerde, farklı deprem sınıfı, zemin türü ve bina yüksekliği kullanılarak, binalara ait basitleştirilmiş ve standart hesap yöntemleriyle elde edilen elastik taban kesme kuvvetleri hesaplanmıştır. Ayrıca, binaların kat ötelemeleri ve göreceli kat yerdeğiştirme değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen taban kesme kuvvetleri ve kat ötelemeleri kendi içerisinde karşılaştırılmıştır. TBDY kapsamında göreceli kat ötelemeleri için belirtilen sınır şartı kontrolleri yapılmıştır. TBDY kapsamına basitleştirilmiş tasarım kuralları ile modellenen binaların göreceli kat ötelemeleri için belirtilen sınır şartı çoğunlukla karşılanmadığı görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Kat ötelemesi, Betonarme bina, Taban kesme kuvveti, Ön tasarım

1 Giriş

Dünyada ve ülkemizde meydana gelen depremler, sürekli güncellenen deprem haritaları, insanlara depremin her an ve her yerde meydana gelebileceği gerçeğini göstermektedir. Özellikle, son otuz yıldaki depremlerin sebep olduğu maddi ve manevi bilanço göz önüne alındığında, mevcut yapı stokunun depreme karşı dayanıklı olmadığı net bir şekilde anlaşılmaktadır. Birçok ülkede, depreme karşı dayanıklı yapı tasarımı ve mevcut yapıların deprem dayanımının tespiti için hesap esaslarının önerildiği yönetmelikler, şartnameler çıkarılmakta veya mevcut olanları güncellenmektedir [1-5]. Ülkemizde 2007 yılında yayınlanan Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik [4] kapsamı genişletilerek bazı düzenlemelerle 2018 yılında TBDY [5] olarak güncellenmiştir.

Depreme dayanıklı yapı tasarımı veya mevcut binaların deprem performansının belirlenmesi için mevcut

Abstract

Simplified design rules for regular reinforced concrete (RC) buildings are given in detail in the Turkish Building Seismic Code (TBSC). Depending on the structural system type, preliminary design conditions are specified for the cross-sectional dimensions of the columns and RC shear walls. In the study, three and five-storey 38 model buildings with have different structural features and framed load-carrier systems were designed. The design rules of the model buildings and the cross-sectional dimensions of the columns have been considered to meet the threshold conditions specified in TBSC. In the analyses, the elastic base shear forces of the RC buildings were obtained by using different earthquake class, soil type and building height. In addition, storey drifts and relative storey displacements of RC buildings were calculated. The obtained base shear forces and storey drifts were compared within themselves. Within the scope of TBSC, the specified threshold condition controls were made for the relative storey drifts. It has been observed that the buildings modeled with simplified design rules within the scope of TBCD mostly do not meet the threshold condition specified for the relative storey drifts.

Keywords: Storey drift, RC building, Base shear force, Pre-design

yönetmeliklerde öngörülen hesap esasları oldukça zaman alıcı ve zordur. Bu açıdan, betonarme binaların deprem performansının hızlı ve kolay bir şekilde değerlendirilebilmesi için birçok alternatif yöntem araştırmacılar tarafından önerilmiştir [6-12]. Önerilen bu yöntemlerde birçok farklı kabuller yapılmaktadır. Dolayısıyla, önerilen bu alternatif yöntemlerle elde edilen analiz sonuçları ile yönetmeliğin hesap esaslarına göre yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar tamamen birbiri ile uyum sağlayamamaktadır.

Betonarme binaların tasarım aşamasında yeterli mühendislik hizmetini alması bina güvenliği açısından oldukça önemlidir. Buna bağlı olarak, TBDY' nin son kısmında düzenli yerinde dökme betonarme binalar için basitleştirilmiş tasarım kuralları verilmektedir. Bu bölüme göre belirli tasarım sınırları içerisinde kalma koşuluyla,

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: hakandilmac@sdu.edu.tr (H. Dilmaç)

Geliş / Received: 17.10.2021 Kabul / Accepted: 12.11.2021 Yayımlanma / Published: 14.01.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1011015

basitleştirilmiş hesap esasları kullanılarak binaların tasarımları kolaylaştırılmaktadır [13].

Çalışma kapsamında, TBDY' nin son kısmında yer alan taşıyıcı sistemi çerçevesi olan betonarme binalar için tasarım kurallarını ve sınır şartlarını sağlayan 3 ve 5 katlı model konut bina tasarımı yapılmıştır. Bu model binaların her biri için 5 farklı zemin türüne ve deprem tasarım sınıfına (DTS) göre spektral ivme katsayıları AFAD deprem tehlike haritasından elde edilmiştir [14]. Bu parametreler dikkate alındığında toplam 38 adet model bina analiz için tasarlanmıştır. DD-2 tasarım deprem spektrumu dikkate alınarak elde edilen elastik taban kesme kuvvetleri (standart taban kesme kuvveti) her bir bina için elde edilmiştir. Aynı zamanda, TBDY'nin son bölümünde tanımlanan basitleştirilmiş tasarım kuralları dikkate alınarak hesaplanabilecek bina taban kesme kuvvetleri de hesaplanmıştır. Her iki taban kesme kuvvetine göre kat ötelemeleri, görelî kat yerdeğiştirme değerleri hesaplanmıştır. Aynı zamanda, TBDY Bölüm 4' de belirtilen etkin görelî kat sınır şartı kontrolleri yapılmıştır. Tüm bu analizlerden elde edilen verilerle, çerçevesi taşıyıcı sistemi olan betonarme binalar için önerilen tasarım esaslarının uygunluğu araştırılmıştır.

2 Çerçevesi betonarme binaların basitleştirilmiş tasarım kuralları

TBDY' de yeni yapılacak betonarme bir binanın deprem güvenliğini sağlamak için detaylı tasarım ve hesap yöntemleri belirtilmiştir. Bu yöntemlerin uygulanmasında binaların hem düşey hem de yatay yükler altındaki davranışı esas alınarak gerekli hususlar belirtilmiştir. Bunun yanında, çerçevesi taşıyıcı sisteme sahip düzenli yerinde dökme betonarme binalar için basitleştirilmiş tasarım kuralları TBDY [5] son bölümde detaylandırılmıştır. Bu bölümde, betonarme binaların yatay yük taşıyıcı sisteminin sadece süneklik düzeyi yüksek sistemler için tasarım kuralları belirtilmiştir. Bu kurallar, taşıyıcı sistem elemanları deprem etkileri ve düşey yükler tesirine karşı yeterli moment taşıma gücü ve yeterli kesme dayanımına sahip olması için enkesitlerinin boyutlandırılması ve donatılarının belirlenmesi ile sınırlıdır. Çerçevesi taşıyıcı sisteme sahip betonarme binaların kolon elemanlarının kesit boyutlarının ön tasarımı için TBDY' de bağıntılar mevcuttur. Kolon elemanların emniyetli taşıyabileceği aksenal basınç kuvveti gereksinimi için Denklem (1), yeterli kesme kuvveti dayanımı için Denklem (2) ve yeterli yanal rijitlik sahip olması için gereken minimum kesit alanı veya boyutları Denklem (3) ile elde edilebilmektedir.

$$A_{ci} \geq 0.00014(g+q) \sum A_{0i} \quad (1)$$

$$A_{ci} \geq 0.00022.S_{DS} \cdot (g + 0.3q) \sum A_{0i} \quad (2)$$

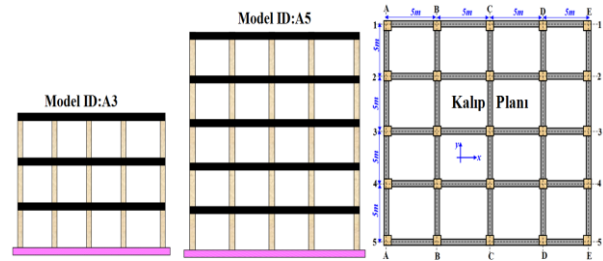
$$\sum (I_i / H_i^2) \geq 4.44 \times 10^{-7} \cdot S_{DS} \cdot (g + 0.3g) \cdot \sum A_{pi} \quad (3)$$

Burada, A_{ci} her bir kolonun enkesit alanı, $(g+q)$ ortalama yayılı sabit ve hareketli yük değerleri toplamı (15 kN/m^2) ve

$\sum A_{0i}$ ise değeri ise göze alınan kolon için kolonun taşıdığı tüm katlar boyunca biriken alan paylarının toplamıdır. S_{DS} değeri, kısa periyot bölgesi için tanımlanmış olan tasarım spektral ivme katsayısı ve $(g+0.3q)$ ortalama yayılı sabit ve hareketli yük değerleri toplamını (13 kN/m^2) ifade etmektedir. I_i değeri bina zemin kat kolonlarının enkesit eylemsizlik momenti, H_i ilgili katın zemine olan yüksekliği ve $\sum A_{pi}$ ise bina kat alanlarının toplamıdır. Verilen denklemlerle tasarım yapılabilmesi için olması gereken ön koşullar TBDY son bölümünde verilmiştir.

2.1 Çerçevesi betonarme model bina

Çalışmada, taşıyıcı sistemi çerçevelerden oluşan, 5 farklı zemin tipi ve DTS' ye göre deprem parametreleri belirlenen, 3 ve 5 katlı 38 adet model bina tasarımı yapılmıştır. Binaların kat alanları eşit olup, her iki doğrultuda 4 açıklığa sahiptir. Açıklık mesafeleri 5 m olarak seçilmiştir (Şekil 1). TBDY' de belirtilen hususlar çerçevesinde, seçilen model binada herhangi bir düzensizlik bulunmamasına, kat planında binanın uzun kenarı en fazla 30 m uzunluğunda, uzun kenarın kısa kenara oranı ise en fazla 4 olmasına, taşıyıcı sistem eksenlerinde süreksizlik veya eksen dışına kayma bulunmamasına, en büyük kiriş açıklığının 7.5 m, en küçük açıklık 3m ve her bir doğrultuda en az iki açıklık bulunmasına, binada 4m den daha büyük kat yüksekliğinin bulunmamasına ve döşeme kalınlığının en az 150 mm olmasına dikkat edilerek tasarımları yapılmıştır. En küçük kolon boyutu 300x300 mm olarak dikkate alınmıştır. Seçilen model binaların tasarımında beton sınıfı C25 olarak dikkate alınmıştır.



Şekil 1. Model binalara ait kalıp planı ve en kesit görüntüleri

3 Yöntem

Çalışmada, kalıp planı ve en kesit görüntüleri verilen düzenli yerinde dökme çerçevesi model betonarme binaların standart ve basitleştirilmiş taban kesme kuvvetleri, kat ötelemeleri ve sınır koşullarının kontrolü için ZA, ZB, ZC, ZD ve ZE zemin türlerine ait deprem spektral ivme katsayıları dikkate alınarak model binaların kolon boyutları belirlenmiştir. Aynı zamanda, deprem tasarım sınıfı (DTS)' ye göre ayrıca spektral ivme katsayıları dikkate alınmıştır (Bk. Tablo 1).

DD-2 için verilen spektral ivme katsayıları, kolon elemanların yeterli kesme dayanımına sahip olması ve yeterli yanal rijitliği sağlaması açısından öngörülen en küçük kesit boyut hesabında kullanılmakla beraber, DD-3 için verilen spektral ivme katsayıları etkin görelî kat sınır koşulunun tahkiki için gerekmektedir. İşlemlerin daha iyi anlaşılabilmesi için tasarlanan A3 ve A5 model binasının

aynı tip kolonları aynı adlandırılmıştır. Köşe kolonlar "C", kenar kolonlar "S" ve orta kolonlar "M" ile ifade edilmiştir. **Denklem (1)**, **Denklem (2)**, ve **Denklem (3)**' de verilen her üç koşulu sağlayan kolon boyutları, zemin sınıfı ve DTS' ye göre **Tablo 2**' de verilmiştir. Model binaların, simetrikliğinden yararlanarak sadece x- doğrultusu için hesaplamalar yapılmıştır. Bu yüzden, kolon elemanların kısa kenarı sabit ($b=0.3m$) tutularak diğer kesit boyutu (h), verilen ön tasarım şartlarını sağlayacak şekilde hesaplanmıştır.

Tablo 1. Tasarım spektral ivme katsayıları

DTS	Zemin	Sds (DD-2)	Sd1 (DD-2)	Sds (DD-3)	Sd1 (DD-3)
1	ZA	1.322	0.362	0.519	0.124
	ZB	0.796	0.163	0.309	0.086
	ZC	1.738	0.599	0.706	0.205
	ZD	1.083	0.517	0.561	0.260
	ZE	0.957	0.637	0.626	0.340
	ZA	0.742	0.182	0.297	0.071
2	ZB	0.598	0.130	0.236	0.056
	ZC	0.657	0.192	0.257	0.079
	ZD	0.503	0.204	0.189	0.077
	ZE	0.562	0.244	0.178	0.092
	ZA	0.402	0.132	0.165	0.044
	ZB	0.422	0.096	0.167	0.039
3	ZC	0.415	0.199	0.148	0.046
	ZD	0.330	0.180	0.130	0.094
	ZE	0.499	0.286	0.204	0.176
	ZA	0.231	0.098	0.098	0.044
	ZB	0.309	0.103	0.133	0.048
	ZC	0.211	0.097	0.079	0.042
4	ZD	0.261	0.156	0.091	0.062

Tablo2. Tasarım sınır şartlarını sağlayan en küçük kolon boyutu

DTS	Kolon ID	ΣA_{oi} (m ²)	h(m) (ZA)	h(m) (ZB)	h(m) (ZC)	h(m) (ZD)	h(m) (ZE)
1	A3_C	18.8	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49
2	A3_C	18.8	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23
3	A3_C	18.8	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4	A3_C	18.8	0.83	0.83	0.83	0.83	-
1	A3_S	37.5	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49
2	A3_S	37.5	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23
3	A3_S	37.5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4	A3_S	37.5	0.83	0.83	0.83	0.83	-
1	A3_M	75	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49
2	A3_M	75	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23
3	A3_M	75	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4	A3_M	75	0.83	0.83	0.83	0.83	-
1	A5_C	31.3	1.76	1.76	1.76	1.76	1.76
2	A5_C	31.3	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45
3	A5_C	31.3	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19
4	A5_C	31.3	0.99	0.99	0.99	0.99	-
1	A5_S	62.5	1.76	1.76	1.76	1.76	1.76
2	A5_S	62.5	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45
3	A5_S	62.5	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19
4	A5_S	62.5	0.99	0.99	0.99	0.99	-
1	A5_M	125	1.76	1.76	1.76	1.76	1.76
2	A5_M	125	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45
3	A5_M	125	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19
4	A5_M	125	0.99	0.99	0.99	0.99	-

Düzenli betonarme binaların ön tasarımı hususunda TBDY' de verilen bağıntılar yardımı ile kolon kesit boyutları verilmektedir. Ancak bu boyutların, binanın deprem performans analizinde yeterli olup olmayacağı hususunda herhangi bir durum ifade edilmemektedir. Yazar tarafından yapılan bir çalışmada [14], sınırlı parametreler dikkate alınarak, ön tasarımında esas kriterleri sağlayan kolon boyutları ile deprem performansı arasında ilişki ortaya konulmuştur. Bu çalışmada, herhangi bir dinamik analiz yapılmaksızın, her DTS ve zemin sınıfına göre belirlenen her bir model binanın kat ötelemeleri ve etkin görel kat sınır koşulu araştırılmıştır.

TBDY kapsamında DD-2 deprem düzeyi spektrum davranışına karşılık gelen elastik taban kesme kuvveti **Denklem (4)**' de ve yöntemiğin son bölümünde belirtilen basitleştirilmiş taban kesme kuvveti **Denklem (5)**' de verildiği şekli ile elde edilmiştir.

$$V_{te}^x = m_t \cdot S_{aR}(T_p^x) \quad (4)$$

$$V_t = \frac{S_{DS} \cdot W_t}{R_a(T)} \quad (5)$$

Standart taban kesme kuvveti hesabında (Bk. **Denklem (4)**) yer alan azaltılmış tasarım spektral ivme katsayısı ($S_{aR}(T)$), yatay elastik tasarım ivmesi ($S_{ae}(T)$) ve deprem yükü azaltma katsayısına ($R_a(T)$) ye göre hesaplanmaktadır. Ancak, **Denklem (5)**' de verilen basitleştirilmiş taban kesme kuvveti hesabında $R_a(T)=4$ alınması zorunlu kılınmıştır. Diğer hesap ayrıntıları detaylı olarak TBDY' de belirtilmektedir. Model binaların her iki taban kesme kuvvetlerine göre görel kat ötelemeleri (Δd_i), etkin görel kat ötelemeleri (δ_i), λ katsayısı ve sınır şartı kontrolü için hesap verileri sırası ile **Denklem (6)**, **Denklem (7)**, **Denklem (8)** ve **Denklem (9)** ile hesaplanmıştır. Betonun elastisite modülü (E_c) değeri **Denklem (10)** verildiği gibidir. Ayrıntılı hesap içerikleri TBDY Bölüm 4.9' de belirtilmektedir.

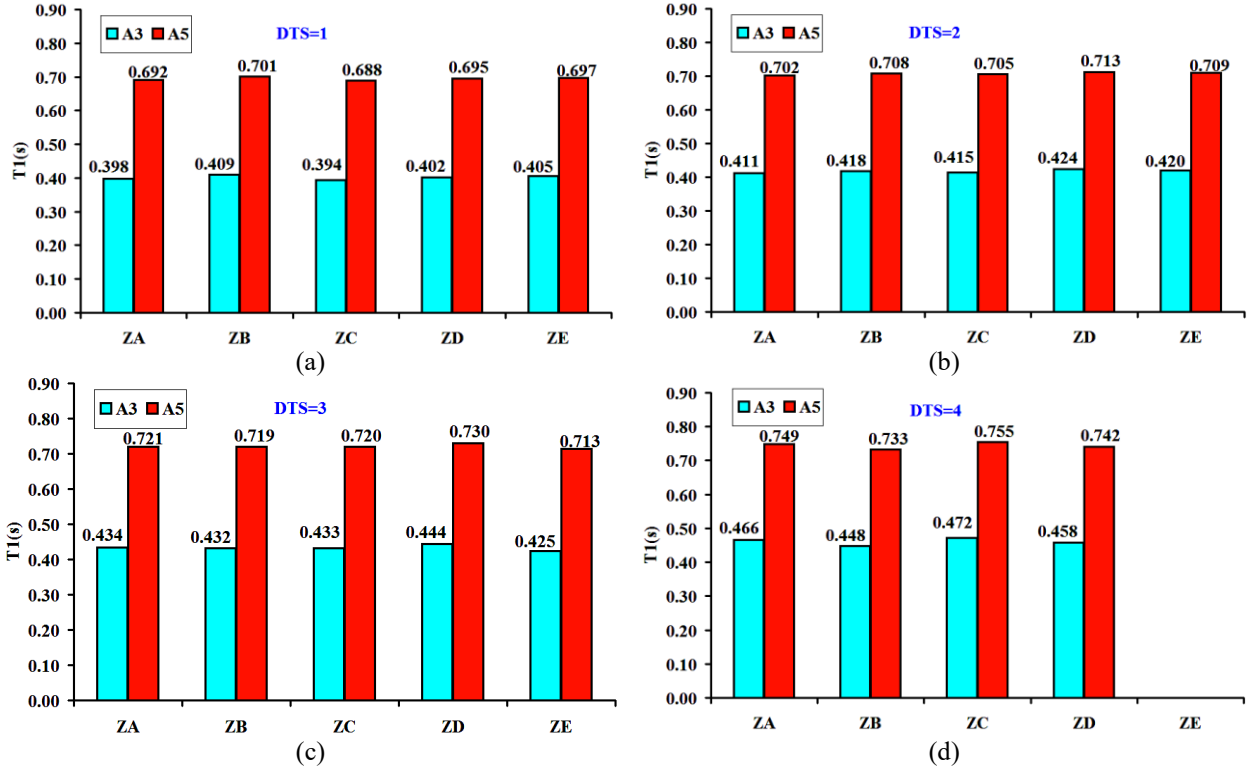
$$\Delta d_i = \frac{V_i h_i^2}{12 E_c \sum D_i} \quad (6)$$

$$\delta_i = \frac{R}{I} \Delta d_i \quad (7)$$

$$\lambda = \frac{S_{ae}(T)^{DD-3}}{S_{ae}(T)^{DD-2}} \quad (8)$$

$$\lambda \frac{\delta_{i,maks}}{h_i} \leq 0.008\kappa \quad (9)$$

$$E_c = 5000 \sqrt{f_{ck}} \quad (10)$$



Şekil 2. Model binaların DTS ve zemin sınıfına göre periyot değişimi

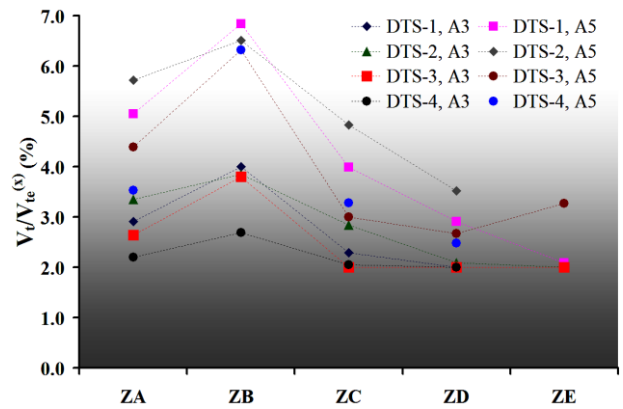
Bu denklemlerde; V_i kat kesme kuvveti, h_i kat yüksekliği, D_i kolonların rijitlik katsayıları olup, TBDY' de hesap ayrıntıları belirtilmiştir. R taşıyıcı sistem davranış katsayısını, I bina önem katsayısını ifade etmektedir. Aynı zamanda κ katsayısı betonarme binalarda $\kappa = 1.0'$ e eşittir. λ katsayısı binanın gözönüne alınan deprem doğrultusundaki hakim titreşim periyodu için TBDY Bölüm 2.2'de tanımlanan DD-3 deprem yer hareketine göre hesaplanan elastik tasarım spektral ivmesinin, DD-2 deprem yer hareketinin elastik tasarım spektral ivmesi'ne oranıdır.

4 Analiz sonuçları

Betonarme bir binanın gerek elastik gerek elastik ötesi davranışının analizi için binanın yerel zemin özelliklerine göre deprem parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Binaların deprem parametreleri, önceki yönetmeliklerde binaların bulunduğu bölgelerin deprem derecelerine göre belirlenirken, TBDY kapsamında neredeyse her bina parseli özelinde tayin edilmektedir. Çalışma kapsamında, farklı deprem tasarım sınıflarının S_{DS} değerlerine göre basitleştirilmiş taban kesme kuvvetleri ve standart deprem spektrumundan elde edilen taban kesme kuvvetleri elde edilmiştir. Çalışmanın içeriğinde belirtildiği üzere, normal bir tasarım ve basitleştirilmiş tasarım ile modellenen bir binanın kat ötelemelerindeki farklılıkların ve etkin görelî kat sınır şartını ne derece sağlandığının araştırılması amaçlanmaktadır. Dolayısıyla, hem standart hem de basitleştirilmiş taban kesme kuvveti değerlerinin değişimi etkin rol oynayacaktır. Taban kesme kuvvetinin de belirlenmesinde bina periyodu oldukça etkili bir

parametredir. Çalışmada belirlenen parametrelere, kolon kesit boyutları dikkate alınarak hesaplanan bina periyotları Şekil 2' de verilmiştir. Deprem tasarım sınıfı ve kat adedine göre Denklem 4 ve Denklem 5' den elde edilen taban kesme kuvvetlerinin değişimi Şekil 3' deki gibidir.

Aynı zemin için farklı oranların çıkması DTS değerlerinin farklılığından kaynaklanmaktadır. Analizlerde kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı (S_{DS}); DTS=1 için $S_{DS} > 0.75$, DTS=2 için $0.75 > S_{DS} > 0.50$, DTS=3 için $0.50 > S_{DS} > 0.33$ ve DTS=4 için $0.33 > S_{DS}$ değerlerine uygun olarak seçilmiştir.



Şekil 3. Tasarım kesme kuvvetlerinin dağılımı

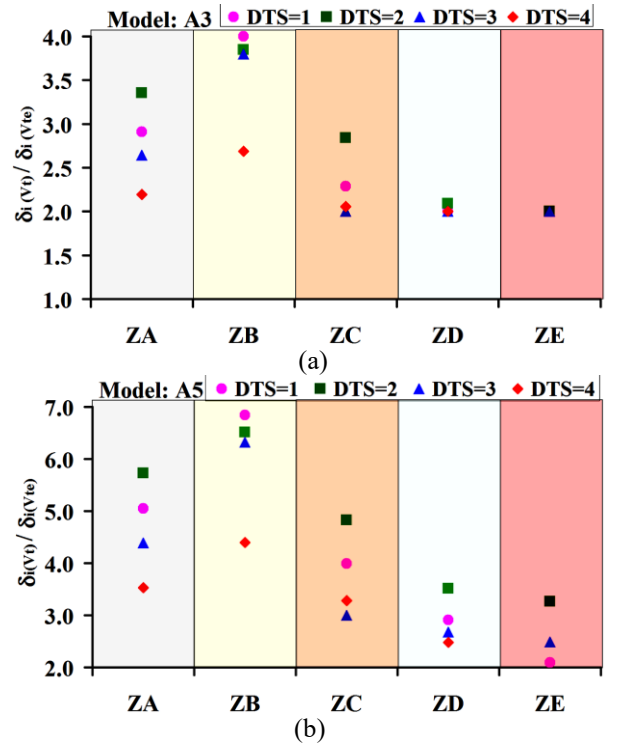
Tablo 3. Model binaların V_t ve V_{te} değerleri

V (kN)	DTS	ZA		ZB		ZC		ZD		ZE	
		A3	A5	A3	A5	A3	A5	A3	A5	A3	A5
V_t	DTS-1	6702.5	11170.9	4035.7	6726.2	8811.7	14686.1	5490.8	9151.4	4852.0	8086.7
	DTS-2	3761.9	6269.9	3031.9	5053.1	3331.0	5551.7	2550.2	4250.4	2849.3	4748.9
	DTS-3	2038.1	3396.9	2139.5	3565.9	2104.1	3506.8	1673.1	2788.5	2529.9	4748.9
	DTS-4	1171.2	1952.0	1566.6	3565.9	1069.8	1783.0	1323.3	2205.5	-	-
V_{te}	DTS-1	2303.0	2211.1	1009.3	983.1	3850.3	3676.1	2745.4	3144.4	2426.0	3862.3
	DTS-2	1121.7	1095.2	788.3	776.2	1172.9	1150.5	1218.6	1209.1	1424.7	1453.2
	DTS-3	771.1	773.5	563.7	564.1	1052.0	1168.2	836.6	1042.5	1265.0	1453.2
	DTS-4	533.4	552.9	583.4	564.1	520.7	543.0	661.6	888.7	-	-

Elastik taban kesme kuvvetinin hem standart hesabında hem de basitleştirilmiş tasarım kuralları çerçevesinde TBDY' de önerilmiş kuvvet hesabında deprem tasarım sınıflarına göre belirtilen S_{DS} değerleri etkin bir parametredir. Çalışma kapsamında, DTS değerleri için belirlenen S_{DS} aralıkları dikkate alınarak, S_{DS} değerleri deprem tehlike haritası [14] üzerinde rastgele yerlerden seçilmiştir. Bu yerlerden elde edilen deprem parametreleri doğrultusunda taban kesme kuvvetlerinin değerlerinde farklılıklar görülebilmektedir. Aynı şekilde, bina periyodunun taban kesme kuvvetinin kat ve zemin türüne göre değişiminde önemli etkiye sahip olduğu anlaşılmaktadır. Model bina hakim titreşim periyotlarının (T_1), spektrum köşe koordinatlarının (T_A , T_B) periyotlarının arasında kalması ile $T_1 > T_B$ durumunda taban kesme kuvvetlerinde büyük değişiklikler görülebilmektedir. Seçilen model binaların yapısal ve karakteristik yapıları farklı seçildiği için, taban kesme kuvvetlerinde farklılıkların görülmesi olağan olmaktadır. Kat adedi, zemin sınıfı ve DTS değerlerine göre basitleştirilmiş hesap ile elde edilen taban kesme kuvveti (V_t) ve eşdeğer deprem yükü hesabı ile elde edilen standart taban kesme kuvveti (V_{te}) değerleri Tablo 3' de verilmiştir. Tablo 3 ve Şekil 3' de görüleceği üzere DTS=4 ve ZE için herhangi bir değer hesabı yapılmamıştır. Bunun sebebi, DTS=4 için $S_{DS} < 0.33$ şartını sağlayan bir bölgenin hemen hemen hiç olmamasıdır. Bina ağırlığı arttıkça taban kesme kuvvetlerinin artması olağan görülmektedir. S_{DS} değerinin artması ile her iki taban kesme kuvvetinde artışların görüldüğü anlaşılmaktadır. Bazı modellerde 3 ve 5 katlı binaların taban kesme kuvvetlerinde bina ağırlıkları ile periyot değerlerinin farkı fazla olmasına rağmen, bina deprem spektrum T_B köşe periyot değerinden sonra ani değişim görünmektedir. Bu yüzden taban kesme kuvvetlerin birbirine yakın olarak çıkabilmektedir. Ancak, V_t ve V_{te} arasındaki fark Tablo 3 ve Şekil 3' de belirgin bir şekilde göze çarpmaktadır.

Bina taban kesme kuvvetlerinin birbirinden farklı olmasının doğal sonucu olarak kat ötelemeleri, görel kat ötelemeleri değerlerinde farklılıkların oluşması tahmin edilebilecek bir sonuçtur. A3 ve A5 modellerine ait rölatif kat öteleme değerleri oransal olarak sırası ile Şekil 4.a ve Şekil 4.b verilmiştir. Buradaki rölatif kat öteleme değerleri (δ_i), V_t ve V_{te} kuvvetlerine göre hesaplanan görel kat ötelemelerinin kat yüksekliğine oranıdır. Anlaşılacağı üzere, V_t elastik kuvvetleri, V_{te} kuvvetlerine göre daha büyük sonuçlar vermesinden dolayı, toplam kat ötelemeleri veya rölatif kat ötelemelerini de büyük oranda

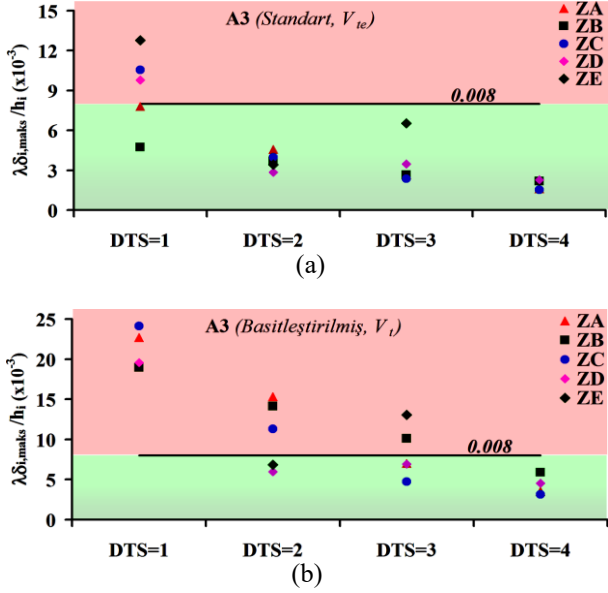
etkilemektedir. Bu farklılık daha ziyade ZB ve ZA zemin türlerinde meydana gelmektedir. Aynı zamanda, DTS=1 ve DTS=2 de tüm zemin sınıfları için daha büyük öteleme farklılıkları meydana gelmektedir. ZE' de spektral ivme katsayısı çok küçük olduğu için taban kesme kuvvetlerinin oluşturduğu rölatif kat ötelemeleri birbirine oldukça yakın çıkmaktadır.



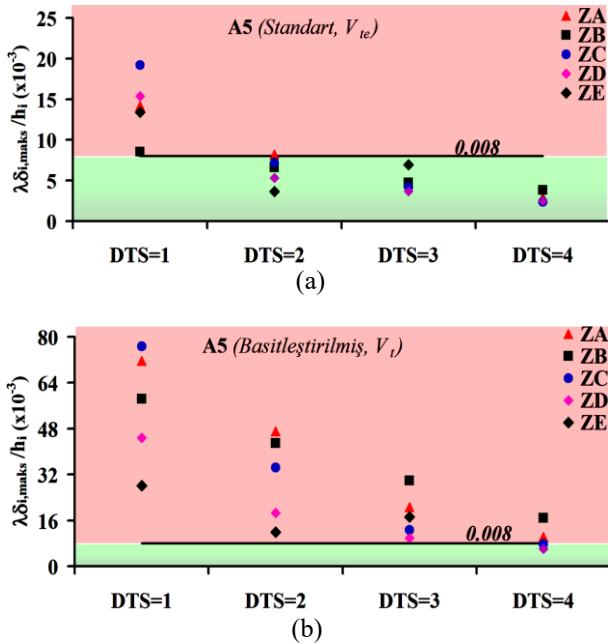
Şekil 4. Rölatif kat ötelemelerin değişimi

TBDY, Bölüm 4.9.1.3' de belirtilen esaslar doğrultusunda, betonarme binaların her kat seviyesi için etkin görel kat ötelemeleri hesaplanarak en büyük değeri tespit edilir. Belirlenen bu değer, DD-2 deprem düzeyi elastik tasarım spektral ivme katsayısının, DD-3 deprem düzeyi elastik tasarım spektral ivme katsayısına oranının kat yüksekliğine bölümü ile çarpılır. Bu çarpım sonucu 0.008κ değeri ile karşılaştırılarak etkin görel kat öteleme kontrolü yapılır. Buradaki κ değeri betonarme binalar için 1 olarak alınır. Eğer, bulunan oran verilen sınır şarttan küçük ise bina öteleme açısından emniyetli olduğu TBDY şartlarında ifade edilebilir.

Çalışmada modellenen 38 adet betonarme bina için etkin görel kat kontrolleri yapılmıştır. A3 ve A5 model binalarının etkin görel kat öteleme sınır şartı kontrolü için elde edilen sonuçlar sırası ile Şekil 5 ve Şekil 6' da verilmektedir.



Şekil 5. Model A3 için etkin görel kat sınır kontrolü



Şekil 6. Model A5 için etkin görel kat sınır kontrolü

Basitleştirilmiş hesap ile elde edilen taban kesme kuvveti, standart hesapla elde edilen elastik taban kesme kuvvetinde daha büyük olması neticesinde, etkin görel kat değerlerinde oldukça farklılıklar meydana gelmektedir. V_{te} kuvveti esas alındığında, hem A3 hem de A5 modelinde çoğu model için etkin görel kat ötelemeleri cihetinden sınır şartı sağladığı görülmektedir. Ancak, V_i kuvveti esas

alınarak hesaplanan etkin görel kat ötelemelerinin birçoğunun sınır şartın üzerinde sonuç verdiği ortaya çıkmaktadır. Çalışmada tasarlanan 38 model binaya ait sınır şartı kontrolü ve etkin görel kat ötelemeleri değerleri Tablo 4' de verilmiştir.

Tablo 4. Etkin görel kat değerleri ve sınır şartı kontrolü

ID	DTS	Zemin	$\lambda_{\delta_{\max}}/h_i$ (V_{te})	Kontrol	$\lambda_{\delta_{\max}}/h_i$ (V_i)	Kontrol
A3	1	ZA	0.0078	✓	0.0227	✗
A3	2	ZA	0.0046	✓	0.0153	✗
A3	3	ZA	0.0026	✓	0.0070	✓
A3	4	ZA	0.0016	✓	0.0035	✓
A3	1	ZB	0.0047	✓	0.0189	✗
A3	2	ZB	0.0037	✓	0.0141	✗
A3	3	ZB	0.0027	✓	0.0101	✗
A3	4	ZB	0.0022	✓	0.0059	✓
A3	1	ZC	0.0105	✗	0.0241	✗
A3	2	ZC	0.0040	✓	0.0113	✗
A3	3	ZC	0.0024	✓	0.0047	✓
A3	4	ZC	0.0015	✓	0.0032	✓
A3	1	ZD	0.0098	✗	0.0196	✗
A3	2	ZD	0.0029	✓	0.0060	✓
A3	3	ZD	0.0035	✓	0.0069	✓
A3	4	ZD	0.0023	✓	0.0045	✓
A3	1	ZE	0.0128	✗	0.0255	✗
A3	2	ZE	0.0034	✓	0.0068	✓
A3	3	ZE	0.0065	✓	0.0131	✗
A5	1	ZA	0.0142	✗	0.0716	✗
A5	2	ZA	0.0082	✗	0.0471	✗
A5	3	ZA	0.0047	✓	0.0206	✗
A5	4	ZA	0.0029	✓	0.0102	✗
A5	1	ZB	0.0085	✗	0.0584	✗
A5	2	ZB	0.0066	✓	0.0429	✗
A5	3	ZB	0.0047	✓	0.0299	✗
A5	4	ZB	0.0038	✓	0.0169	✗
A5	1	ZC	0.0192	✗	0.0767	✗
A5	2	ZC	0.0071	✓	0.0345	✗
A5	3	ZC	0.0042	✓	0.0126	✗
A5	4	ZC	0.0024	✓	0.0077	✓
A5	1	ZD	0.0154	✗	0.0448	✗
A5	2	ZD	0.0053	✓	0.0187	✗
A5	3	ZD	0.0037	✓	0.0099	✗
A5	4	ZD	0.0024	✓	0.0061	✓
A5	1	ZE	0.0134	✗	0.0281	✗
A5	2	ZE	0.0036	✓	0.0119	✗
A5	3	ZE	0.0069	✓	0.0173	✗

5 Sonuçlar

TBDY' nin son bölümünde yer alan düzenli yerinde dökme betonarme binalar için basitleştirilmiş tasarım kuralları yer almaktadır. Çalışma kapsamında, bu tasarım kurallarını asgari düzeyde sağlayacak iki adet 3 ve 5 katlı, 4 açıklıklı taşıyıcı sistemi çerçevelerden meydana gelen model binaların tasarımı yapılmıştır. Kolon elemanların aksel basınç, yeterli kesme kuvveti ve yeterli yanal rijitliği sağlaması için TBDY' de ön görülen en küçük kolon kesit boyutları dikkate alınarak her bir model binanın tasarımı yapılmıştır. Farklı zemin ve deprem sınıfları dikkate alınarak model binaların farklı varyasyonları ile toplamda 38 adet model bina oluşturulmuştur. TBDY' de

Bölüm 4.7' de ifade edilen her bir spektrum için elde edilen eşdeğer deprem yükü, yani elastik taban kesme kuvveti değerleri ile TBDY' de Bölüm 17.5' de ön tasarım esaslarına bağlı kalmak şartı ile kullanılabilir basitleştirilmiş taban kesme kuvveti hesabı ayrı ayrı yapılmıştır. Basitleştirilmiş taban kesme kuvveti hesabında, deprem yükü azaltma katsayı değeri $R_a=4$ alınması zorunlu kılındığından dolayı, basitleştirilmiş taban kesme kuvveti, eşdeğer deprem yükü değerinden oldukça fazla çıkmaktadır. Bu farklılıktan dolayı, bina kat ötelemeleri ve görelî kat ötelemelerinde ciddi farklılıklar oluştuğu göz önüne serilmiştir. Model binaların kolon ve kiriş kesitleri aynı olmasına rağmen, dikkate alınan her iki taban kesme kuvvetinin etkin görelî kat değerlerinde büyük oranda aynı etkiyi yapmadığı görülmüştür. Standart hesapla elde edilen taban kesme kuvveti dikkate alınarak yapılan etkin görelî kat sınır şartını model binaların %76 sağlarken, %24'ü sağlamamaktadır. Basitleştirilmiş hesapla elde edilen taban kesme kuvveti dikkate alınarak yapılan etkin görelî kat sınır şartını model binaların %28 sağlarken, %72'ü sağlamamaktadır.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] ATC (Applied Technology Council), Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. ATC-40, Rep. No. SSC 96-01. West Sacramento, CA: California Seismic Safety Commission, 1996.
- [2] FEMA 273, NEHRP Guidelines For The Seismic Rehabilitation of Buildings. Developed by the Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., USA, 1997.
- [3] FEMA-356, Prestandart and Commentary for Seismic Rehabilitation of Buildings. Washington, D.C., 2000.
- [4] DBYBHY, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara, 2007.
- [5] TBDY, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Türkiye Cumhuriyeti İçişleri Bakanlığı, AFAD Yönetimi Başkanlığı, Ankara, 2018.
- [6] A.C. Pay, A new methodology for the seismic vulnerability assessment of existing buildings in Turkey. M.S. dissertation, Dept. of Civil Engineering, Middle East Technical Univ., Graduate School of Natural and Applied Sciences, Turkey, 2001.
- [7] H. Tekeli, H. Dilmaç, F. Demir, M. Gencoglu, and K. Guler, Shear stress indicator to predict seismic performance of residential RC buildings. Computers and Concrete, 19(3), 283–291, 2017. <https://doi.org/10.12989/cac.2017.19.3.283>.
- [8] H. Dilmaç, Preliminary assessment approach to predict seismic vulnerability of existing low and mid-rise RC buildings. Bulletin of Earthquake Engineering, 18(7), 3101-3133, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10518-020-00809-z>.
- [9] A. Gündoğay, H. Ulutaş ve H. Tekeli, Mevcut atölye binalarının deprem güvenliğinin incelenmesi. DÜMF Mühendislik Dergisi, 10:2, 755-768, 2019. <https://doi.org/10.24012/dumf.432136>.
- [10] A. Yakut, Capacity related properties of RC frame buildings in Turkey. J. Earthquake Engineering, 12 (S2): 265–272, 2008. <https://doi.org/10.1080/13632460802014295>.
- [11] P. Gülkan and M. A. Sozen, Procedure for determining seismic vulnerability of building structures. ACI Structural Journal, 96 (3): 336–342, 1999.
- [12] B. Balun, Ö.F. Nemutlu ve A. Sarı, TBDY 2018 Basitleştirilmiş Tasarım Kurallarının Taban Kesme Kuvvetine Etkisinin İncelenmesi. Türk Doğa ve Fen Dergisi 9.Özel Sayı: 173-181, 2020. <https://doi.org/10.46810/tdfd.749257>.
- [13] Türkiye Deprem Tehlike Haritası, AFAD Başkanlığı. <https://deprem.afad.gov.tr/deprem-tehlike-haritasi> Erişim tarihi: 01.04.2020.
- [14] H. Dilmaç, Çerçeve betonarme binaların TBDY kapsamında ön tasarımı. 3. International Symposium of Engineering Applications on Civil Engineering and Earth Sciences, sayfa 103-110, Karabük, Türkiye, 22-24 Ekim 2021.





Çelik basınç çubuklarında bazı güçlendirme türlerinin basınç dayanımı kapasitelerine katkısının deneysel araştırılması

Experimental investigation of contribution of some strengthening types to compressive strength capacities in steel braces

Oğuz Düğenci^{1,*} 

¹ Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 38039, Kayseri, Türkiye

Özet

Eksenel basınç etkisindeki çelik elemanlar burkulma olmayacak şekilde tasarlanır. Ancak yapının kullanım amacının değişmesi veya performans hesapları sonrasında yapının istenilen dayanımları sağlamadığı durumlarda güçlendirilmesi gerekebilir. Bu çalışmada, belirli narin enkesite sahip basınç çubuğu referans alınarak, çubuğun zayıf eksen ataletinin artırılmasına yönelik dört farklı güçlendirme uygulanmıştır. Bunlardan üçü çelik plaka ilavesi, dördüncüsü CFRP sargı yapılmasıdır. Çelik güçlendirmelerin biri kaynaklı diğer ikisi ise bulon destekli güçlendirmedir. Güçlendirilmiş test numuneleri hazırlanan bir düzende, yarı statik tersinir tekrarlı eksenel kuvvete maruz bırakılmıştır. Test sonucunda eksenel kuvvet-boyuna deformasyon eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen verilerle taşıma kapasiteleri, yer değiştirme kapasiteleri, burkulma yükleri, enerji yutma kapasiteleri ile süneklik parametreleri karşılaştırmalı olarak ortaya konulmuştur. Deneysel sonucunda ek levhaların gövde boyunca kaynaklanmasıyla güçlendirilen kaynaklı numunenin, burkulma dayanımında en büyük artışı gösterdiği, ancak çekmede daha erken göçtüğü görülmüştür. Diğer numunelerin basınç dayanımına katkısının düşük seviyelerde kaldığı görülmüş olup, buna karşılık yapılacak iyileştirmelerle daha iyi performansa ulaşılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Çelik basınç çubuğu, Çelik eleman güçlendirme, Burkulma dayanımının artırılması, Enerji yutma kapasitesi, Histeresis eğrisi, Enerji sünekliği,

1 Giriş

Basınca maruz elemanlarda yapısal beklenti, üzerlerine gelen eksenel basınç kuvvetini burkulmadan bir sonraki taşıyıcı elemana veya mesnete iletebilmesidir. Bu durumda yapısal güvenlik basınç çubukları için sağlanmış olmaktadır. Basınç çubukları çelik yapılarda deprem perdeleri olarak görev yapan çapraz elemanlar ve kafes sistemlerdeki basınca çalışan elemanlardır (Şekil 1).

Bir basınç çubuğunun eksenel basınç kuvveti taşıma seviyesi, projelendirmesi sonucunda ortaya konulur. Çubuğun sahip olacağı bu basınç kapasitesi seviyesi, sadece tek hadde profillerin kullanılmasıyla belirli mertebelere

Abstract

Steel members under the effect of axial compression are designed in such a way that there is no buckling. However, these elements should be strengthened in cases where the purpose of use of the structure changes or the building performance does not provide the desired strengths. In this study, four different strengthening were applied to increase the weak moment of inertia of the members by reference to the braces with a certain slender cross-section. Three of them are steel plate addition and the fourth is CFRP wrapping. One of the steel strengthening is welded and the other two are bolt supported strengthening. Strengthened test specimens were subjected to quasi-static cyclical axial loading with a prepared setup. As a consequence of the test, axial force-axial deformation curves were obtained. With the obtained data, bearing capacities, displacement capacities, buckling loads, energy dissipation capacities and ductility parameters are presented comparatively. As a result of the experiments, it was seen that the sample strengthened by welding the additional plate along the body caused the greatest increase in buckling strength compared to the reference sample, but it caused earlier failure in tensile. It was concluded that the contribution of the other samples to the compressive strength remained at low levels, but better performance could be achieved with improvements.

Keywords: Steel braces, Strengthening of steel members, Buckling strength, energy dissipation capacity, Hysteresis curve, Energy ductility

kadar sağlanabilir. Çok fazla eksenel basınç kuvvetinin etkimesi durumunda, çubuklara ilave sargı yapılması veya basınç çubuklarının burkulması önlenmiş basınç çubuğu (buckling restrained braced-BRB) [1-5] biçimde tasarlanması gerekir. Böylelikle çubuk, çekme ve basınç etkisinde burkulmadan ve sünek davranışla etkiyen yükleri karşılayabilecektir. BRB ile ilgili çalışmalar, ilk olarak 1970'li yılların başında başlamıştır [6-8]. Farklı kesit ve sargı çeşitleriyle hala davranışın iyileştirilmesi yönünde çalışmalar devam etmektedir.

BRB kesitleri, çelik yapı projesindeki gereksinime bağlı olarak, yapının üretimi öncesinde tasarlanır ve atölye ortamında üretilebilir. Ancak üretimi gerçekleştirilmiş bazı

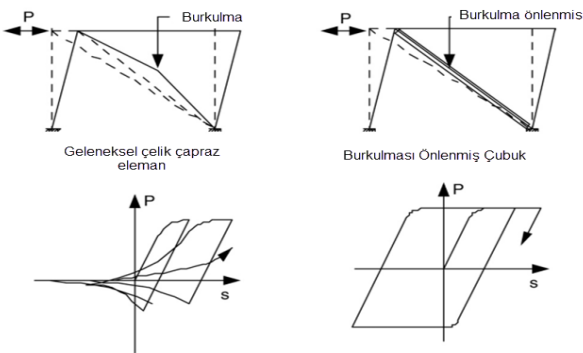
* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: dugenci@erciyes.edu.tr (O. Düğenci)

Geliş / Received: 03.09.2021 Kabul / Accepted: 17.11.2021 Yayımlanma / Published: 14.01.2022

doi: 10.28948/ngumuh.990509

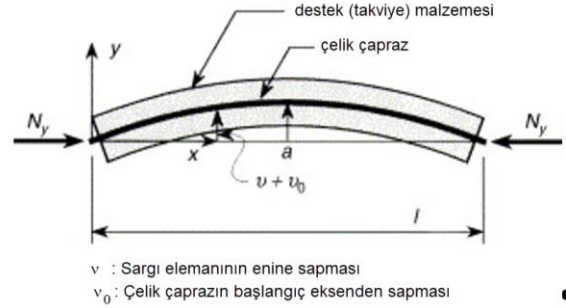
yapılarda kullanım amacındaki değişiklik ve sonradan ilave yüklere maruz kalınması vb. durumlarda, taşıyıcı elemanların taşıma kapasitelerinin artırılması gerekebilir. Kullanım amacındaki değişikliklerde önceki yönetmeliklerde olduğu gibi TÇYY-2016 [9] ve TBDY 2018 [10] 'e göre ve diğer Eurocode 3 (TS EN 1993-1-1) [11, 12] ve ANSI/AISC 360-16 [13] gibi yabancı standart ve şartnamelere göre de sistemin sismik performansının artırılması için önerilen yöntemler ile hem sistem bazında hem de eleman bazında güçlendirilmesi önerilmektedir. Özellikle basınca çalışan elemanların güçlendirilmesinde, burkulmanın önlenmesi için elemanın BRB'nin tasarımına benzer dış sargılarla sarılarak güçlendirilmesi sağlanmalıdır.

Taşıyıcı sistem malzemesine göre güçlendirmeler farklılıklar gösterir. Malzeme özelliğine ve birleştirme vasıtalarının birleşimde gösterdiği kolaylığa bağlı olarak çelik sistem güçlendirmeleri, betonarme sistemlere göre daha kolaydır. Betonarme sistemlerin çelik elemanlar ve sistemler ile güçlendirilmesi de yaygın kullanılan bir yöntemdir ve yönetmeliğimiz kapsamında önerilmektedir [14]. Genellikle geleneksel çelik yapı elemanı güçlendirme yöntemleri, çoğu zaman yapısal elemanını söküp değiştirmek veya dışardan (sargı veya kaynaklı) çelik plaka veya profil ilave edilmesiyle gerçekleştirilir [15]. Bu yöntem sırasıyla, kaynak veya cıvatalı bağlantı onarım işleri, daha fazla yorulma sorunu ve uzun montaj süresi nedeniyle uygun bir çözüm olamayabilir [16]. Bununla birlikte kesit kayıpları veya malzemede gevrekleşme gerçekleşebileceği gibi, kesite profil ve plaka ilavesi ağır kaldırma ekipmanları gerektirir ve yapıya daha fazla ölü yük ekler. Eklenen çelik plakalarında korozyona karşı hassaslığı dikkate alınmalı ve bunun gelecekteki bakımlarda maliyetlerin artmasına neden olabileceği düşünülmelidir [16, 17]. Çoğu durumda, kaynaklarla ilgili yorulma sorunları nedeniyle kaynak, istenen bir çözüm değildir [18]. Bu gibi geleneksel yöntemlerin yanı sıra fiber takviyeli polimer (FRP) ile sargılı güçlendirme çalışmaları da yapılmaktadır [3, 16, 17, 19]. Hem burkulması önlenmiş basınç çubukları hem de diğer sargı çalışmalarında amaç, çelik elemanların çekmede gösterdiği performansı basınç altında da gösterebilmesini sağlamaktır (Şekil 1.)



Şekil 1. Geleneksel basınç çubuğu ile burkulması engellenmiş basınç çubuğunun aksel kuvvet-deplasman ilişkisi [2, 20, 21]

Literatürdeki bütün sargı ve kesitin büyütülmesi çalışmaları, basınç altında burkulma dayanımının artırılmasına yöneliktir. Mevcut üretimi yapılmış basınç elemanlarının basınç kapasiteleri, burkulma dayanımının artırılması esasına göre yapılmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. Sargılı çelik çaprazın şekil değiştirme durumu [2,20]

Kesit ortasında yanal yer değiştirmenin önlenmesi, burkulmanın önlenmesi anlamına gelir. Ancak aksel yükü bünyesinde barındıran esas basınç çubuğunun (çekirdek eleman) başlangıçta sargı profiline veya sargı sistemine (çelik tüp ve beton sargı) yaslanması için gerekli bir boşluk bulunmalıdır. Bu boşluk enkesitin akma sınırını geçmeyecek şekilde çubuk ortasının bir başlangıç sapması (yer değiştirmesi) (v_0) yapacak nitelikte olmalıdır. Aksel kuvvetin artışına bağlı bu başlangıç sapması sargı elemanının da desteğiyle birlikte tüm sistemin enine yer değiştirmesinin (v) artışına sebep olur [2, 22].

Bir sistemin güçlendirilmesinde bir nevi sönümleyici niteliğinde olan BRB'lerin sonradan yapıya ilavesiyle güçlendirme elemanı olarak kullanılması mümkündür. Bir yapının çelik perdelerle güçlendirilmesi gerektiğinde bu elemanlar rahatlıkla kullanılabilir. Ancak eleman bazında güçlendirme yapılması gerektiğinde, montajı tamamlanmış ve kullanılmakta olan bir çelik basınç çubuğunun, burkulması önlenmiş basınç çubuğuna dönüştürülmesi zordur. Bu zorluk üretimdeki zorluğun yanı sıra, kesitin beton dolu ağırlığının sisteme ilave yük şeklinde etkimesi gibi bir olumsuzluğu da yanında getirmektedir. Özellikle çatı kafes kirişlerinde bu durum daha da güç bir hal almaktadır. Bu bağlamda bahsedilen türdeki elemanların güçlendirilmesi çalışmanın temelini oluşturmaktadır.

Bu çalışma, mevcut basınca çalışan çelik elemanların, çelik levha ve karbon elyaf takviyesiyle güçlendirilmesini esas alarak aksel basınç dayanımı kapasitelerinin artırılmasını amaçlamaktadır. Bu kapsamda üretimi tamamlanmış basınç çubuklarının (özellikle kafes kirişlerdeki) güçlendirilmesi düşünüldükçe, farklı güçlendirme teknikleri aynı kesit ve malzeme üzerinde denenmiştir. Güçlendirme uygulaması CFRP sargı, levha kaynaklanması ve iki farklı geometride bulonlu levha ilavesi olarak dört farklı şekildedir. Bütün test numuneleri tersinir tekrarlı aksel yükleme maruz bırakılmıştır. Deney verileri, test düzeneğinde kullanılan yük hücresi ve yer değiştirme ölçerler yardımıyla elde edilmiştir. Elde edilen verilerle yapısal elemanın karakteristik burkulma kapasiteleri,

süneklikleri ve enerji tüketim kapasiteleri ortaya konulmuş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

2 Materyal ve metot

2.1 Test numuneleri

Deneylerde referans basınç çubuğuyla birlikte toplam beş adet numune test edilmiştir. Bütün deney numuneleri (güçlendirilen esas çubuk) 10 mm kalınlığında aynı levhadan plazma yardımıyla kesilen parçalardan teşkil edilmiştir. Referans basınç çubuğu ile çelik güçlendirme levhaları aynı malzemedir. Referans numunesinin ortası dikdörtgen formda ve 65×10 mm enkesitlidir. Başlık bölgeleri, orta bölgesine göre daha geniş enkesitli (85×10 mm) olup aynı zamanda hem rijitlik kazandırmak hem de deney düzeneğine artı şeklindeki kanala bağlantı sağlaması amacıyla 410×35×10 mm ölçülerinde iki adet levha kaynakılarak artı en kesit formuna getirilmiştir. Uygulanan kaynak kalınlığı 4 mm'dir. Bu ölçülerdeki profil, bütün test numuneleri için esas çubuk niteliğindedir ve güçlendirmeler bu kesite yapılmıştır. Numunelerin isimlendirmeleri ve açıklamaları Tablo 1'de, numune ölçü ve görünümü ise Şekil 3 ve Şekil 4'de verilmiştir.

Tablo 1. Numune adlandırması ve açıklamalar

Numune Adı	Güçlendirme Şekli (Orta bölge Güçlendirmesi)
B-REF	---
B-W	2 adet 40×1080×10 mm levhanın kaynaklı bağlanmasıyla
B-CFRP	Çift yönlü CFRP kumaşının iki kat sarılmasıyla
B-B/1	2 adet 40×1080×10 mm levhanın üç adet bulonla bağlanmasıyla
B-B/2	2 adet 40×1080×10 mm levhanın üç adet bulonla bağlanmasıyla

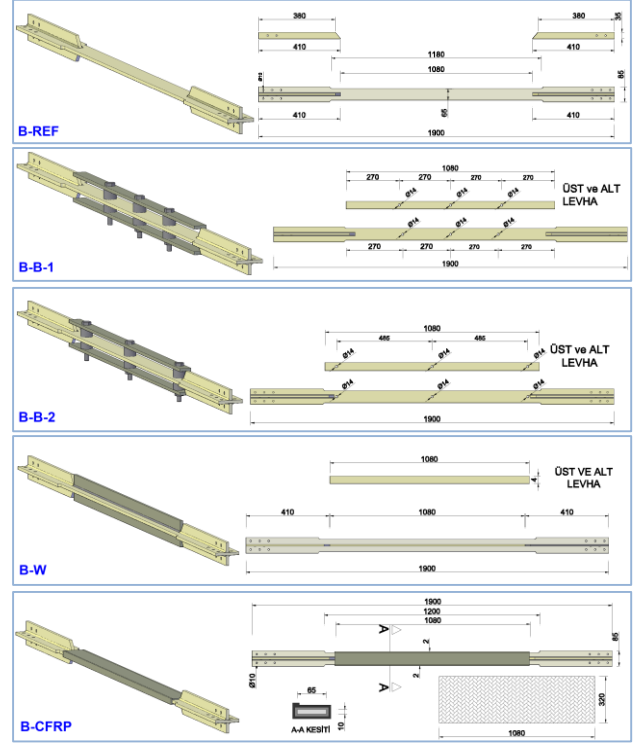


Şekil 3. Test numunelerinin deney öncesi görüntüleri

2.2 Malzeme özellikleri

2.2.1. Çelik malzemesi

Deneylerde kullanılan çelik malzemelerinin tamamı (esas basınç çubuğu ve güçlendirme levhaları) 10 mm kalınlığında çelik levhadan kesilerek oluşturulmuştur. Bu levhadan yine TS EN ISO 6892-1'e [20] göre çekme numuneleri uygun boy ve gerilme yığılması oluşmayacak şekilde eğrisel çapla inceltilerek hazırlanmıştır (bkz. Şekil 5.). Kalibrasyonlu çekme cihazında çekme testine tabi tutulan malzemelerin mekanik özellikleri Tablo 2'de verilmektedir.



Şekil 4. Test edilen elemanların görünümü ve ölçüleri (ölçüler mm'dir)



Şekil 5. Deney numunelerinin görünümü
(a) Deney öncesi ve (b) Deney sonrası

Tablo 2. Çelik malzemenin karakteristik özellikleri

Numune	Genişlik	Kalınlık	Akma Dayanımı	Çekme Dayanımı	Uzama
	(mm)	(mm)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	
No 1	9.7	21.4	660	708	16.2
No 2	9.7	20.9	647	702	16.5

2.2.2. CFRP malzemesi ve uygulaması

Karbon takviyeli güçlendirme için tek yönlü CFRP malzemesi kullanılmıştır. CFRP malzemesi her yüzeyde 2 kat olacak şekilde 20 mm lik bindirme boyu hesaba katılarak çubuk gövdesi boyunca sarılması için 1080×320 mm lik CFRP parçası kesilerek yapıştırma işlemine hazır hale getirilmiştir. Astar ve yapıştırma malzemeleri Mape-Wrap markadır. Yapıştırılacak yüzeyin toz vb. maddelerinden arındırılması amacıyla üreticinin tavsiye ettiği şekilde hassas terazide tartım yapılarak epoksi astarı çubuk gövdesi boyunca uygulanarak kurumaya bırakılmıştır. Epoksi astarının kurumasından sonra epoksi uygulamasına geçilerek Mape Wrap 31 Comp A ve B karışım malzemelerinden toplam 75 gram epoksinin 32.5 gramı çubuk yüzeyine, kalanı ise CFRP malzemesinin üzerine yedirilmiştir. Aralarında hava boşluğu kalmayacak şekilde yüzeye baskı yapılarak,

numune ve CFRP malzemesinin ilk yapışması sağlanmış ve ardından kurumaya bırakılmıştır. Daha sonra alt tarafın ilk katı için de 75 gram epoksi kullanılarak aynı işlemler uygulanmıştır. Son olarak tüm çubuğun ikinci katını uygulamak için hazırlanan 400 gr epoksi reçinesinin 200 gramı önce numune yüzeyine geri kalan kısmı 200 gram ise CFRP malzemesinin üzerine, aralarında hava boşluğu kalmayacak şekilde yapılmıştır. Bu haliyle 5 gün boyunca kurumaya bırakılmıştır.

2.2.3. Bulon ve destek pulları

Esas çubuklar, bağlantı levhalarına, M10 çaplı 8.8 sınıfında bulonlarla bağlanmıştır. Bağlantı bulonlarının haricinde, bulonlu güçlendirme tasarımında üçer adet M14 8.8 sınıfında bulon kullanılmıştır. Bulonlar güçlendirme levhaları arasında sabit bir mesafe sağlanması adına Şekil 6.'da gösterilen, ortalarından bulonların geçeceği çapta delik açılmış 40 mm çapında 30 mm boyunda pullar (silindirler) kullanılmıştır.



Şekil 6. Bulonlu güçlendirmede kullanılan parçalar

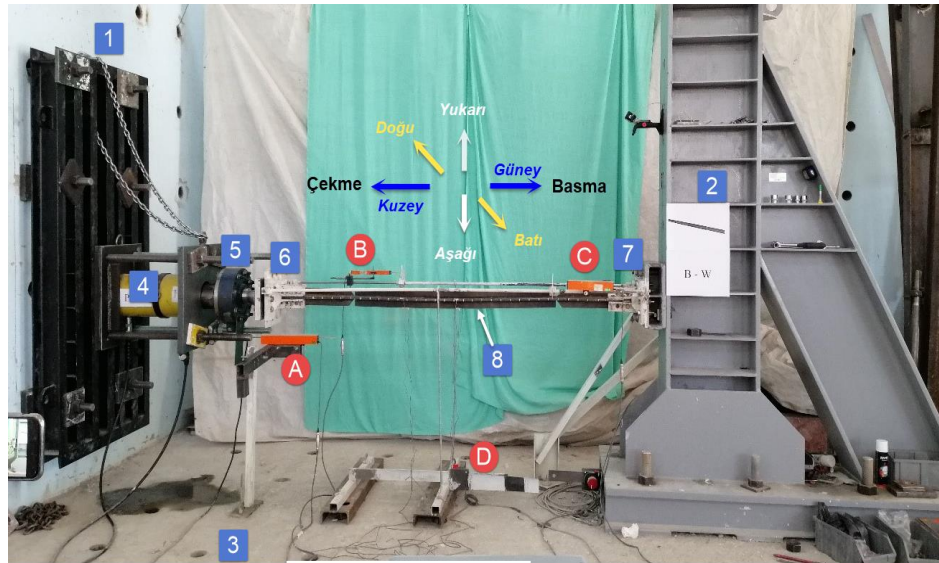
2.3 Test düzeneği ve kullanılan cihazlar malzeme özellikleri

Çelik çaprazlar ve basınç çubukları ile yapılan çalışmalarda üç farklı yükleme düzeneği kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi test numunesinin düşey doğrultuda yerleştirildiği düzenek, ikincisi yatay konumda yerleştirildiği düzenek [21, 23], üçüncüsü ise çapraz eleman olarak başka bir kolon veya çerçeve sisteme bağlanan

düzenektir [23]. Bu çalışmada seçilen deney düzeneği, basınç çubuklarının yatay konumda ve eksenel normal kuvvetle yüklenmesini sağlayacak şekilde düzenlenmiştir ve bu düzenek tek eksenli deney düzeneği olarak adlandırılmaktadır [23]. Sistemin her iki ucu ötelenmeyi önleyen rijit yükleme duvar ve rijit çelik destek kolonuna bağlanmaktadır. Bu sayede uygulanan kuvvet basınç çubuğuna etki ettirilmiş olup bütün deformasyonlar basınç çubuğunda gerçekleştirilmektedir. Deney düzeneğinin görünümü Şekil 7'de verilmiştir.

Eksenel yükleme hidrolik pistonla bağlı manuel krikoyla yükleme hızı sabit tutularak (yaklaşık 1,5 kN/sn) uygulanmıştır. Hidrolik krikonun ucunda 1000 kN kapasiteli ve kalibrasyonlu yük hücresi montajlanmıştır. Yük değerleri bu cihaz yardımıyla elde edilmiştir. Test numunelerinin her iki ucu numuneler için özel üretilen çelik plakalarına 10'ar adet M10 8.8. sınıfı civata ile bağlıdır. Bağlantı plakaları da 6'şar adet M16 8.8. sınıfı bulonla çelik kolona ve yük hücresi bağlantı parçasına bağlıdır.

Deneylerde yük değerleri yük hücresiyle, yer değiştirme ölçümleri (boy uzama ve kısalması) ise deplasman ölçerler (LVDT- linear variable differential transformer) kullanılarak ölçülmüştür. LVDT deney düzeneğinde 3 adet kullanılmaktadır. Bunlardan ikisi numunenin doğu ve batısına yerleştirilmiştir. Toplam boy değişimini ölçebilecek şekilde montajlanan bu cihazlar, eksenel boy değişimini her iki yönden ölçmektedir. Üçüncü LVDT ise çıkış mesafesi ile boy kısalmasının kontrolü için piston çıkışına yerleştirilmiştir. Bunun yanı sıra, numune ortasının eksen dışı yer değiştirme değerini (eksenden sapma) ölçmek adına, başka bir deplasman ölçer olan ipli potansiyometre (İP) kullanılmıştır. Çubuk üzerinde gerilme değişimlerini belirlemek amacıyla tek yönlü strain gaugeler (SG) yapıştirilerek gerilim değişimleri ölçülmeye çalışılmıştır.



1 Rijit Yükleme Duvarı
2 Rijit Çelik Destek Kolonu
3 Rijit Platform
4 Hidrolik Piston
5 Yük Hücresi
6 Bağlantı Plakası/kuzey
7 Bağlantı Plakası /güney
8 Test Numunesi
A LVDT (Piston çıkışı)
B LVDT (Eksenel Deplasman /doğu)
C LVDT (Eksenel Deplasman /batı)
D İP (Eksen dışı deplasman)

Şekil 7. Deney düzeneği

2.4 Test protokolü

Yapısal eleman deneylerinde test numuneleri iki farklı şekilde yükleme prosedürüne tabi tutulabilir. Bunlardan ilki yük kontrollü yükleme, ikincisi yer değiştirme kontrollü yüklemedir. Her iki yükleme durumu için farklı ülkelerin ECCS (1986) [24], ATC-24 (1992) [25], FEMA-461 (2007) [26], JISF (2002) [27] ve ANSI/AISC 341-16 (2016) [21] gibi yönergeleri/şartnameleri bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında FEMA 461 kapsamında tavsiye edilen deplasman kontrollü yükleme prosedürü kullanılmıştır [5, 26].

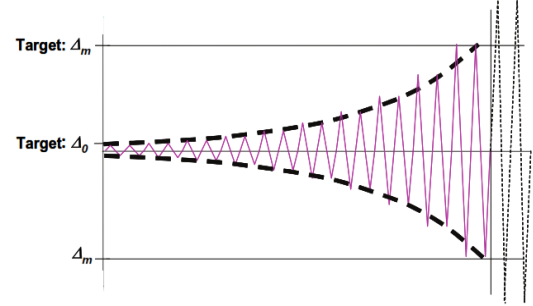
FEMA 461 kapsamında Protocol I ve II olmak üzere iki farklı yükleme protokolü yer almaktadır. Bunlardan birincisi yarı-durağan yükleme testi (quasi-static loading test), ikincisi sarsma tablası testidir (shake table test). Protokol I kapsamında, yükleme geçmişi tek yönlü (unidirectional) test, iki yönlü (bidirectional) test ve kuvvet kontrollü (force controlled) testi olmak üzere üç farklı yükleme prosedürü verilmektedir. Tek yönlü test, yalnız bir adet numune kullanılacaksa uygun bir dögüsel deneyin gerçekleştirilmesi amacıyla uygulanması gereken yükleme aşamalarını tarif etmektedir. Tek yönlü yüklemede referans değer olarak Δ_m ve Δ_0 değerlerinin hesaplanması gerekmektedir.

Δ_0 =Yükleme geçmişinin hedeflenen en küçük deformasyon genliğidir (adımıdır). Bu değer ilk olarak gözlenen en düşük hasar durumundaki genlikten güvenli bir şekilde daha düşük olmalıdır. En düşük hasar durumuna kadar en az 6 dögü gerçekleştirilmiş olmalıdır. Eğer başlangıç hasarı için deformasyon genliği ile ilgili mevcut data bulunmuyorsa, tavsiye edilen Δ_0 değeri 0.0015 civarındadır. (Δ_0 , kat ötelenme indeksi bakımından δ/h tir)

Δ_m = Yükleme geçmişinin hedeflenen maksimum deformasyon genliğidir. Bu değer deneyden evvel hesaplanmalıdır. Bu değer esas deneyler öncesinde yapılacak monotonik deney yardımıyla hesaplanabilir. Eğer hedeflenen değerden daha küçük bir ötelenmede en şiddetli hasar başlar ise, gerçek hasar başlangıç değerindeki kümülatif hasar etkisinin aslında numunenin tam yükleme geçmişinde gerçekleştiği ile karşılaştırılıp karşılaştırılamayacağını değerlendirmek için bir karar alınmalıdır. Eğer en şiddetli hasar durumu hedef değerde henüz ortaya çıkmamış ise yükleme geçmişi 0.3Δ kadar genlikte daha ileri artışlar kullanılarak devam ettirilmelidir. Önerilen bu genlik değeri monotonik deney sonuçları gibi kanıtların eksik olması durumunda 0.03 'tür. (kat ötelenmesi bakımından, δ/h), [5, 26]

Şekil 8.'de gösterildiği gibi yükleme geçmişi aşamalı artan deformasyon genliğinde tekrarlanan dögülerden oluşmaktadır. Her genlikte (adımda) 2 dögü yapılmalıdır. Uygulanacak yer değiştirme (veya ötelenme) büyüklüğü (genliği, adımı) yükleme başlangıcındaki $a_1=0.0048\Delta_m$ değerinden alınmalıdır. Başka bir deyişle a_i dögü genliğini ifade edecek olursa, birinci genlik a_1 , Δ 'ya eşit (veya çok yakın bir değer), ve son planlanan genlik a_n , Δ_m 'e eşit olmalıdır (veya çok yakın bir değerdedir). Tablo 3'de FEMA 461'de [26] verilen bağıl yükleme geçmişi yer değiştirme

genlikleri verilmektedir. $a_1=0.0048\Delta_m$ değeri için yük geçmişi grafiği Şekil 8'de verilmektedir.



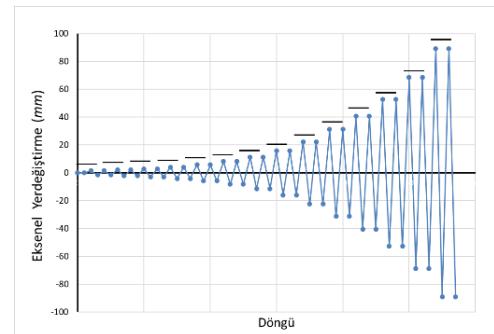
Şekil 8. Önerilen yükleme geçmişinin kavramsal diyagramı [26]

Tablo 3. Bağıl yükleme geçmişi yer değiştirme genlikleri (FEMA461 2007) [26]

n	13	12	11	10	9	8	
a/a_n	0.018	0.025	0.035	0.048	0.068	0.095	
n	7	6	5	4	3	2	1
a/a_n	0.133	0.186	0.260	0.364	0.510	0.714	1.000

Genlik artışı bir önceki genliğin 1,4 katı olacak şekilde yapılır. Bu şekilde yapılan yükleme durumunda yükleme geçmişindeki adım veya artış sayısını ifade eden dögü artış sayısını gösterir n değeri >10 olmalıdır. Her bir genlik değerinde 2 dögü yapılacağından toplam dögü sayısı en az 20 olmalıdır.

Bu çalışmada monotonik deney yapılmayıp başlangıç akma değeri, çekme testi ile ölçülen çelik malzemesinin akma dayanımı dikkate alınarak belirlenmiştir. Belirlenen akma değeri ve akma uzaması değeri dikkate alınarak esas numunenin boyuna göre orantılanmış ve numune Δ_0 akma genliği (akma uzaması) 1,51 mm bulunmuştur. 1,4 katı dikkate alınarak geçmeden en az 10 dögüyü içeren yükleme protokolü belirlenmiştir. Belirlenen yükleme protokolü Şekil 9'da verilmektedir.



Şekil 9. Kullanılan yükleme protokolü

3 Bulgular ve tartışma

Önceki bölümde açıklanan test aparatı, cihazları ve ekipmanı kullanılarak, çubuk kuvvetleri, histeresis eğrileri, eksenel yük-eksenel yer değiştirme tepkileri, zarf eğrileri ve enerji süneklik oranları, her numune için ölçülen eksenel

yük-eksenel yerdeğiştirme grafikleri kullanılarak belirlenmiştir. Güçlendirme yöntemlerinin yapısal katkı veya olumsuzlukları birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

3.1 Eksenel yük kapasiteleri

Referans numune (B-REF) basınç yüklemesinde akma gerilmesine ulaşmadan burkulmuştur (Şekil 10). Bu durum sadece sonraki basınç yük kapasitesini değil, uzama ve kısalmaya bağlı, akma sonrası eksenel çekme kapasitesini de etkilemektedir. Sargılanmış diğer numunelerin de tamamı basınç yüklemesinde burkulmuştur (Şekil 10). Ancak burkulma yerleri referans çubuğa göre farklılık göstermektedir. Burkulma sonrası davranış, ilk burkulma noktasındaki yorulmaya bağlı bazı numunelerde kopma ile sonuçlanmıştır. Numunelerin çekme ve basınç eksenel yük seviyeleri bu kuvvet değerlerinin yüklem seviyesi ve referans çubuğuna göre artan miktarları olan Tablo 4'te verilmiştir. Çekme ve basınç bölgelerinde eksenel yük tepkilerinin değişiminin grafiksel gösterimi Şekil 11'de verilmiştir. En yüksek değerler, çekmede yaklaşık aynı kalırken, basınç yüklemesinde en yüksek değere B-W numune ulaşmıştır. Bu numunenin çekme eksenel yük kapasitesinde de artış gözlenmiştir.



Şekil 10. Test sonrası numunelerin görünüşleri

Tablo 4. Maksimum eksenel yük değerlerinin karşılaştırılması

Numune	Çekme		Basınç	
	Maksimum Eksenel yük kN	Referansa göre değişim* %	Maksimum Eksenel yük kN	Referansa göre değişim* %
B-REF*	235.50	0.0	-31.69	0.0
B-CFRP	240.30	2.04	-41.66	31.44
B-W	312.60	32.74	-249.44	687.08
B-B-1	228.44	-3.00	-92.49	191.85
B-B-2	239.50	1.70	-38.05	20.07

3.2 Histeresis eğrileri

Histeresis eğrileri, çevrimsel yüklem altındaki elemanların yapısal özelliklerini ortaya koymaktadır. Bu döngüsel davranış, özellikle basınca çalışan elemanlarda, burkulmadan yükün taşınmasına bağlı daha tutarlı bir davranışın ortaya çıkıp çıkmadığının gözlenmesine ve karşılaştırılmasına imkan sağlamaktadır. Histeresis eğrileri, akma noktasına kadar lineer ve lineer olmayan elastik bir bölgeden ve akma noktasından sonra plastik bir bölgeden oluşur. Elastik bölgedeki yükselen eğim ve plastik bölgedeki

azalan eğim, elemanın mukavemetini, sünekliğini ve enerji yutma kapasitesini ortaya koyarak genel yapısal karakteristiğini ortaya çıkarmaktadır.

Çelik çaprazların eksenel yük altındaki sismik davranışını belirlemek için, yerdeğiştirme kontrollü yüklem protokolüyle eksenel kuvvet-eksenel yer değiştirme değerleri elde edilmiş ve bu değerler kullanılarak histeresis eğrileri oluşturulmuştur. Bu eğriler her bir numune için ayrı Şekil 12'de sunulmuştur.

3.3 Zarf eğrileri

Histeresis eğrileri kullanılarak zarf eğrileri elde edilmiştir. Zarf eğrileri güçlendirilmiş çelik çapraz elemanların maksimum yük kapasitelerini ve sünekliklerinin daha net bir biçimde tanımlanmasına olanak sağlar ve bu parametreleri belirlemek amacıyla kullanılır. Bu eğriler, her bir numunenin histeresis eğrileri üzerinde hedef yerdeğiştirmedeki pik yük değerlerinin birleştirilmesiyle oluşturulmuştur (bkz. Şekil 12). Numuneleri birbirleriyle karşılaştırmak amacıyla aynı grafik üzerinde Şekil 13'te verilmiştir.

Zarf eğrileri oluşturulurken çekme ve basınç bölgelerindeki döngülerde, hedef yer değiştirme değerine karşılık gelen eksenel yük değerleri esas alınmıştır. Maksimum yüke ulaşan eğrinin dönüşte akma yükü değerine karşılık geldiği yerdeğiştirme değeri, Δ_u değeri olarak belirlenir. Bir sonraki çevrimde akma yükünden çok düşük değerlere ulaşırsa bir önceki çevrimin maksimum değeri Δ_u değeri olarak alınır. Yük ve gerilme değerleri ikinci çevrimde azalır. Bunun nedeni çubuklarda oluşan plastik mafsallık ve malzemede gelişen yorulmadır.

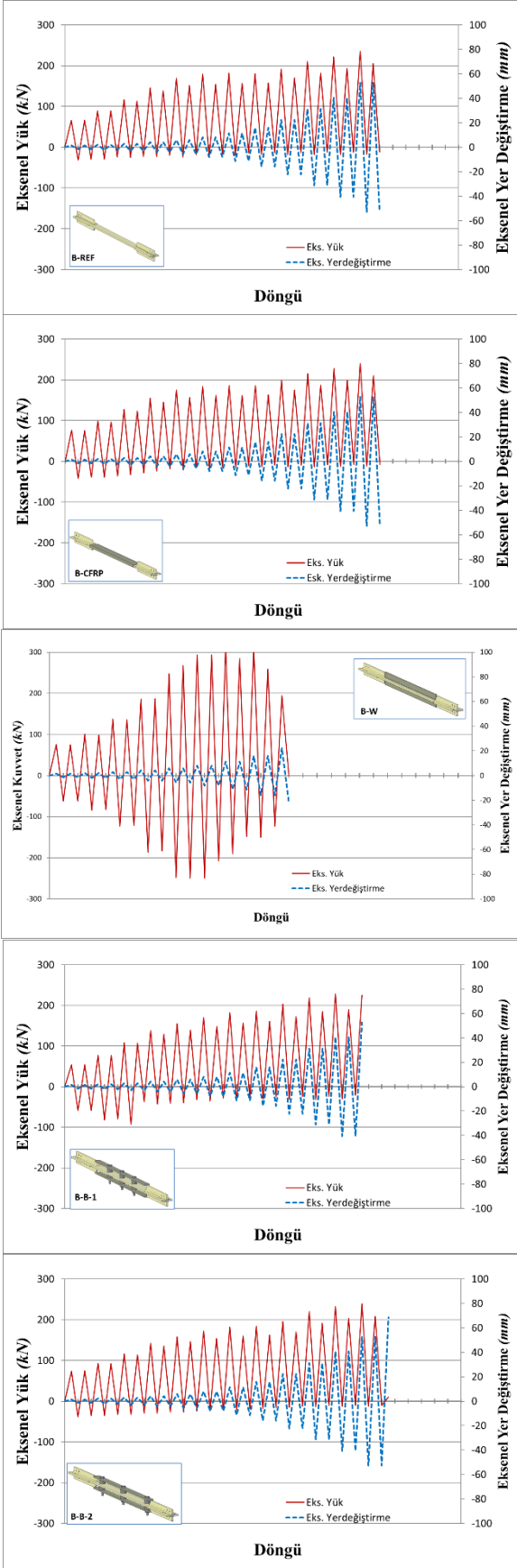
3.4 Süneklik ve enerji sünekliği

Süneklik ve enerji sönümlenme kapasitesi, sismik tasarımda dikkate alınması gereken temel parametrelerdir. Yapı sünekliği, o yapıyı oluşturan elemanların sünekliği ile doğrudan ilişkilidir [28]. Bir yapının veya yapısal elemanların sünekliğini tanımlamanın birçok yolu vardır. Bunlardan biri, maksimum yerdeğiştirme değerinin (Δ_u), akma veya yerel burkulmanın meydana geldiği yerdeğiştirme değerine (Δ_y) oranı olarak Denklem (1)'de ifade gibi tanımlanmaktadır [29]. Şekil 14'de şekilsel gösterimine bağlı hesaplanan süneklik oranları Tablo 5'de verilmiştir.

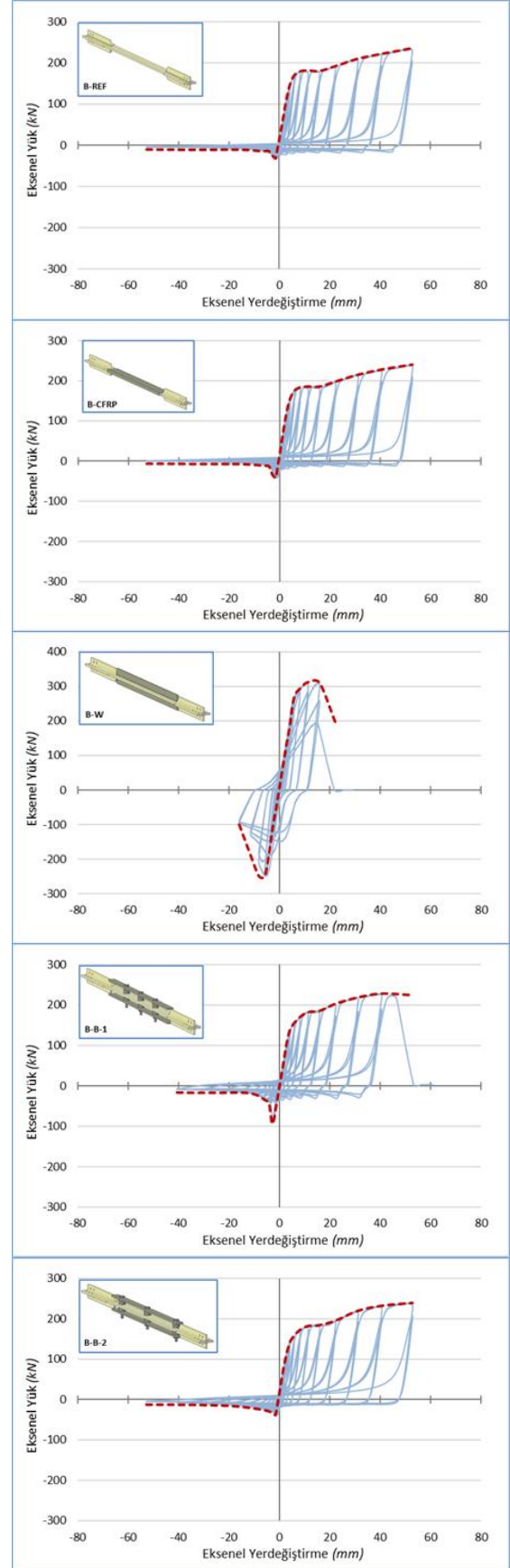
$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1)$$

Tablo 5. Süneklik değerleri

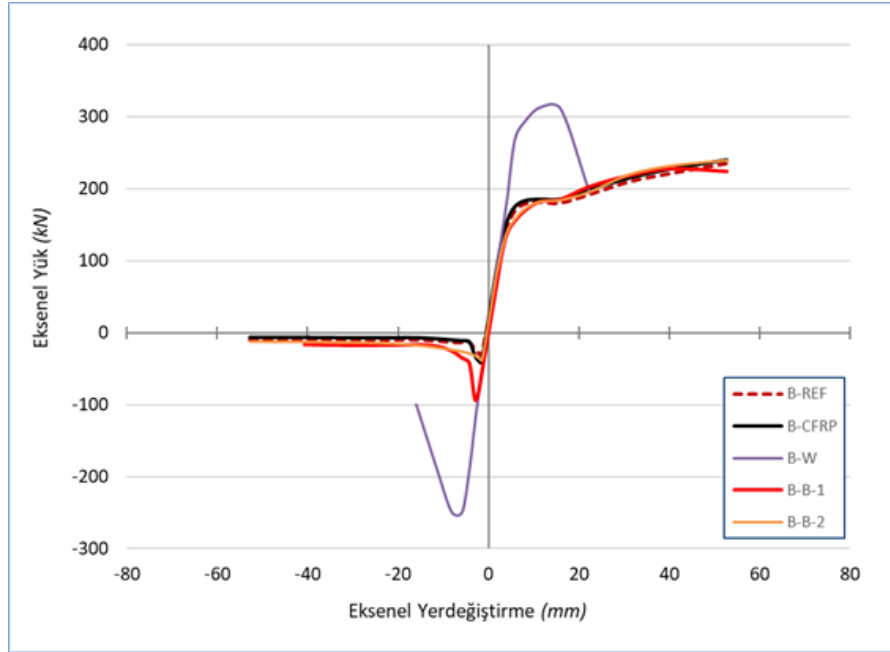
Numune	Sünekliği Oranı μ	
	Çekme	Basınç
B-REF		2.01
B-B-1	34.96	2.33
B-B-2	34.96	2.94
B-CFRP	34.96	2.02
B-W	12.02	7.63



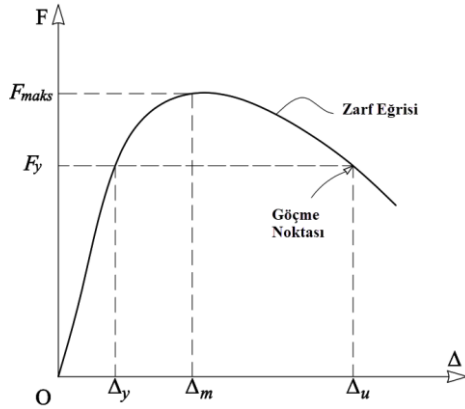
Şekil 11. Eksenel yük tepkilerinin değişimi



Şekil 12. Numunelerin histeresis ve zarf eğrileri



Şekil 13. Zarf eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 14. Göçme noktasının ve süneklik parametrelerinin belirlenmesi [29]

Süneklik ifadesi, başka bir deyişle yerdeğiştirme oranı şeklinde de tanımlanabilir. Başka bir deyişle, maksimum yerdeğiştirme (Δ_u) ile akma yerdeğiştirmesi (Δ_y) farkının yine akma yerdeğiştirmesine oranı olarak da tanımlanabilir. Bu durumda süneklik oranının **Denklem (2)**'deki gibi hesaplanır. Buradaki μ_1 değeri, basınç çubuğunun, eleman süneklik oranını gösterir.

$$\mu_1 = \frac{\Delta_u - \Delta_y}{\Delta_y} \quad (2)$$

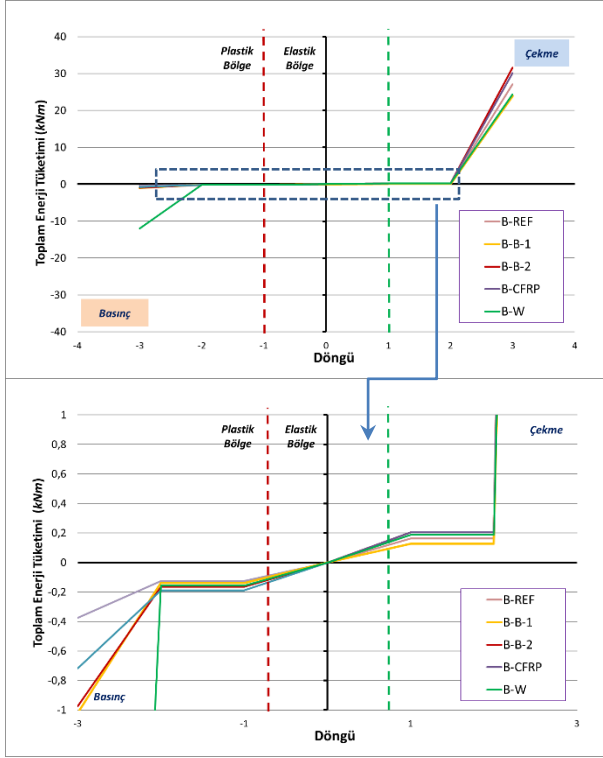
Akma yer değıştirme ve nihai yer değıştirme oranının hesaplanmasından farklı olarak, enerji yutma kapasitelerine bağılı olarak süneklik oranlarının belirlenmesi de mümkündür. Bu şekilde hesaplanan süneklik değıerleri

numuneler arasındaki farkı daha net ortaya koymaktadır. Deneysel numunelerine yerdeğıştirme kontrollü yükleme protokolü uygulandığından ve yükleme protokolündeki hedef yer değıştirme değıerleri her numune için aynı olduğından, eksenel yer değıştirmelere göre süneklik oranlarının belirlendiğı değıerler arasında benzerlikler oluşmaktadır. Başka bir deyişle direkt olarak süneklik hesaplanması, yerdeğıştirme kontrollü deneylerde karşılaştırmayı zorlaştırmaktadır. Aradaki farkı gösterecek hesaplama yapılmalıdır ki bu farkı oluşturacak parametre ise eksenel yük seviyesidir.

Deneylerde aynı eksenel yer değıştirme değıerlerine kıyasla farklı eksenel yük değıerlerine sahip histeresis eğrilerinde görülmektedir. Diğer bir deyişle, hedef yerdeğıştirmelerde yük değıerleri değıişir. Bu nedenle numuneler nihai taşıma kapasite değıerlerine ulaşana kadar enerji kayıp değıerleri dikkate alınarak süneklik oranlarının hesaplanması daha doğıru bir yaklaşımdır. Bunun yapılması adına **Şekil 14**'teki hesaplama yaklaşımı ile elastik enerji kayıp değıerleri, ardından **Denklem (3)** kullanılarak süneklik oranı hesaplanmaktadır.

$$\mu_E = \frac{E_p - E_y}{E_y} \quad (3)$$

Bu denklemde E_y elastik sınıra kadar kümülatif enerji tüketim değıeri, E_p ise plastik bölgedeki kümülatif enerji tüketim değıeridir. Bu açıklamaya göre hesaplanan enerji süneklik oranları grafiksel olarak **Şekil 15**'te ve hesap edilen değıerler bakımından **Tablo 6**'da verilmiştir. Grafik ve tabloda basınç bölgesindeki enerji değıerleri dikkate alınan değıerlerdir. Çekme bölgesinde ise kopma veya yırtılma gerçekleşinceye kadar olan değıerler dikkate alınmıştır.



Şekil 15. Test numunelerinin taşıma kapasitelerini yitirinceye kadar olan elastik ve plastik enerji tüketimleri

Tablo 6. Enerji sünekliliği değerleri

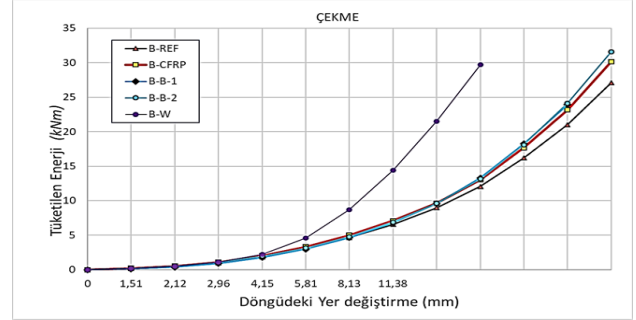
Numune	Enerji Sünekliliği Oranı	
	$\mu_E = E_p - E_y / E_y$	
	Çekme	Basınç
B-REF	168.04	3.00
B-B-1	187.60	6.34
B-B-2	154.38	4.93
B-CFRP	146.10	2.79
B-W	130.03	75.69

Tablo 6'ya göre çekmede en yüksek enerji sünekliliği B-B-1 numunesinde görülmektedir. Enkesit alanı bulon deliği sebebiyle azalmış olsa da bağlanan levhaların katkı sağladığı anlaşılmaktadır. Basınç bölgesinde bulonlu sargıların bir miktar katkısı görülmüştür. Basınç bölgesinde ise en büyük enerji sünekliliği B-W numunesinde görülmüştür. Bu durum en yüksek basınç dayanımı gerilmesine ulaşması sonucudur. Ancak bu durum uzun sürmeyerek, ileri yerdeğiştirme mertebelerinde zayıf enkesitte plastik mafsallı oluşmasına bağlı, çekmede erken kopmayla sonuçlanmıştır.

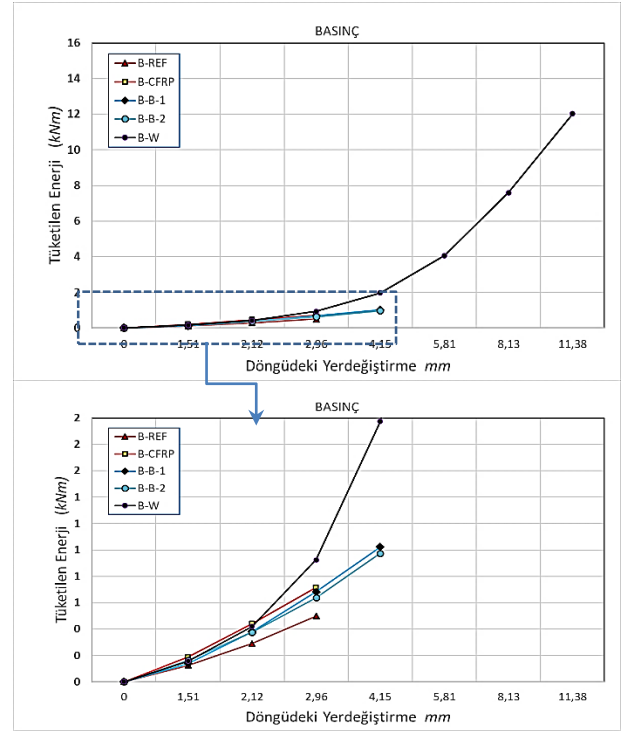
3.5 Enerji tüketim değerleri

Histerisis eğrisinin altında kalan alanlar çekme ve basınç döngülerinden hesaplanarak enerji tüketim değerleri elde edilmiştir. Çekme ve basınç yüklemesinden, her bir adım için ayrı ayrı hesaplanan değerler sonrasında, bir önceki enerji tüketimi değeriyle hesaplanarak kümülatif (birikimli) enerji tüketim değerlerine ulaşılmıştır. Test numunelerine ait kümülatif enerji tüketimi grafikleri, çekme ve basınç döngüleri için ayrı ayrı Şekil 16 ve Şekil 17'de verilmektedir. Çekme enerjileri birbirine yakın seyrederken, erken döngülerde kopmasına rağmen, B-W numunesinin toplam enerji tüketimi, diğer numunelerin deplasman

seviyesine göre düşük kalmasına rağmen yine diğer numuneler yakalamıştır. Ancak basınç bölgesinde B-W'nin enerji tüketimi diğerlerine göre çok daha fazladır. Basınç döngülerindeki bir sonraki yüksek değer B-B-1 numunesinde görülmektedir. Kümülatif enerji tüketimi değerleri enerji sünekliliği ile paralellik göstermektedir.



Şekil 16. Test numunelerinin kümülatif enerji grafiği (çekmede)



Şekil 17. Test numunelerinin kümülatif enerji grafiği (basınçta)

3.6 Hasar mekanizmaları

Güçlendirme elemanlarının bağlantı şekli ve türü göçme mekanizmalarını doğrudan etkilemiştir. İleri seviyedeki hasar mekanizmalarının görülmesi adına taşıma gücü çok küçük mertebelere de ulaşsa da yüklemeye devam edilmiştir. Çubuklar üzerinde en çok gerilme yığılmasının olduğu noktalarda tersinir tekrarlı yüklere bağlı yorulma gerçekleşmiş ve kopmuştur. Hasar mekanizmaların her bir numune için hasar fotoğrafları ile birlikte aşağıda sunulmaktadır.

3.6.1 B-REF numunesi

Referans numune, beklenildiği gibi, zayıf ekseninde akma gerilmesinin aşıldığı ilk adımda burkulmuştur. İlerleyen döngülerde eksen dışı yer değiştirmeye bağlı orta noktadaki plastik mafsalda yorulma gerçekleşmiş ve bu durum çekme kuvvetlerinde bir miktar düşüşe sebep olmuştur. B-REF numunesinin deney sonrası hasar görmüş hali Şekil 18’de verilmiştir.



Şekil 18. B-REF numunesi test sonrası hasar görünümü

3.6.2 B-CFRP numunesi

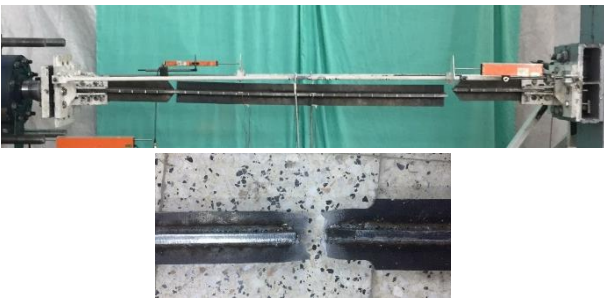
CFRP sargılı numune referans numuneye benzer şekilde burkulmuştur. Öncelikle numune ortasının üst kuzey tarafındaki CFRP sargının (basınç bölgesindeki sargı) etkiyen basınç kuvvetiyle çelik levhadan ayrılmıştır. Bu zamana kadar dayanımda görülen artış, bu andan sonra düşmeye başlamış ve numunenin eksen dışı hareketi artış göstermiştir. Buna deformasyona bağlı uçlara yakın CFRP sargılarında da açılmalar oluşmuştur. B-CFRP numunesinin deney sonrası hasar görmüş hali Şekil 19’da verilmiştir.



Şekil 19. B-CFRP numunesi test sonrası hasar görünümü

3.6.3 B-W numunesi

En yüksek basınç yüküne ulaşan B-W numunesi, levha eklenmemiş (zayıf kalan) güney taraftaki kesitinden, döngülerdeki yorulmaya bağlı kopmuştur. İlk burkulma yine bu kesitte meydana gelmiştir. B-W numunesinin deney sonrası hasar görmüş hali Şekil 20’de verilmiştir.



Şekil 20. B-W numunesi test sonrası hasar görünümü

3.6.4 B-B-1 numunesi

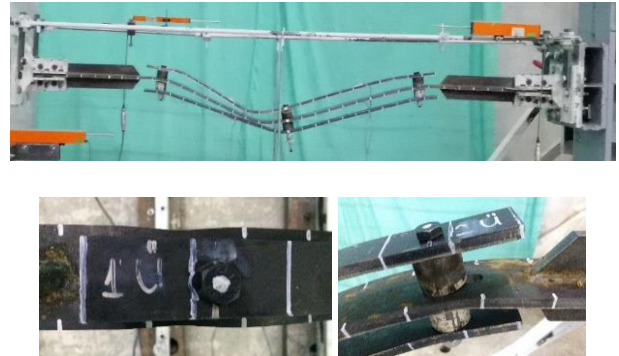
Bulonlu güçlendirmenin ilk numunesi olan B-B-1 numunesinde ilk burkulma güney ucundaki bulon bağlantısının olduğu noktada gerçekleşmiştir. Bulonlar arası mesafe ile kenar bulonların mesnete olan mesafeleri aynı, dolayısıyla burkulma boyları aynıdır. Bu numunede bulon çapına uygun dairesel bulon deliği açıldığı için bulon delikte bir miktar hareket etse de sonunda levhaya yaslanarak aksel kuvvetin iletilmesini sağlamıştır. Enkesitin de delik sebebiyle zayıflamış bir enkesit olduğu için bu noktada burkulma gerçekleşmiştir. Eksen dışı yer değiştirmenin ilerlemesiyle birlikte üst güçlendirme levhası esas çubuğa yaslanmış ve serbest uçundan eğilmiştir. İlerleyen döngülerde ilk burkulmanın gerçekleştiği noktadan çekme döngüsünde kopmuştur. B-B-1 numunesinin deney sonrası hasar görmüş hali Şekil 21’de verilmiştir.



Şekil 21. B-B-1 numunesi test sonrası hasar görünümü

3.6.5 B-B-2 numunesi

İkinci bulonlu güçlendirme numunesi B-B-2’de burkulma orta noktaya yakın ve tüm levhaların eğilmesi şeklinde gerçekleşmiştir. Kenar bulonların mesnetlere yaklaştırılmasının ve kenar bulonlar için esas numunede açılan deliklerin kısa oval delik olarak açılmasının, bu davranışın gerçekleşmesinde etkili olduğu düşünülmektedir. Orta noktada ise oval delik bulunmadığı için esas çubuğundan gelen yanal yer değiştirme kuvveti güçlendirme elemanlarına daha uygun bir biçimde iletilmiş güçlendirme levhalarına aktarılmıştır. İlerleyen döngülerde kopma gerçekleşmemiş ancak bulon deliklerinin açıldığı zayıf enkesitte daralma gerçekleşmiştir. B-B-2 numunesinin deney sonrası hasar görmüş hali Şekil 22’de verilmiştir.



Şekil 22. B-B-2 numunesi test sonrası hasar görünümü

4 Sonuçlar

Bu çalışma, mevcut üretimli çelik yapılarıdaki basınç çubuklarının eksenel basınç kapasitelerinin sonrada yapılan güçlendirmelerle artırılmasına yönelik yapılmıştır. Bu kapsamda referans bir basınç çubuğuna dört çeşit güçlendirme uygulanarak tersinir tekrarlı eksenel yükler uygulanarak yapısal performansları incelenmiştir. Uygulanan güçlendirmelerin üçü çelik takviyesi ile güçlendirme diğeri karbon elyafı güçlendirmedir. Çelik güçlendirmelerin biri çubuğa levha kaynaklanmasıyla yapılırken diğeri ikisi bulon bağlantılı güçlendirmeler olmuştur.

Elde edilen bulgulara göre aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- En yüksek basınç dayanımını kaynaklı güçlendirme olan B-W numunesi göstermiştir.
- B-W numunesi çekme dayanımında da en yüksek değere ulaşmış numunedir. Çünkü kesitin kaynakla takviye edilmesi sonucunda çekme yükünde de artış gözlenmiştir. Buna karşın çubuğun her ki ucunda da gövde kesitine göre zayıf kalan enkesiti çubuğun erken kopmasına sebep olmuştur.
- Basınç kuvveti dayanımındaki artış diğeri numuneler arasında B-B-1 numunesinde görülmüştür.
- Diğeri bulonlu numune B-B-2 en düşük performanslı numune olmuştur. Ancak bulonlu güçlendirmelerde dayanım artışı düşük mertebelerde kalsa da bulonlu bağlantıların geometrik ve bağlantı yerlerinde yapılacak değişikliklerle geliştirilebileceği anlaşılmaktadır.
- Bulonlu bağlantılarda esas çubukta açılan bağlantı deliği kesit daralmasına sebebiyet verdiği için çekme döngülerinde erken göçmeye sebebiyet verebilmektedir.
- Karbon elyaf sargılı numune (B-CFRP) beklenildiği gibi yüksek basınç dayanımı gösterememiştir. Uygulama aşamasında esas çubuğun daha pürüzlü hale getirilmesinin davranışı etkileyebileceği sonucuna varılmıştır. Bunun yanı sıra esas çubuğun enkesit geometrisinin farklı olması durumunda yapısal davranışı artırabileceği düşünülmektedir.

Teşekkür

Deneysel çalışmalarda yardımlarını esirgemeyen eski öğrencim ve sevgili kardeşim İnş. Müh. Ali Kemal Düğenci ile yine eski öğrencim İnş. Müh. Alperen Ahmet Baltaş'a teşekkür ederim.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (Turnitin): %5

Kaynaklar

- [1] N. Hoveidae, and B. Rafezy, Overall buckling behavior of all-steel buckling restrained braces. Journal of Constructional Steel Research, 79, 151-158, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.07.022>
- [2] Q. Xie, State of the art of buckling-restrained braces in Asia. Journal of Constructional Steel Research, 61(6),

- 727-748, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2004.11.005>.
- [3] D. MacEachern and P. Sadeghian, Hybrid FRP strengthening of slender steel members for buckling control. Journal of Composites for Construction, 24(5), 04020039, 2020. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001050](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001050).
- [4] T. Yazan, Merkezi güçlendirilmiş çerçevelerde sürtünmesiz çelik basınç çubukları. Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi, 436: 47-52. 2005
- [5] O. Düğenci, Artı kesitli çekirdeğe sahip burkulması önlenmiş basınç çubuklarının eksenel yük altında deneysel ve numerik araştırılması, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2015.
- [6] C. J. Black, N. Makris, and I. D. Aiken, Component testing, seismic evaluation and characterization of buckling-restrained braces. Journal of Structural Engineering, 130 (6): 880–894.2004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2004\)130:6\(880\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:6(880)).
- [7] T. Yoshino, and Y. Karino, Experimental study on shear wall with braces: Part 2. In Summaries of technical papers of annual meeting, Architectural Institute of Japan, 11, 403-404, 1971.
- [8] M. Wakabayashi, T. Nakamura, A. Katagihara, H. Yogoyama and T. Morisono, Experimental study on the elastoplastic behavior of braces enclosed by precast concrete panels under horizontal cyclic loading—Parts 1 & 2. In Summaries of technical papers of annual meeting, Architectural Institute of Japan, 10, 1041-1044, 1973.
- [9] TÇYY-2016, Çelik Yapıların Tasarım, Hesap Ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik. 4 Şubat 2016 tarih ve 29614 sayılı Resmi Gazete. 2016
- [10] TBDY-2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. 18 Mart 2018 Tarih ve 30364 Sayılı Resmi Gazete, 2018
- [11] EN 1993-1-1:2005, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings.
- [12] TS EN 1993-1-1. Çelik Yapıların Tasarımı - Bölüm 1-1: Genel kurallar ve binalara uygulanacak kurallar (Eurocode 3). Türk Standartları Enstitüsü, 101s, Ocak 2014
- [13] ANSI/AISC 360-16, Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Inc. 680 pp. 2016.
- [14] S. Naimi and S. Kaya, Betonarme yapıların çelik çapraz elemanlar ile güçlendirilmesi. AURUM Journal of Engineering Systems and Architecture, 3(2), 191-204, Feb. 2020.
- [15] M. Elchalakani and D. Fernando, Plastic mechanism analysis of unstiffened steel I-section beams strengthened with CFRP under 3-point bending. Thin-walled structures, 53, 58-71, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2012.01.005>.
- [16] M. Elchalakani, A. Karrech, H. Basarir, X. L. Zhao, S. Fawzia, and M.F. Hassanein, Strengthening of mild steel struts using CFRP sheets subjected to uniform

- axial compression. *Thin-Walled Structures*, 116, 96-112, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.03.010>.
- [17] X.Y. Gao, T. Balendra, and C. G. Koh, Buckling strength of slender circular tubular steel braces strengthened by CFRP. *Engineering Structures*, 46, 547-556, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.08.010>.
- [18] G.L. Kulak, G.Y. Grondin, P.F. Adams, H.A. Krentz, Limit states design in structural steel. In: 7th Canadian institute of steel construction, Alliston, Ontario; 2002.
- [19] M. Vild and M. Bajer. Strengthening under load: numerical study of flexural buckling of columns. *Procedia engineering*, 190, 118-125, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.316>.
- [20] TS EN ISO 6892-1,. Metalik Malzemeler-Çekme Deneyi, Bölüm 1: Oda Sıcaklığında Deney Metodu. Türk Standartları Enstitüsü, 57 s, 2011
- [21] ANSI/AISC 341-16, Seismic provision for structural steel building, American Institute of Steel Construction, Inc. 480 pp, 2016.
- [22] E. Ekiz and S. El-Tawil, Using CFRP to achieve buckling restrained behavior in steel compression members. In *Structural Engineering Research Frontiers* 1-11., 2007. [https://doi.org/10.1061/40944\(249\)51](https://doi.org/10.1061/40944(249)51).
- [23] J. Park, J. Lee and J. Kim, Cyclic test of buckling restrained braces composed of square steel rods and steel tube, *Steel and Composite Structures*, 13 (5), 423-436, 2012 <https://doi.org/10.12989/scs.2012.13.5.423>
- [24] ECCS, ECCS Technical Committee 1 – Structural Safety and Loadings – Technical Working Group 1.3 – Seismic Design Recommended Testing Procedure for Assessing the Behaviour of Structural Steel Elements under Cyclic Loads. 1st Edition, Brussels, 1986.
- [25] ATC-24, Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures for Buildings, Report No. ATC-24, Applied Technology Council, Redwood City, CA, 1992.
- [26] FEMA, Interim Protocols for Determining Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components Through Laboratory Testing, FEMA 461 Draft document, Federal Emergency Management Agency, 2007
- [27] Building Research Institute, Japan Iron and Steel Federation,. Testing methods of the evaluation of structural performance for the steel structures, Japan, 2002
- [28] Y. Fukumoto and G. C. Lee, Stability and ductility of steel structures under cyclic loading CRC press, 3, 1991.
- [29] T. Usami, Y. Imai, T. Aoki and Y. Itoh, An experimental study on the strength and ductility of steel compression members under cyclic loading. *Journal of Structural Engineering*, 37, 93-106, 1991.





Klasik ve alttan alışı dolusavak havalandırıcı performanslarının sayısal modelle incelenmesi

Investigation of classical and bottom-inlet spillway aerator performances by numerical model

Mehmet Cihan Aydın^{1,*} , Muhammed Reşid Özdemir² 

^{1,2} Bitlis Eren Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 13100, Bitlis Türkiye

Özet

Barajların hidrolik açıdan en önemli elmanı olan dolusavaklar baraj tipine ve geçireceği debilere göre birçok farklı tipte tasarlanmaktadır. Dolusavaklar tasarlanırken dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardan biri de kavitasyon önleyici havalandırıcılardır. Bu çalışmada dolusavaklarda beton yüzeyinde oluşan kavitasyon hasarı ve dolusavak havalandırıcılarının kavitasyon üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla seçilen bir dolusavağı modelinin üç boyutlu sayısal modeli hazırlanıp farklı Froude sayılarında Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra farklı bir havakandırıcı tipi olan alttan alışı havalandırıcı modele yerleştirilerek orijinal havalandırıcılara benzer şekilde HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. HAD analizlerinden elde edilen sonuçlar birbirleriyle kıyaslanmış ve her iki havalandırıcının da kavitasyon hasarından yeterince korunduğu sonucuna varılmıştır. Elde edilen sonuçlar ayrıca literatürdeki farklı tip ve yöntemlerle elde edilen havalandırıcı sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Dolusavak, Flow 3D, Havalandırıcı, Kavitasyon, Sayısal analiz, HAD

1 Giriş

Barajlar başta enerji üretimi, içme ve sulama suyu temini, taşkın kontrolü gibi çeşitli amaçlarla ve farklı tiplerde (Beton ağırlık, dolgu, kemer, SSB gibi) inşa edilirler. Hangi amaç ve tipte inşa edilirse edilsin barajların en önemli elemanlarından biri dolusavaklardır. Bu önemli su yapılarının tasarlanması ve işletilmesi büyük bir mühendislik hizmeti gerektirir. Özellikle yüksek düşü ve yüksek debili dolusavakların tasarımında iki türlü oyulma/aşınma problemi vardır. Bunlardan biri, yüksek enerjiden dolayı dolusavak mansabındaki yerel oyulmalar, diğeri ise yüksek hızlara maruz dolusavak yüzeylerinde meydana gelen kavitasyon hasarlarıdır. İlk bahsedilen hasarlar, çeşitli enerji kırıcı elemanlar sayesinde önlenmeye çalışılır. Kavitasyon hasarından korunmanın ise çeşitli yolları bulunmakla birlikte en etkili yöntem doğal havalandırıcı aygıtlar yerleştirmektir. Kavitasyon, teorik olarak, sıvı içindeki basıncın buhar basıncı altına düşmesi sonucu akım içinde gaz kabarcıklarının oluşması olayına denir. Kavitasyon olayının

Abstract

The spillways, which are the most important hydraulic elements of the dams, are designed in many different types according to the dam type and flow rates. One of the most important issues to be considered when designing spillways is the design of the aerators. In this study, the cavitation damage on the concrete surface of spillways and the effects of aerators on the cavitation were investigated. For this purpose, a three-dimensional numerical model of a selected spillway model was prepared and Computational Fluid Dynamics (CFD) analyzes were performed in different Froude numbers. Later, a different type of aerator called as the bottom-inlet aerator was placed in the model and CFD analyzes were performed similar to the original aerators. The results obtained from the CFD analysis were compared with each other and it was concluded that both aerators were sufficiently protected from cavitation damage. The results obtained were also compared with the aerator results obtained with different types and methods in the literature.

Keywords: Spillway, Flow 3D, Aerator, Cavitation, Numerical analysis, CFD

mühendislikteki önemi ise, sistemler içinde yüksek hızlı akım sonucu oluşan kavitasyon kabarcıklarının yüksek basınç bölgelerine rastladığında tekrar sıvı faza geçmeleri sırasında oluşturduğu patlamalardan kaynaklı yüzey aşınmalarıdır. Literatürde genel görüş, akım hızlarının 20-30 m/s arasında kavitasyon oluşabileceği kabul edilmektedir [1-3]. Havalandırıcılar, dolusavak şut kanalları üzerindeki yüksek hızlı su jeti altında yapay olarak oluşturulan boşluk içinde meydana gelen atmosfer altı basınçlar sayesinde, dışarıdan hava emmek suretiyle çalışıp kavitasyon önleme etkili olurlar. Gerekli hava konsantrasyonu havalandırıcının boyutları ve tasarımıyla ilgilidir

Son yirmi yıl içerisinde dolusavak ve havalandırıcılar için yapılan bazı çalışmaların özeti sıralanmıştır; Nie [4], yüzeyleri kavitasyon hasarından korumak için yapay olarak pürüzlendirilmiş yüzeyler üzerinde çalışmıştır. Kökpınar ve Göğüş [5], havalandırıcılar üzerinde kapsamlı bir deneysel çalışma yürüterek havalandırıcı tasarımında kullanılacak faydalı bazı bağıntı ve kriterler belirlemişlerdir. Boes ve

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mcaydin@gmail.com (M. C. Aydın)

Geliş / Received: 02.02.2021 Kabul / Accepted: 29.12.2021 Yayınlanma / Published: 14.01.2022

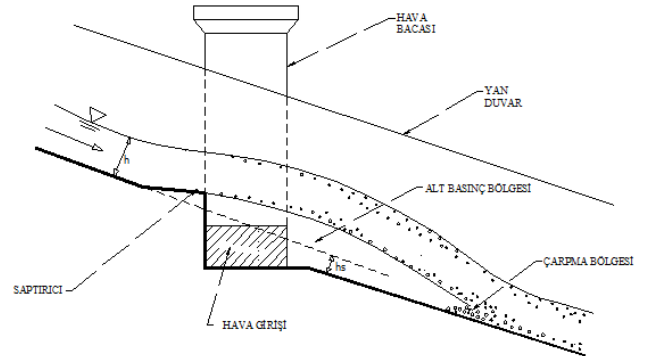
doi: 10.28948/ngumuh.873077

Hager [6], Aydın [7] ve Öztürk ve ark. [8], geniş dolusavaklarda İlisu Barajına benzer olan “Alttan Alışlı Havalandırma” sistemini önermişlerdir. Hesaplamalarında HAD kullanarak deneysel çalışmalarla havalandırma performansını incelemişlerdir. Daha sonra Aydın [9] deneysel bir çalışmaya dayalı olarak alttan alışlı dolusavak havalandırıcıdan elde edilen sonuçları geleneksel havalandırıcı tipleri için literatürde verilen ampirik bağıntılarla karşılaştırmış ve alttan alışlı havalandırıcıların çok daha iyi havalandırma performansı sağladığını ortaya koymuştur. Chen et al. [10], girdaplı düşüyle tasarlanan bir şaft tünelinin özelliklerini laboratuvar ortamında incelemişlerdir. L şeklinde olan kanal ile birleştirilen şaft yapısında birkaç noktadan ölçümler yapmıştır. Hidrolik yapılarda kavitasyon riskinin de göz alınması gerektiğini belirtilen makalede, teorik analize göre deşarj arttığında kavitasyon riskinin de artacağı bilindiğinden şaftlarda bu riski azaltmak için havalandırma sistemlerinin önemi vurgulanmış ve uygulamalarda dikkate alınması önerilmiştir. Zhang et al. [11], hidroelektrik santrallerde yüksek basınçlı akımların sebep olduğu kavitasyon hasarlarının havalandırıcılar yardımıyla ekonomik olarak çözülebileceğini belirtmişlerdir. Sayısal modelleme yardımıyla, realizable $k-\epsilon$ türbülans modeli, akışkan hacimleri (VOF) ve hava karışım (mixture) modellerini kullanarak karmaşık bir akımı analiz etmişlerdir. Edilen veriler deneysel verilerle karşılaştırılmış ve sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Pfister ve Chanson [12], çalışmalarında; iki fazlı (su-hava) akımların deneysel çalışmalarında ölçek etkilerine dikkat edilmesi gerektiğini, bilinen faktörlere ilave olarak yeni bazı faktörler elde etmeyi amaçlamışlardır. Çift fazlı akım deneylerinde model ve prototip Froude, Weber ve Reynold sayılarının aynı olması gerektiği fakat bunun ancak tam (prototip) boyuttaki çalışmalarda mümkün olabileceği, ölçek etkilerinin doğru belirlenmesinin kritik öneme sahip olduğu, kabarcık boyutu ve türbülans ölçekleri gibi bazı parametrelerin büyük ölçekli laboratuvar modellerinde bile ölçek etkilerinden etkilenebileceği belirtmişlerdir. Kamel ve Abdulhameed [13], Ogee tepeli dolusavaklar üzerinde, basınç ve enerji dağılımını belirlemek için 1/50 ölçekli fiziksel model üzerinde çalışmışlardır. Elde edilen sonuçlar, dolusavağın konumunun enerji değişiminde etkisi olmadığını göstermiştir. Marquez et al. [14], kademeli dolusavaklarda yüksek debilerde kavitasyon meydana geleceğini belirterek, kavitasyondan korunmak için akımda serbest jet oluşumuna izin veren bazı havalandırıcı elemanlar üzerinde çalışmışlardır. Çalışmalarında farklı akım koşullarında jet uzunluklarının değiştiğini ve jetin çarpma noktasının membasında basınçların sifira yakın olduğunu belirtmişlerdir. Daneshfaraz et al. [15], yapay bloklarla pürüzlendirilmiş bir Ogee-profil dolusavağı üzerindeki enerji sönümlemesi ve jet uzunluğunu HAD kullanarak incelemişlerdir. Diğer bazı araştırmacılar gibi bu araştırmacılar da serbest yüzeysel akım koşullarını simüle edebilmek için Akışkan Hacmi (VOF) yöntemi ve türbülans modeli olarak da RNG $k-\epsilon$ modeli kullanmıştır. Sayısal simülasyondan elde edilen sonuçlar tatmin edici bulunmuştur.

2 Materyal ve metot

2.1. Havalandırıcı tasarımı

Klasik olarak bir dolusavak havalandırıcısı, şüt kanalı üzerine enine yerleştirilen bir oluk, bir sıçratma rampa ve/veya eşiği ile su jeti altındaki boşluğu atmosfere açan havalandırma bacalardan meydana gelir. Dolusavak şüt kanallarının maruz kaldığı yüksek hızdaki akım rampa ve/veya eşik sayesinde tabandan ayrılarak su napı altında bir boşluk oluşturulur. Atmosferaltı basınca maruz bu boşluğa tabandaki oluk ve havalandırma bacaları sayesinde hava sağlanır. Basınç farkı sayesinde giren bol miktardaki hava akıma karışarak havalandırıcı mansabındaki beton yüzeyi kavitasyona karşı korur. Bu havalandırma mekanizması dışında tabandan yükselen su jetinin alt ve üst naplarında hava sürüklenmesi nedeniyle de hava girişi sağlanır. Chanson [16], farklı tipteki havalandırıcıların özellikleri incelenmiş ve genelde yukarıda bahsedilen bu tip havalandırıcıların en iyi tasarım olduğunu belirtmiştir. Klasik tip bir havalandırıcının elemanları Şekil 1’de gösterilmiştir. Ayrıca farklı tip dolusavak havalandırıcıların tasarımıyla ilgili detaylar Volkart ve Chervet [17], Volkart ve Rutschmann [2], Aydın [7], Kells ve Smith [18], Rutschmann ve Hager [19], Cassidy ve Elder [20] gibi araştırmacıların çalışmalarında verilmektedir.



Şekil 1. Klasik tip bir havalandırıcının elemanları [7]

2.2. Kullanılan havalandırıcı modelleri

Bu çalışmada klasik bir model olarak Alparslan II Barajı dolusavağı seçilmiştir. Alparslan II barajı mansabında Muş Ovası yer almaktadır. Bu çerçevede, Murat Nehrine mansaplanan Karasu Nehrinin taşkınlarından Muş Ovası'nı korumak için Alparslan II barajı rezervuarında taşkın kontrol hacmi ayrılmıştır. Talvegden yüksekliği 99 m olan barajın asıl amaçları enerji üretimi, sulama, taşkından korumak olarak tasarlanmıştır. Projenin sonunda yıllık 780 Gwh/yıl elektrik enerji üretimi amaçlanmaktadır. Barajın dolusavağı sol sahile yerleştirilmiş olup barajın gövdesi asfalt çekirdekli kum-çakıl-kaya dolgu olarak yapılmıştır. Barajın dolusavak karakteristikleri Tablo 1’de verilmiştir.

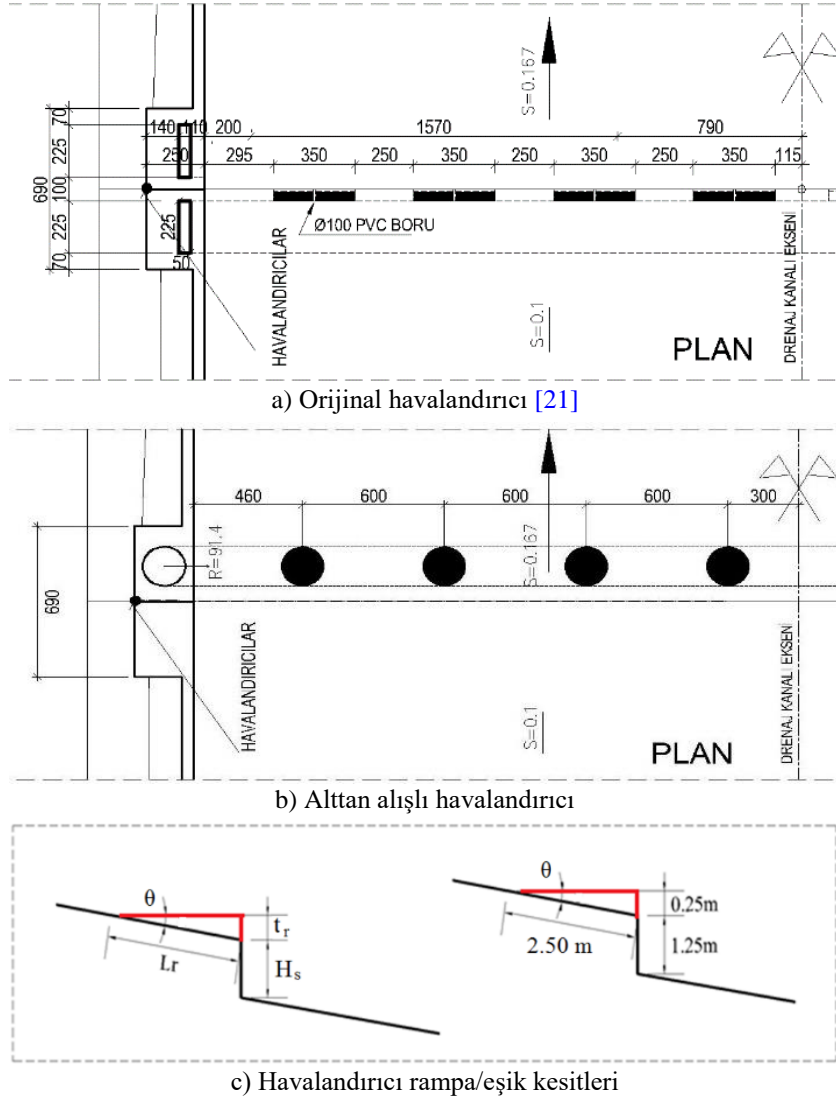
Başlangıçta genişliği 71 m olan dolusavağın membaya doğru genişliği 19.80 m azalarak 51.20 m’ye düşmektedir. Şüt kanalının uzunluğu 539 m’dir. Şüt yapısının sonunda enerji kırıcı bir havuz yerleştirilmiştir.

Tablo 1. Alpaslan II Barajı dolusavağının özellikleri [21]

Dolusavak pik debisi	6 705.80 m ³ /s
Tipi	Radyal Kapaklı
Kapak adedi	5
Kapak Genişlik x Yüksekliği	11.00 x 13.00
Dolusavak toplam brüt genişliği	71.00 m
Dolusavak toplam net genişliği	55.00 m
Dolusavak yaklaşım kanalı kotu	1 350.00 m
Dolusavak eşik kotu	1 355.50 m

Alparslan II Barajı dolusavağı havalandırıcıları ve mevcut havalandırıcıya alternatif olarak Aydın [7] tarafından önerilen alttan alışı havalandırıcıların Şekil 2’de verilen planlara göre sayısal modelleri hazırlanıp HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Orijinal havalandırıcı şut kanalı boyunca yerleştirilen bir ana galeri, bu galeriye ve jet altı boşluğa açılan iki taraflı toplamda dört adet bacadan oluşmaktadır. Şut kanalı üzerindeki akım ana galeri ile oluşturulan bir eşik

(basamak) ve ana galeri üzerine yerleştirilmiş bir rampa (saptırıcı) ile şut yüzeyinden saptırılmaktadır. Böylece ikincil bacaların beslediği jet altı havalandırma boşluğu oluşturularak yanlardan jet altına hava girişi sağlanması amaçlanmıştır. Ana havalandırma bacaları dikdörtgen kesitli olup yan duvarlar içine düşey bir şekilde konumlandırılmıştır. Ana havalandırma galerisinin içerisinde su birikmesini önlemek amacıyla şut kanalı genişliği boyunca belirli aralıklarda Ø100’lük drenaj boruları yerleştirilmiştir. Ana galeri ile su jeti altındaki havalandırma boşluğu arasındaki bağlantı belli aralıklarda yerleştirilen dikdörtgen kesitli havalandırıcı kanallarıyla sağlanmıştır. Orijinal havalandırıcı tasarımı yerine kullanılacak olan Alttan alışı havalandırıcı modelinde bir saptırıcı (rampa), ve bu saptırıcının hemen mansabında şut tabanı üzerinde kanal genişliği boyunca belirli aralıklarla aynı çaptaki dairesel kesitler ve bu kesitleri besleyecek ana galeri yerleştirilmiştir. Aydın [7] tarafından verilen modelden farklı olarak rampa ile birlikte orijinal projedekine benzer bir eşik kullanılmıştır.



Şekil 2. Havalandırıcı modellerin plan detayları

2.3. Sayısal model

Bu çalışmada akışkanlar konusunda ve birçok mühendislik alanlarında tercih edilen Flow 3D sayısal analiz programı kullanılmıştır. Flow 3D, laminer ve türbülanslı, tek ve çok fazlı karmaşık akımların hareketini, akışkanın lineer olmayan temel bünye denklemleri ve literatürdeki bazı ampirik yaklaşımlarla birlikte çözerek simüle eden ileri düzey bir HAD paket programıdır. Özellikle serbest yüzeyli akışların simülasyonunda kullanılan Flow-3D üç boyutlu süreklilik ve hareket (RANS) denklemlerinden oluşan diferansiyel denklem sistemini sonlu hacimler yöntemiyle çözer. Oluşturulan katı modellerin nap yüzeyinden giren hava miktarını belirlemek için Flow 3D'de Hava Giriş Modeli (*Air Entrainment Model*) kullanılmıştır. Hava Giriş Modeli, türbülans ve akış durumundan dolayı sıvı içerisindeki yaklaşık hava miktarını belirlemede yardımcı olur. Bu modelin dolusavak akış modellerinde metal dökümündeki gibi birçok alanda kullanımı mevcuttur. Temel fikir, türbülanslı girdapların, havayı hapseden ve sıvının gövdesine geri taşıyan serbest bir yüzeyin üzerine küçük sıvı elementleri yerleştirilmesidir. Hava sürüklenme oranı türbülans dengesi ve yüzey gerilimine bağlıdır [22].

$$\frac{\partial V}{\partial t} = C_{air} \cdot A_s \left[2 \cdot \left(\frac{pk - pg_n L_t - 2\sigma / L_t}{p} \right) \right]^{1/2} \quad (1)$$

- V = sürüklenen hava hacmi (m^3)
- C_{air} = hava sürükleyen yüzey alanı kısmı, $0 < C_{air} < 1$; başlangıç olarak 0.5 kullanılır
- A_s = sıvının yüzey alanı (m^2)
- ρ = Akışkanın yoğunluğu (kg/m^3)
- k = türbülans kinetik enerji (m^2/s^2)
- L_t = türbülans uzunluk ölçeği (m)
- g_n = serbest yüzeyde yerçekimi (m/s^2)
- σ = yüzey gerilim katsayısı (N/m)

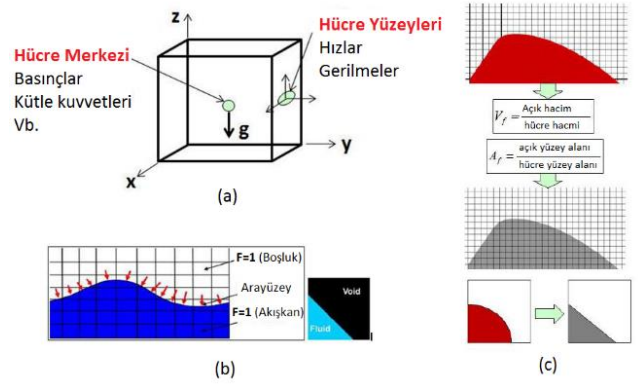
Hava sürüklenme modeli kurumu için gerekli detaylara (skalar model, sürüklenme akısı modeli) karar verildikten sonra başlangıç ve sınır koşulları için türbülans parametrelere seçilmelidir. Türbülans parametreleri aşağıdaki denklemlerle ifade edilmiştir [22].

$$k = 3/2(U*I)^2 \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{k^{3/2}}{L_T} \quad (3)$$

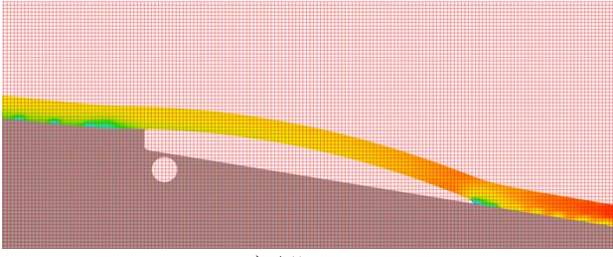
- ε = türbülans dağılım oranı (m^2/s^3)
- U = Ortalama makroskopik hız (m/s)
- I = Türbülans yoğunluğu (düşük türbülans için % 1-5, yüksek türbülans için % 5-20 olup genellikle %5 seçilir).
- C_V = Türbülans modeli katsayısı (tipik olarak 0.09)
- L_T = Türbülanslı uzunluk ölçeği; en büyük çalkantılı girdapların boyutunu açıklar.

Flow-3D, açık kanal akımları gibi iki faz arasındaki (hava-su arayüzü) serbest yüzeyi tanımlamak için modifiye edilmiş akışkan hacmi (TruVOF) yöntemini kullanmaktadır (Şekil 3). Eğer hücre tamamen akışkanla dolu ise hacim oranı $F=1$, boş ise $F=0$ ve akışkan arayüzü içeriyorsa (kısmen dolu ise) $0 < F < 1$ değerlerini alır. TruVOF ile serbest yüzeyin takibi üç aşamadan oluşur; ilkin serbest yüzeyin yeri tespit edilir, fazlar arası (veya boşluk-akışkan arası) keskin bir arayüzey belirlenir ve son olarak bu arayüzeye sınır şartları uygulanır. Bu şekilde arayüzey üzerinde sıfır kayma gerilmesi ve sabit basınç sınır koşulları uygulanmış olur [22].

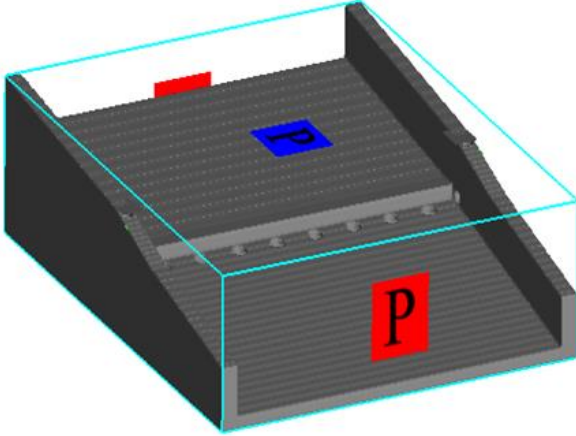


Şekil 3. Flow-3D sayısal model konseptleri [22]: a) Hücre sistemi, b) Akışkan yüzey (TruVOF) konsepti, c) FAVOR yöntemi Havalandırıcı modellerin plan detayları

Sayısal modellerinin ağ yapısı, 0.25 metrelik 'conform' meş kullanarak oluşturulmuştur. Sayısal modelde FAVOR tekniği kullanıldığından seçilen ağ yapısının model geometrisinin çözünürlüğü üzerinde etkisi olacaktır. Bunun için havalandırıcı geometrisini hassas algılayabilecek bir ağ yağı seçilmiştir (Şekil 4a). FAVOR özelliği kullanılarak oluşturulan modellerin sınır koşulları ile birlikte görüntüsü Şekil 4b'de verilmiştir. Sınır koşulları olarak modelin memba yüzü, farklı akım koşullarını giriş olarak tanımlayabilmesi için "velocity inlet", mansab ve üst yüzey "pressure inlet" diğer yüzeyler ise "symmetry" (katı yüzeyleri zaten duvar olarak göreceği için) olarak tanımlanmıştır. Sayısal modellerde dolusavağın uzunluğu 70 m genişliği 55 m yüksekliği 5 m olarak dikkate alınmıştır. Oluşturulan her iki modelde de yaklaşık 4.4 milyon adet yapısal 3D küpik eleman kullanılmıştır. Giriş sınır şartında farklı savaklama debilere karşılık gelen farklı akım derinlikleri ve hızları ve dolayısıyla farklı Froude sayıları tanımlanarak herbir akım durumu için HAD analizleri yürütülmüştür. Havalandırma bacalarının girişlerine yerleştirilen ölçüm akış yüzeyleri (*Flux surface*) sayesinde havalandırıcılar tatafindan akıma sağlanan hava miktarı belirlenmiştir. Böylece sayısal analiz sonuçlarından elde edilen veriler sayesinde her iki havalandırıcı tipinin havalandırma performansları ve su yüzü profilleri gibi hidrolik özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır.



a) Ağ yapısı



b) Sınır koşulları

Şekil 4. Sayısal modelin ağ yapısı ve sınır koşulları

3 Bulgular ve tartışma

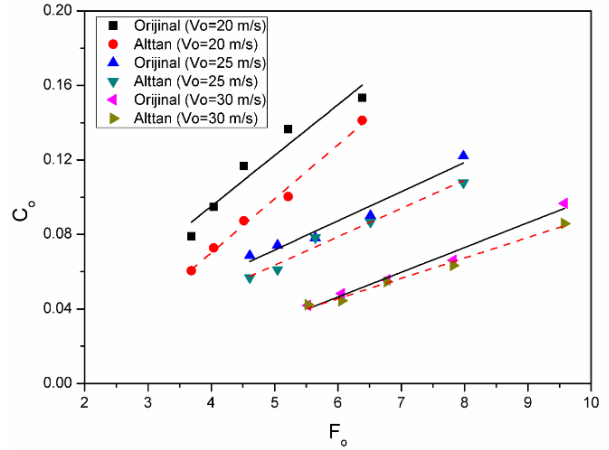
Dolusavak uygulama projesindeki [21] orijinal havalandırıcı tasarımına göre hazırlanmış sayısal modellerin analizleri yürütülmüştür. Farklı debilerde farklı akım koşulları elde etmek için $h = 1.00, 1.50, 2.00, 2.50$ ve 3.00 m 5 farklı akım derinliği için kavıtasyon riski oluşturan 20, 25 ve 30 m/s olmak üzere 3 farklı giriş hızı seçilmiştir (V_o). Böylece $F_o = 3.69 - 9.58$ aralığında 15 farklı memba Froude sayısı için analizler yapılmıştır. Flow-3D'de nap yüzeyinden giren hava miktarlarını belirleyebilmek için Hava Giriş Modeli (Air Entrainment Model) kullanılmıştır. Oluşturulan her iki havalandırma durumu için hazırlanmış HAD analizi sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Havalandırıcı modellerin HAD sonuçları

Model No	h (m)	B (m)	V_o (m/s)	F_o	Q_a (m ³ /s) (orijinal)	Q_a (m ³ /s) (alttan)	B (orijinal)	B (alttan)	C_o (orijinal)	C_o (alttan)
1	1.00	55.00	20.00	6.39	199.22	180.89	0.18	0.16	0.14	0.15
2	1.00	55.00	25.00	7.98	191.23	166.09	0.14	0.12	0.11	0.12
3	1.00	55.00	30.00	9.58	176.59	154.78	0.11	0.09	0.09	0.10
4	1.50	55.00	20.00	5.21	260.69	183.90	0.16	0.11	0.10	0.14
5	1.50	55.00	25.00	6.52	204.40	195.56	0.10	0.09	0.09	0.09
6	1.50	55.00	30.00	7.82	175.20	167.43	0.07	0.07	0.06	0.07
7	2.00	55.00	20.00	4.52	290.47	210.40	0.13	0.10	0.09	0.12
8	2.00	55.00	25.00	5.64	233.06	233.57	0.08	0.08	0.08	0.08
9	2.00	55.00	30.00	6.77	194.29	190.28	0.06	0.06	0.05	0.06
10	2.50	55.00	20.00	4.04	288.13	215.80	0.10	0.08	0.07	0.09
11	2.50	55.00	25.00	5.05	275.37	223.58	0.08	0.07	0.06	0.07
12	2.50	55.00	30.00	6.06	208.76	191.33	0.05	0.05	0.04	0.05
13	3.00	55.00	20.00	3.69	282.95	212.58	0.09	0.06	0.06	0.08
14	3.00	55.00	25.00	4.61	304.12	248.10	0.07	0.06	0.06	0.07
15	3.00	55.00	30.00	5.53	216.23	218.23	0.04	0.04	0.04	0.04

Sayısal modellerden, havalandırıcı ve serbest nap yüzeylerinden sağlanan hava miktarı okunarak hava giriş oranı (β) ve ortalama hava konsantrasyonu (C_o) hesaplanmıştır. Bu değerlerin daha iyi yorumlanabilmesi için Şekil 5'deki grafik çizdirilmiştir.

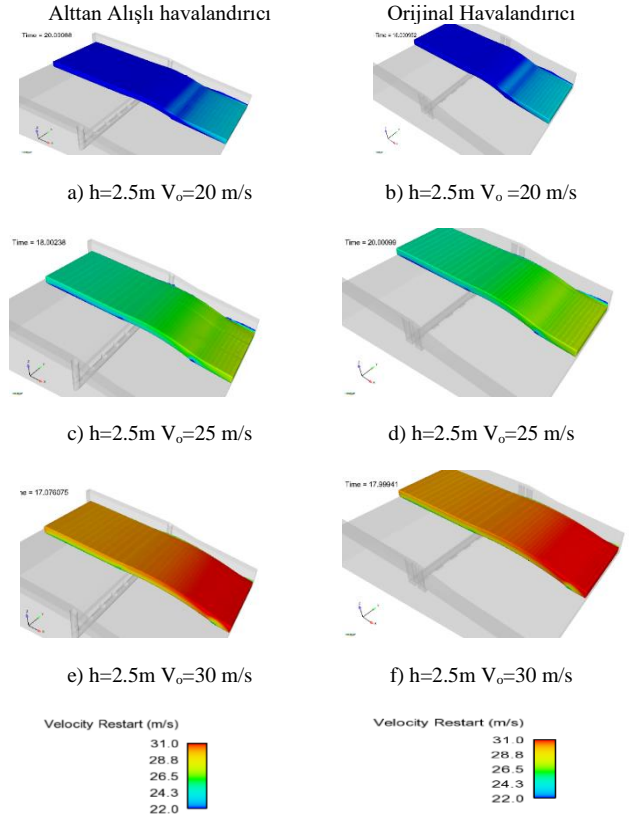
Şekil 5'deki grafikte, her iki tip havalandırıcı tipinin havalandırma performanslarının, ortalama hava konsantrasyonları farklı akım hızları için Fr sayısı ile değişimleri verilmiştir. Yüksek hızlarda ($V_o = 30$ m/s gibi) iki havalandırıcı performansı arasında pek bir fark gözlemlenmezken, düşük hızlarda orijinal tasarımın havalandırma performansının belirgin şekilde üstün olduğu görülmektedir. Bu farklar ortalama olarak $V_o = 30$ m/s için %5, $V_o = 25$ m/s için %10, $V_o = 20$ m/s için %20, genel ortalamada ise %12 civarındadır. İki baca ve kanal boyunca iki farklı galeri/oluk ile beslenmesi orijinal havalandırıcının havalandırma performansının üstün yüksek olmasının başlıca sebebi sayılabilir. Proje firması [21] tarafından hem yandan hem de eşik altındaki galerilerden sağlanan hava sayesinde iyi bir havalandırma sağlanmıştır. Sadece şut altındaki havalandırma galerileri sayesinde havalandırma sağlayan alttan alıslı havalandırıcı ise düşük hızlar dışında yakın bir havalandırma sağlamaktadır. Bu havalandırıcının avantajının kanal boyunca üniform hava sağlaması ve özellikle düşük Froude sayılarında iyi performans göstermesidir [7].



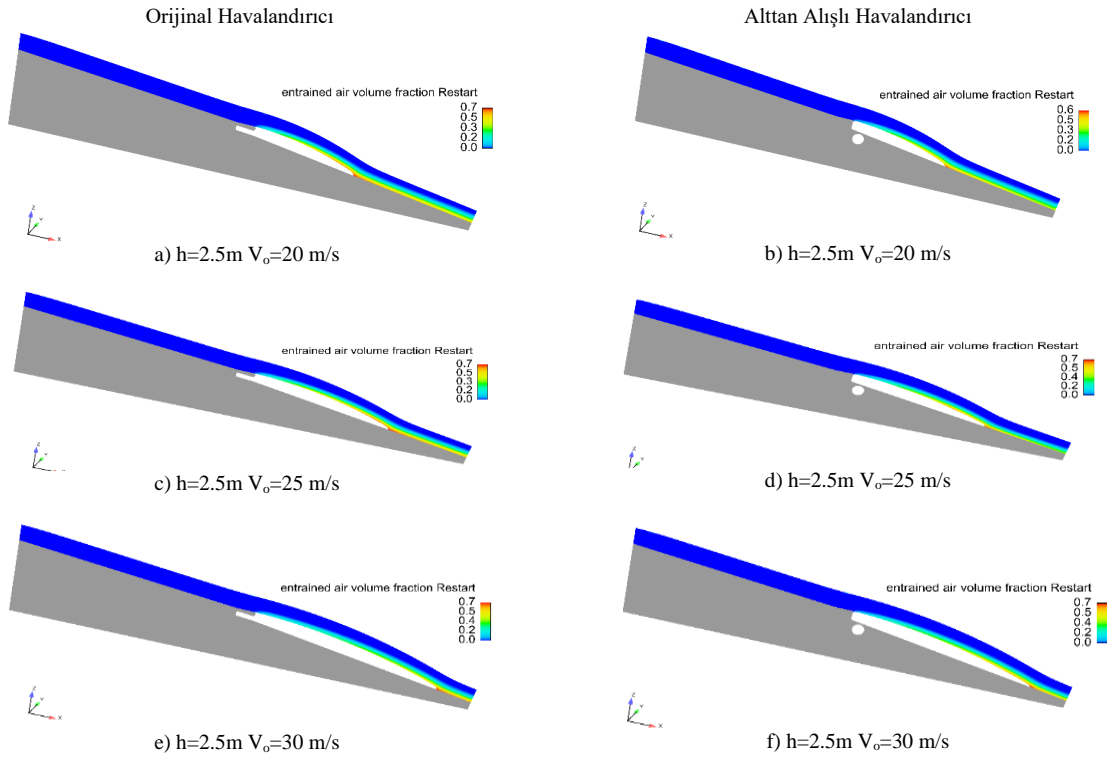
Şekil 5. Orijinal ve alttan alıslı havalandırıcı sonuçlarının karşılaştırılması (Ortalama hava konsantrasyonu ile)

Şekil 6’da farklı akım durumlarında orijinal havalandırıcı ve alttan alıŖlı havalandırıcı için verilen hava giriŖi hacim oranlarının boykesitler üzerindeki dağılımları görölmektedir. Havalandırıcı tarafından oluŖturulan alt naptan havalandırıcı saptırıcı ucundan itibaren akıma önemli miktarda hava karıŖmaktadır. Alt naptan giren hava serbest jet uzunluğu boyunca akıma karıŖmakta ve karıŖım bölgesinin kalınlığı artmaktadır. Düşük akım derinliklerinde mansaptaki hava karıŖımı tüm akım derinliğinde etkili olurken, yüksek akım derinliklerinde giren hava mansapta tabana yakın dağılmaktadır. Akımdaki hava konsantrasyonunun tabana yakın yođunlaŖması tabanı kaviteyondan korunması açısından olumlu bir etki yaratacaktır. Ŗekillerdeki akım durumları için her iki durumda tabana yakın yeterli hava konsantrasyonunun sağlandığı görölmektedir.

Şekil 7’de orijinal ve alttan alıŖlı havalandırıcıların akım boykesitlerindeki hava karıŖım oranlarının ($h=2.5$ m) karıŖlaştırılması yapılmıŖtır. Sayısal modellerden anlaŖılacađı üzere tabana yakın alt naptalarda hava karıŖımının yeterli olduğu her iki havalandırma modellerinde saptanmıŖtır. Her iki modelde hava karıŖımının benzer olduğu kaviteyondan hasarı meydana getirmeyecek kadar yeterli olduğu saptanmıŖtır. Jet uzunluğunun hava giriŖ oranı üzerinde önemli bir etkisi olduğu bilinmektedir. Ŗekillerden anlaŖılacađı üzere orijinal havalandırıcı durumunun serbest jet uzunlukları ve dolayısıyla alt naptan karıŖan hava miktarları daha büyüktür.



Şekil 7. Orijinal ve alttan alıŖlı havalandırıcılar üzerindeki serbest akım durumlarının karıŖlaştırılması



Şekil 6. Orijinal ve alttan alıŖlı havalandırıcıların akım boykesitlerindeki hava karıŖım oranlarının karıŖlaştırılması

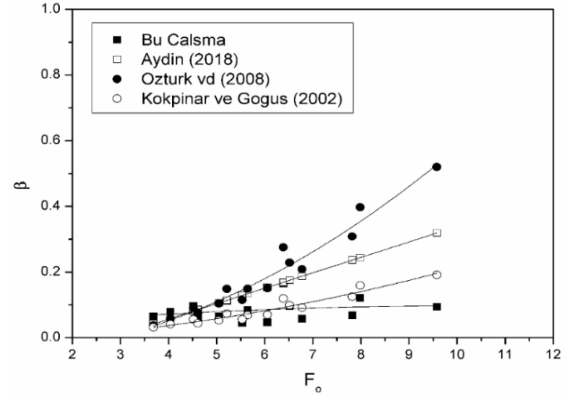
Dolusavak havalandırıcıların hava giriş oranlarıyla ilgili daha önce yapılmış bazı çalışmalardan elde edilmiş bağıntılar Tablo 3’de verilmiştir. Kökpınar ve Göğüş [5] yaptığı kapsamlı deneysel çalışma sonucu hava giriş katsayısını boyutsuz serbest jet uzunluğu, boyutsuz hava giriş oranı ve şut eğimine bağlı olarak veren Denklem (4)’ü önermişlerdir. Verilen bu denklem model deneyleri sonucu elde edilmiş olup ölçek etkileri içermektedir. Öztürk ve ark. [8] Alttan alışı havalandırıcılar için Froude sayısı yanında boyutsuz havalandırıcı ve saptırıcı geometrisini de içeren bir bağıntı elde etmişlerdir (Denklem 5). Pfister ve Hager [23] hava giriş katsayısını Froude sayısı ve saptırıcı eğimine bağlı olarak veren amprik bir bağıntı elde etmişlerdir (Denklem 6). Aydın [9], Öztürk ve ark. [8]’in çalışmasına benzer olarak iki fazlı HAD analizi sonucu, hava giriş oranının memba Froude sayısı ile doğrusal değiştiğini veren bir bağıntı vermişlerdir (Denklem 7). Bu denklemde $F_o > 2.8$ için verilmiş olup bu değerin altında hava girişini olmadığı kabul edilmiştir.

Tablo 3. Hava giriş katsayısı ile ilgili literatürdeki bazı bağıntılar

$\beta_m = 0.0189 \left(\frac{L_j}{h} \right)^{0.83} \left[\left(\frac{A_a}{A_w} \right) (1 + \tan \alpha) \right]^{0.24}$	Kökpınar ve Göğüş [5] Denklem (4)
$\beta_c = 0.14 (F_o - 2.8) \left(\frac{D^2}{Lh} \right)^{0.20} \left(\frac{t_r}{h} \right)^{0.35}$	Öztürk ve ark. [8] Denklem (5)
$\beta = 0.0028 F_o^2 [1 + F_o \times \tan \theta] - 0.1$	Pfister ve Hager [18] Denlem (6)
$\beta = 0.047 (F_o - 2.80)$	Aydın [9] Denklem (7)

Tablo 3’de verilen denklemlerdeki, F_o memba Froude sayısını, L_j havalandırıcı serbest jet uzunluğunu (saptırıcı ucundan jetin taba birleştiği çarpma noktasına olan mesafe, m), h memba akım derinliğini (m), D alttan alışı havalandırıcıların tabana yerleştirilen hava deliklerinin çapını (m), L alttan alışı havalandırıcı deliklerinin ara mesafesini (m), α dolusavak şut kanalı eğim açısını, θ ise havalandırıcı saptırıcı (rampa) açısını, A_a ve A_w sırasıyla hava bacası giriş ve akım kesitlerini ifade etmektedir. Öztürk ve ark. [8] ile Aydın [9], verdiği denklemleri $2.80 \leq F_o \leq 10.00$, $0.17 \leq \tan \alpha \leq 0.57$, $0.04 \leq t_r/h \leq 0.50$, $0.032 \leq D^2/Lh \leq 0.539$ aralıkları için önermiştir. Bu araştırmacılar saptırıcı açısını $\theta=5.71^\circ$ alırken bu çalışmada $\theta=5.71^\circ$ olarak alınmıştır. Bu çalışmadaki havalandırıcının verilen literatürdekilerden diğer bir farkı ise rampa ile birlikte bir eşik kullanılmış olmasıdır.

Diğer formüllerden elde edilen değerler Şekil 8’de verilen grafiklerde karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Grafiklerde görüleceği üzere küçük Froude sayılarında sonuçlar arasında önemli farklar gözükmezken büyük Froude sayılarında aralarındaki farklar büyümektedir.



Şekil 8. Hava giriş katsayılarının literatürle karşılaştırılması

Anlaşılabileceği üzere problemin zorluğu ve yüksek hız ve türbülanslı hava-su akımı karmaşıklığı nedeniyle özellikle akımın enerjisinin yüksek olduğu yüksek Froude sayılarında yöntemler farklı sonuçlar verebilmektedir. Bunun muhtemel sebebi sayısal modellerde kullanılan “Air Entrainment” çözüm tekniğidir. Yukarıda da belirtildiği gibi bu modelde, türbülans ve akış durumundan dolayı sıvı içerisindeki yaklaşık hava miktarını belirlemeye çalışılır. Yöntemdeki ana fikir, türbülanslı girdapların, havayı hapseden ve sıvının gövdesine geri taşıyan serbest bir yüzeyin üzerine küçük sıvı elementleri yerleştirilmesidir. Hava sürüklenme oranı türbülans dengesi ve yüzey gerilimine bağlıdır [22]. Yöntem tek fazlı akım modeli üzerinden çalışır ve dolayısıyla aslında hava fazını ve dolayısıyla gerçek bir karışımı hesaplamaz. Hava fazını içermediğinden boşluk hacimlerinde hava hız ve basınçlarını hesaplayamayacaktır. Yani özellikle yüksek akım hızlarında meydana gelen jet altı basınçları ve dolayısıyla basınç farkından meydana gelecek hava girişlerini hissetmeyecektir. Diğer bir deyişle bu yöntemde jet altı boşluğun tam havalandığı kabul edilir (ki deneysel çalışmalarda da tam havalandırılmış jet altı akım koşulları sağlanır) ve jet altı basınçların etkisi ihmal edilmiş olur. Bu nedenle Kökpınar ve Göğüş [5] deneysel çalışma sonuçlarına yakın sonuç verirken altbasınçların etkili olduğu diğer modellerden küçük sonuçlar vermiştir. Şunu belirtmek gerekir ki Şekil 8’de verilen sonuçların her biri farklı yöntem ve havalandırıcı tipleri için elde edilmiştir. Bununla birlikte elde edilen hava giriş oranları özellikle kavite riskinin yüksek olduğu yüksek akım hızlarında diğer yöntemlerden nispeten daha düşük sonuç değerleri verdiği için tasarımı için daha güvenli olacağı söylenebilir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada hava giriş modeliyle HAD analileri yardımıyla, seçilen bir havalandırıcının orijinal tasarımı ile alternatif olarak kullanılan alttan alışı havalandırıcılar üzerinde serbest akım durumlarında karşılaştırılmaları yapılmıştır. Oluşturulan sayısal görüntülerin akımın fiziksel olarak gerçekleştiği görülmüştür. Her iki havalandırıcıda da akım yüksekliği sabit tutulup hız artılığında serbest jet uzunluklarının arttığı gözlemlenmiştir. Her iki havalandırıcı

dada değme noktalarında hızlarda düşüş olduğu ve dinamik basınçlarda artış olduğu gözlemlenmiştir.

Her iki tip havalandırıcı tipinin havalandırma performansları hava giriş oranları ve ortalama hava konsantrasyonları farklı akım hızları için Fr sayısı ile değişimleri karşılaştırılmış, yüksek hızlarda önemli bir fark gözükmezken, düşük hızlarda orijinal tasarımın havalandırma performansının ortalamada %12 daha iyi olduğu görülmüştür. Sadece şut altındaki havalandırma galerileri sayesinde havalandırma sağlayan alttan alıslı havalandırıcı düşük hızlar dışında orijinal havalandırıcıya yakın havalandırma sağlarken, klasik (rampa-çelik-oluk) ve alttan havalandırıcının birlikte kullanıldığı hibrit bir tip olan orijinal havalandırıcı yüksek hızlarda iki yönlü havalandırma sayesinde daha iyi bir havalandırma performansı sağlamıştır. Yandan havalandırma özellikle yüksek Froude sayılarında akıma daha fazla hava sağlarken alttan havalandırma ise düşük Froude sayılarında ve kanal genişliği boyunca iyi bir havalandırma sağlamaktadır. Sayısal model boykesitlerinden her iki modelde hava karışımının benzer olduğu kaviteasyon hasarı meydana getirmeyecek kadar yeterli olduğu saptanmıştır.

Bu çalışma ışığında, dolusavaklar tasarlanırken kaviteasyon hasarını önlemek için havalandırıcıların önemi bir kez daha gösterilmiştir. Havalandırıcı tasarlanırken havalandırıcının tipi de önemli bir parametredir. Bu çalışmada kullanılan orijinal ve alttan alıslı havalandırıcı tiplerinin kaviteasyon hasarından korunmak için gayet iyi çalıştığı gösterilmiştir. Elde edilen havalandırma performansları ve kaviteasyon indeksleri göstermiştir ki, incelenen model için orijinal havalandırıcı tasarımı daha güvenli olmakla birlikte her iki havalandırıcı tipi de kaviteasyon önlemede etki olacaktır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma Özdemir [24]'in yüksek lisans tezinden türetilmiştir. Çalışmaya desteklerinden dolayı Hidrodizayn, ENERGO-PRO ve DSİ 17. Bölge Müdürlüğüne teşekkür ederiz.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Kaynaklar

- [1] H. Chanson, Study of air demand on spillway aerator. *Journal of Fluid Engineering*, 112 (3), 343-350, 1990. <https://doi.org/10.1115/1.2909410>.
- [2] P. Volkart, P. Rutschmann, Aerators on spillways in Air Entrainment in Free Surface Flows. Edited by I. R. Wood, A. A. Balkema Publications, Rotterdam, 85-114, 1991.
- [3] N. L. De S. Pinto, Cavitation and aeration, in *Advanced Dam Engineering for Design, Construction, and Rehabilitation*. Edited by R.B. Jansen, Kluwer Academic Publishers, 620-634, 1988.
- [4] M. X. Nie, Cavitation prevention with roughened surface. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127 (10), 878-880, 2001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2001\)127:10\(878\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2001)127:10(878)).
- [5] M. A. Kökpınar and M. Göğüş, High-speed jet flows over spillway aerators. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 29 (6), 885-898, 2002. <https://doi.org/10.1139/102-088>.
- [6] M. B. Boes and W. H. Hager, Two-phase flow characteristics of stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129 (9), 661-670, 2003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2003\)129:9\(661\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:9(661)).
- [7] M. C. Aydın, Altan alıslı dolusavak havalandırıcıların CFD analizi. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2005.
- [8] M. C. Aydın and M. Öztürk, Verification and validation of a computational fluid dynamics (CFD) model for air entrainment at the spillway aerators. *Canadian Journal of Civil Engineering (ISI)*, 36 (5), 826-836, 2008. <https://doi.org/10.1139/L09-017>.
- [9] M. C. Aydın, Aeration efficiency of bottom-inlet aerators for spillways. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 24 (3), 330-336, 2018. <https://doi.org/10.1080/09715010.2017.1381576>.
- [10] H. Y. Chen, W. L. Xu, J. Deng, Z. P. Niu, S. J. Liu and W. Wang, Theoretical and experimental studies of hydraulic characteristics of discharge tunnel with vortex drop. *Journal of Hydrodynamics*, 22 (4), 582-589, 2010. DOI: 10.1016/S1001-6058(09)60091-3.
- [11] J. M. Zhang, J. G. Chen, W. L. Xu, Y. R. Wang and G. J. Li, Three-dimensional numerical simulation of aerated flows downstream sudden fall aerator expansion-in a tunnel. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 23 (1), 71-80, 2011. DOI: 10.1016/S1001-6058(10)60090-X.
- [12] M. Pfister and H. Chanson, Two-phase air-water flows: Scale effects in physical modeling. *Journal of Hydrodynamics*, 26 (2), 291-298, 2014. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(14\)60032-9](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(14)60032-9).
- [13] A. Kamel and I. Abdulhameed, Study the Effect of Spillway Locations on the Hydraulic Properties of Spillway. *Ciência e Técnica Vitivinícola*, 31 (5), 90-106, 2016.
- [14] C. K. Novakoski and R. F. Hampe, E. Conterato, M. G. Marques and E. D. Teixeira, Longitudinal distribution of extreme pressures in a hydraulic jump downstream of a stepped spillway. *Brazilian Journal of Water Resources*, 22 (42), 1-8, 2019. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.0117160035>.
- [15] R. Daneshfaraz, A. Ghaderi, A. Akhtari, and S. Di Francesco, On the effect of block roughness in ogee spillways with flip buckets. *Fluids*, 5 (4), 182, 2020. <https://doi.org/10.3390/fluids5040182>.
- [16] H. Chanson, Flow downstream of aerator-aerator spacing, *Journal of Hydraulic Research*, 27(4), 519-536, 1989. <https://doi.org/10.1080/00221688909499127>.
- [17] P. Volkart and A. Chervet, Air slots for flow aeration-determination of shape, size and spacing of air slots for the San Roque Dam Spillway, *Mitteilungen der*

- Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologia und Glaziologie, No. 66, Zürich, Switzerland, 1983.
- [18] J. A. Kells and C. D. Smith, Reduction of cavitation on spillways by induced air entrainment, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 18(3), 358-377, 1991. <https://doi.org/10.1139/191-047>.
- [19] P. Rutschmann and W. H. Hager, Design and performance of spillway chute aerators, *International Water Power and Dam Construction*, 42(1), 36-42, 1990.
- [20] J. Cassidy and R. Elder, Spillways of high dams, in *Developments in Hydraulic Engineering 2*, Edited by P. Novak, Applied Science Publishers Ltd. Essex, UK, 153-173, 1984.
- [21] Hidrodizayn, Alparslan II Barajı ve HES Projesi Dolusavak Hidrolik Hesap Raporu. ENERGO-PRO, Murat Nehri Enerji Üretim A.Ş., 2018.
- [22] Flow Science, FLOW-3D User Manual. Theory Guide, 2016.
- [23] M. Pfister and W. H. Hager, Chute aerators II: Hydraulic design, *J. Hydraul. Eng.* 136, 360-367, 2010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000201](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000201).
- [24] M. R. Özdemir, Dolusavak Havalandırıcılarının Sayısal Modelle İncelenmesi, Yüksek Lisan Tezi, Bitlis Eren Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 74s, 2021.





Geochemistry of Upper Eocene-Oligocene sandstones from Tuzgölü Basin (Central Anatolia)

Tuzgölü Havzasından Üst Eosen-Oligosen kumtaşlarının jeokimyası (Orta Anadolu)

Mehmet Yavuz Hüseyinca ^{1,*} , Şuayip Küpeli ² 

^{1,2} Konya Technical University, Geological Engineering Department, 42250, Konya, Turkey

Abstract

In this study, mineralogical and geochemical features of Upper Eocene-Oligocene sandstones exposed by the Tuzgölü Fault Zone (TFZ) at the eastern border of the Tuzgölü Basin were investigated. The absence of zircon enrichment in the Zr/Sc-Th/Sc diagram indicated no sedimentary recycling. This shows that the sandstones are first cycle sediments, that is, the material transported directly from the source. Critical element ratios for provenance such as La/Sc, La/Co, Th/Sc, Th/Co, Th/Cr, Zr/Sc, Zr/Co, Ba/Sc, and Ba/Co, Th/Sc-Eu/Eu* diagram and average Rare Earth Element (REE) pattern suggest a provenance in “intermediate magmatic” composition. The variation in the negative Ce anomaly effect observed between the lower and upper parts of the sequence indicates variation in the oxygen level of the water. In each of the La-Th-Sc, Th-Co-Zr/10, and Th-Sc-Zr/10 tectonic setting discrimination diagrams, the sandstone average fell onto the “Continental Island Arc” position. This tectonic setting defines the arc that developed along the continental margin of the subduction zone. The tectonic setting found for the basin, supported the evolution model that the Tuzgölü Basin developed as a fore-arc basin.

Keywords: Ce anomaly, Provenance, Sandstone, Tectonic setting, Tuzgölü Basin

1 Introduction

Tuzgölü Basin is located in the central part of Anatolia (Figure 1). The basin has been the subject of many studies due to its geology, hydrocarbon potential and evaporite-bearing sediments [1-11].

There are two different views in the literature regarding the tectonic evolution of the basin. One of them suggests that the basin developed as a fore-arc basin together with the Haymana Basin [12, 13]. The other suggests that the basin developed in the intra-continental rifting zone [14, 15]. In this study, Upper Eocene-Oligocene sandstones exposed by the TFZ at the eastern border of the basin were investigated. Clastic sediments can keep geochemical records of the effects they have been exposed to, from the source to the diagenesis. Therefore, geochemical records are very useful

Özet

Bu çalışmada, Tuzgölü Havzasının doğu sınırında Tuzgölü Fay Zonu (TFZ) tarafından açığa çıkarılmış olan Üst Eosen-Oligosen kumtaşlarının mineralojik ve jeokimyasal özellikleri incelenmiştir. Th/Sc-Zr/Sc diyagramında zirkon zenginleşmesinin olmaması, sedimanter tekrardan çevrim olmadığını belirtmiştir. Bu, kumtaşlarının birinci döngü çökel olduğunu yani malzemenin doğrudan kaynaktan gelmiş olduğunu göstermektedir. La/Sc, La/Co, Th/Sc, Th/Co, Th/Cr, Zr/Sc, Zr/Co, Ba/Sc ve Ba/Co gibi provenans için kritik element oranları, Th/Sc-Eu/Eu* diyagramı ve ortalama Nadir Toprak Element (NTE) deseni, “ortaç magmatik” bileşimli bir provenansı önermektedir. İstifin alt ve üst kısımları arasında gözlemlenen negatif Ce anomalisi etkisindeki farklılık, suyun oksijen seviyesinde değişim olduğunu göstermektedir. La-Th-Sc, Th-Co-Zr/10 ve Th-Sc-Zr/10 tektonik konum ayırma diyagramlarının her birinde kumtaşı ortalaması “Kıtasal Adayayı” konumuna düşmüştür. Bu tektonik konum dalma batma zonunun kıta kenarında gelişen bir yaydır. Bulunan tektonik konum, Tuzgölü Havzasının bir yay önü havza olarak geliştiği yönündeki evrim modelini desteklemiştir.

Anahtar kelimeler: Ce anomalisi, Kumtaşı, Provenans, Tektonik konum, Tuzgölü Havzası

for determining provenance and tectonic setting. This paper aimed to contribute to the discussion in the literature by making inferences about the tectonic setting of the source region in the period when the sandstones were deposited, as well as providing an understanding of the geochemistry of the sandstones.

1.1 Regional tectonic setting

The opening and closing movements of the oceans in the Tethyan region caused many continental blocks to break away from the main continents. Therefore, the collision boundary between Laurasia and Gondwana can't be represented by a single suture line [16]. This situation is very evident in Anatolia, which is an important component of the Alp-Himalayan orogenic belt. The Anatolian landmass consists of several micro-continents that were aggregated

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: myhuseyinca@ktun.edu.tr (M. Y. Hüseyinca)
Geliş / Received: 03.11.2021 Kabul / Accepted: 27.12.2021 Yayınlanma / Published: 14.01.2022
doi: 10.28948/ngumuh.1018818

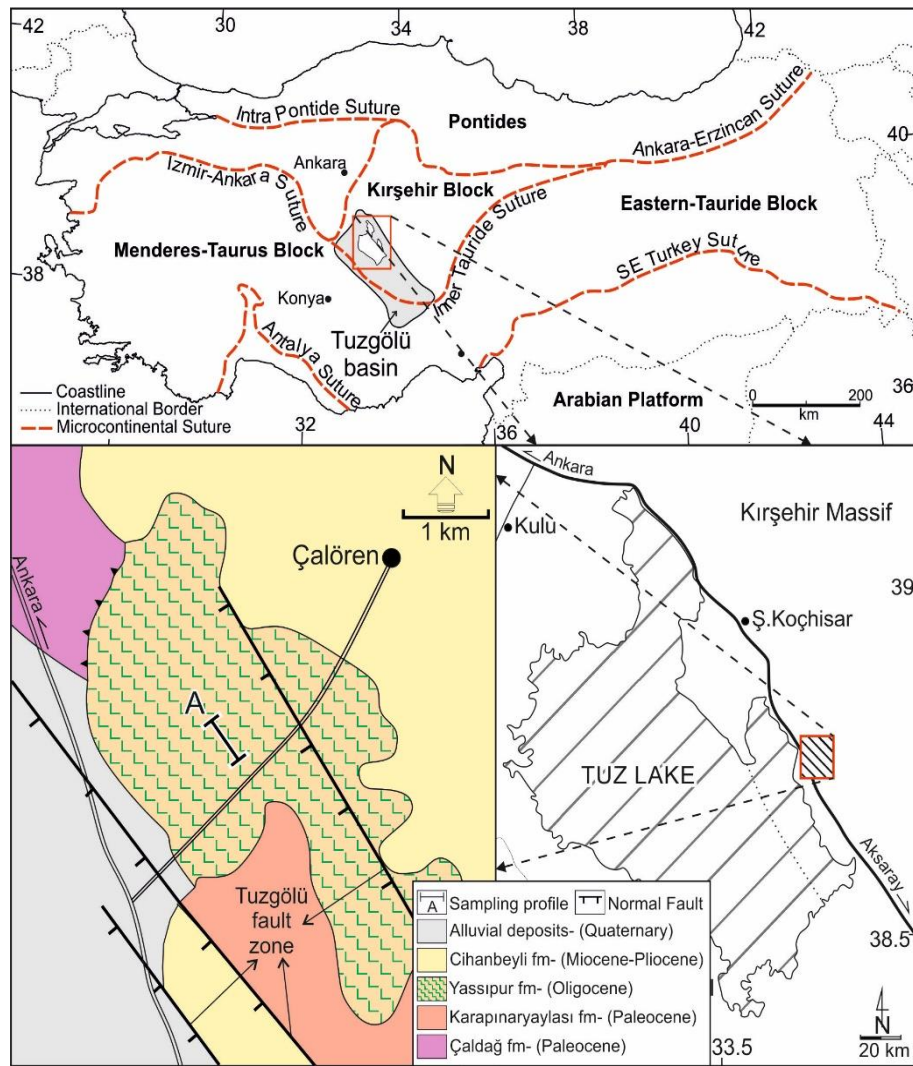


Figure 1. Major terrane divisions of Turkey with associated sutures [16] and detailed geological map of the study area [23].

due to the closure of different branches of the Tethyan Ocean [17-21] (Figure 1). During the Neo-Tethyan evolution of Turkey, several sedimentary basins called the Central Anatolian Basins formed between these micro-continents [22]. Tuzgölü Basin is one of these inner basins.

1.2 Tuzgölü Basin deposits

The basin is bordered by the Kırşehir Massif in the east [24], the Kütahya-Bolkardağı belt in the west and south [25], and the Samsam heights in the north [26]. A thick sedimentary succession was deposited in the basin between Late Cretaceous and Quaternary (Figure 2). Deep drillings, geophysical surveys, outcrops exposed by the TFZ and correlation with the adjacent Haymana Basin are the main sources of sedimentary data on this succession. The main reason for this is that the basin fill was mostly covered by younger sediments. The TFZ is a normal fault system, with a right-lateral strike-slip and sometimes a small reverse component [27, 28].

The basin fill deposited until the Upper Eocene is mainly represented by redbeds and conglomerates (Kartal

Formation), thick turbidites (Karapınarayaylası Formation), and local limestones (Asmaboğazı Member and Çaldağ Formation). Upper Eocene-Oligocene sediments consisting of shallow marine-terrestrial clastics and evaporites (Yassipur Formation) unconformably overlie these older units. Miocene sediments are represented by the coal-bearing lake deposits (Koçhisar Formation) that unconformably overlie the previous units. The Mio-Pliocene sediments including conglomerate, sandstone, siltstone, claystone, and lacustrine limestones (Cihanbeyli Formation) overlie the previous formations. Quaternary alluvial deposits mostly cover all the older units (Figure 2).

The sandstones investigated in this study are found in the upper part of the Yassipur Formation (Figure 3). The sandstones outcropped along the TFZ, were sampled around Çalören Village (Aksaray) (Figure 1, Line-A). The thickness of the sandstone sequence here is about 80 meters and consists of medium to thick-bedded, fine-medium-grained, and gray-yellowish-brown sandstones (Figure 4).

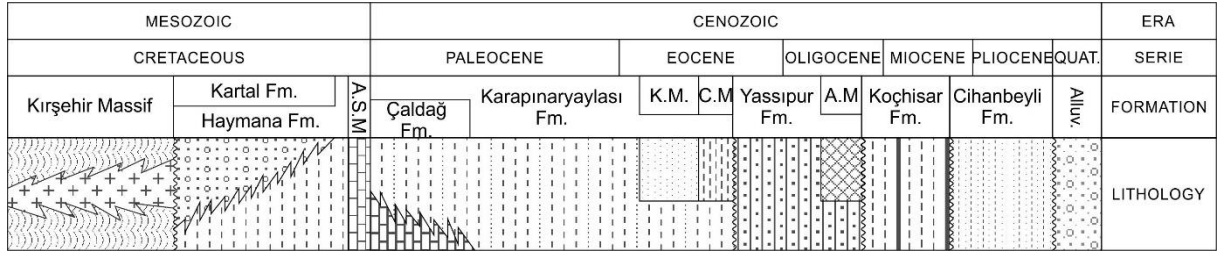


Figure 2. Generalized stratigraphic columnar section of the Tuzgözü Basin (adapted from [29]). Abbreviations; AM: Akbogaz Member, CM: Cavaşkalesi Member, KM: Karamollausağı Member, ASM: Asmayaylası Member.

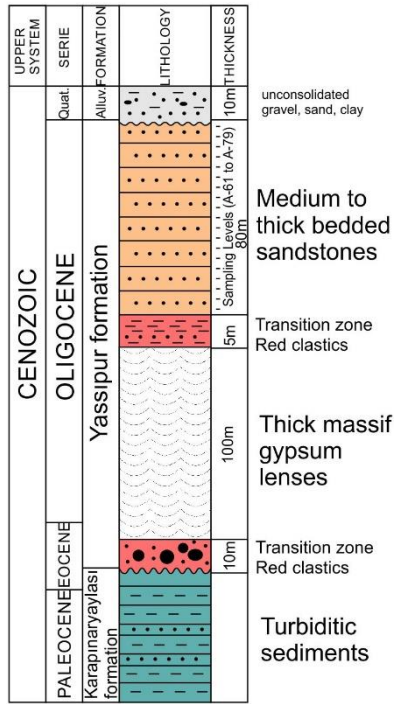


Figure 3. Generalized columnar section of the study area (unscaled).

2 Material and method

In the field, 19 samples were taken systematically (bottom to top) from the sandstone sequence. Petrographic thin sections were prepared following the standards and examined with a polarizing microscope. X-Ray Diffraction (XRD) analyses were performed in MTA Laboratories (Turkey). Samples were grounded by ceramic mortar and pestle. The powder samples were scanned with the Bruker D-8 Advance brand instrument using a 2.2 kW copper X-Ray anode between 10 and 70 degrees. Chemical concentrations of the elements were determined by Inductively Coupled Plasma-Emission Spectrometer (ICP-ES) for major elements and by Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer (ICP-MS) for trace elements in ACME Labs (Canada). Solution samples were prepared by using the lithium borate fusion method. A 0.2 g weighed powder sample was poured into a graphite crucible and mixed with 1.5 g of $\text{LiBO}_2/\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ flux. The mixture was melted in a muffle furnace for 30 minutes at 980 °C. Immediately after being poured into 100 mL of 5 % HNO_3 (ACS grade nitric acid

diluted by distilled water) and mixed to dissolve completely. The solution samples were vaporized into an ICP emission spectrograph (ICP-ES; Spectro Cirus Vision) and ICP-MS (Perkin-Elmer Elan 6000 or 9000) for chemical analysis. The Loss on Ignition (LOI) was calculated by the weight difference for 1 g. sample after ignition at 950°C for 90 minutes. Chondrite [30] and Post Archean Australian Shale (PAAS) [31] contents were used for normalization. Ce and Eu anomalies were calculated with the formulas $\text{Ce}/\text{Ce}^* = \text{Ce}_{\text{cn}} / [(\text{La}_{\text{cn}}) \cdot (\text{Pr}_{\text{cn}})]^{1/2}$ and $\text{Eu}/\text{Eu}^* = \text{Eu}_{\text{cn}} / [(\text{Sm}_{\text{cn}}) \cdot (\text{Gd}_{\text{cn}})]^{1/2}$ (cn: chondrite normalized).



Figure 4. Field photographs of the medium to thick-bedded and grey, yellow to brown coloured sandstones.

3 Results and discussion

3.1 Detrital petrography

In the thin sections, detrital components were composed of quartz %33-40 (avg. %37), feldspars (alkali feldspar and plagioclase) %10-20 (avg. %15), rock fragments %15-30 (avg. %23), biotite %1-2 (avg. %1.5) and opaque minerals %3-7 (avg. %5) (Figure 5). Rock fragments include magmatic (andesite and dacite) and metamorphic (polycrystalline quartz) fragments. These framework grains were cemented by micrite (calcite). Foraminifera and red algae fossils can be observed within cement between the grains. According to Folk [32], sandstones were classified as feldspathic litharenite. XRD analyses show abundances of quartz, plagioclase, and calcite minerals (Figure 6).

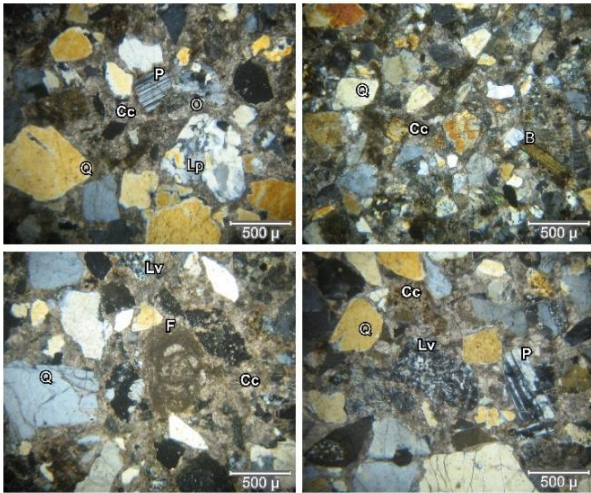


Figure 5. Micro photos of sandstone samples (cross nicols). Q: quartz, P: plagioclase, O: orthoclase, B: biotite, Lp: polycrystalline quartz, Lv: volcanic rock fragments, F: fossils and Cc: micrite.

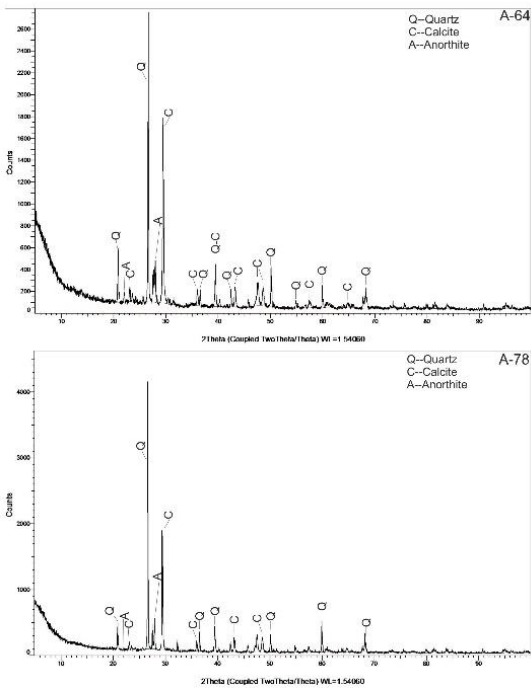


Figure 6. XRD analysis of A-64 and A-78 samples.

3.2 Geochemistry

Major and trace element concentrations of sandstone samples are arranged in Table 1. Compared to PAAS, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , K_2O , TiO_2 , P_2O_5 , MnO and Cr_2O_3 concentrations were depleted, Na_2O remained unchanged and CaO was highly enriched (Figure 7a). Of the trace element concentrations, Mo is enriched while Sc, Ba, Co, Cs, Ga, Hf, Nb, Rb, Sr, Th, U, V, W, Zr, Y, Cu, Pb, Zn, and Ni are depleted (Figure 7b).

The chemical composition of clastic sediments is closely related to their grain size such that Al_2O_3 increases towards clay and SiO_2 towards the sand. In this order, other major oxides behave like Al_2O_3 . This feature can give a strong

prediction about the grain size and mineralogical composition of the clastic sediment [33]. Therefore, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios are low in fine clastic sediments rich in clay minerals and high in coarse clastic sediments rich in quartz minerals. $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios of sandstone samples (avg. 8.07 ± 1.14) are higher than that of PAAS (3.32) but closer to average sandstone (10.93) of Pettijohn et al. [34].

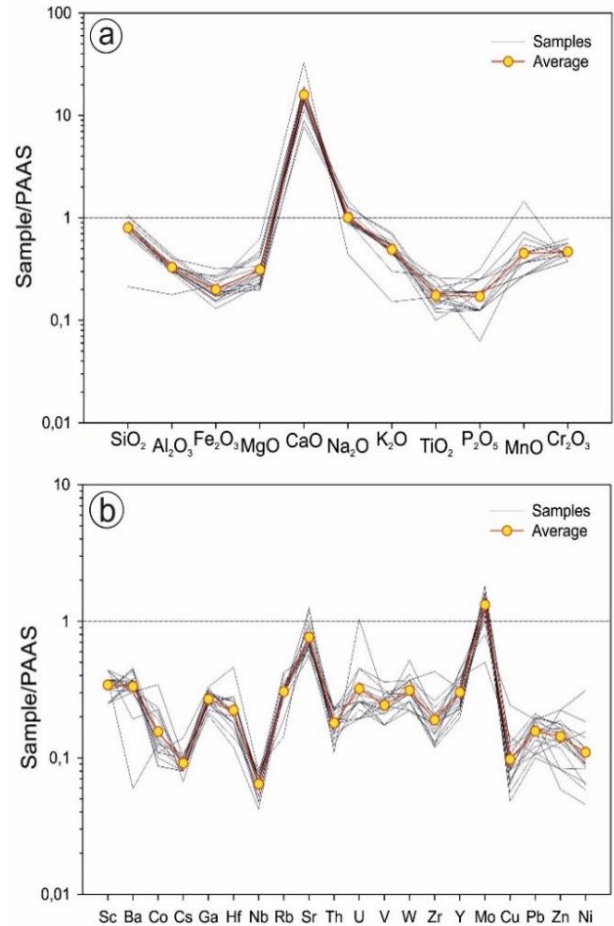


Figure 7. PAAS normalized diagrams (a) major elements and (b) trace elements.

3.3 Rare earth elements

The average, REE contents of the sandstone samples were 31.37 ± 5.71 ppm, Light REE (LREE) contents were 26.47 ± 5.39 ppm, and Heavy REE (HREE) contents were found to be 4.55 ± 0.89 ppm. These values show that REE concentrations were highly depleted compared to PAAS (Figure 8). The low abundance of REE indicates that the sandstones are immature [35]. According to the average $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{cn}}$, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{cn}}$, and $(\text{Gd}/\text{Lu})_{\text{cn}}$ ratios, REE was moderately fractionated according to the PAAS (Table 1). The average of Eu anomaly is 0.99 ± 0.10 . This value shows that the Eu anomaly has a low negative effect. The average Ce anomaly is 0.94 ± 0.07 . Also, this value shows that the Ce anomaly has a low negative effect. According to these features, the chondrite normalized average REE pattern has a slightly steep LREE, nearly flat HREE, and low negative Eu anomaly compared to PAAS.

Table 1. Major (% wt) and trace element (ppm) concentrations and some ratios.

El./Samp.	A-61	A-62	A-63	A-64	A-65	A-66	A-67	A-68	A-69	A-70	A-71
SiO ₂	58.78	51.62	47.30	46.77	45.04	44.62	64.47	66.42	51.50	13.42	49.39
Al ₂ O ₃	7.57	5.86	6.38	6.73	5.85	5.71	7.83	8.20	5.52	3.36	6.34
Fe ₂ O ₃	2.31	1.13	1.26	1.58	1.12	1.32	1.39	1.50	0.94	1.61	1.88
MgO	0.74	0.60	0.72	1.04	0.69	0.48	0.43	0.50	0.49	1.38	0.90
CaO	14.74	21.01	22.45	22.15	24.49	24.60	11.62	10.09	21.16	42.62	20.82
Na ₂ O	1.77	1.22	1.25	1.45	1.20	1.09	1.54	1.53	1.10	0.53	1.31
K ₂ O	1.95	1.72	1.77	1.71	1.69	1.77	2.54	2.63	1.76	0.56	1.63
TiO ₂	0.26	0.18	0.16	0.24	0.13	0.14	0.16	0.18	0.10	0.17	0.21
P ₂ O ₅	0.04	0.03	0.02	0.01	0.02	0.04	0.02	0.03	0.03	0.05	0.04
MnO	0.05	0.04	0.03	0.05	0.03	0.04	0.05	0.03	0.03	0.16	0.08
Cr ₂ O ₃	0.009	0.008	0.007	0.009	0.008	0.007	0.010	0.006	0.006	0.006	0.007
LOI	11.7	16.5	18.6	18.2	19.6	20.1	9.8	8.8	17.3	36.0	17.3
Sum	99.87	99.89	99.92	99.90	99.90	99.92	99.90	99.90	99.95	99.90	99.90
TOT/C	2.70	4.10	4.59	4.69	5.24	4.92	2.39	2.08	4.44	8.90	4.44
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	7.76	8.81	7.41	6.95	7.70	7.81	8.23	8.10	9.33	3.99	7.79
Sc	6	4	6	7	4	5	5	5	4	6	7
Ba	227	225	213	188	197	231	293	288	239	39	197
Co	4.8	2.8	3.5	4.4	3.0	3.5	3.5	2.5	2.0	2.9	7.9
Cs	1.3	1.2	1.4	1.4	1.3	1.5	1.5	2.1	1.2	1.6	1.5
Ga	6.6	4.5	5.1	5.6	5.1	4.9	6.3	6.5	4.1	4.3	6.2
Hf	2.3	1.0	1.4	1.3	0.8	0.9	1.0	1.0	0.6	0.7	1.1
Nb	1.5	1.2	1.2	1.3	1.1	1.0	1.2	1.4	0.8	1.6	1.4
Rb	52.4	48.5	50.7	47.3	48.0	50.2	65.3	67.4	48.0	22.9	45.9
Sr	181.1	244.3	130.7	194.9	146.3	151.7	124.6	114.0	124.9	250.6	157.2
Th	3.0	2.6	3.4	3.3	2.0	2.3	3.4	3.3	1.8	1.6	3.2
U	0.9	0.8	1.1	1.0	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	3.2	1.4
V	39	26	35	40	26	26	31	37	26	41	47
W	1.0	0.6	1.4	1.1	0.7	0.7	1.0	0.8	0.7	1.0	0.6
Zr	89.8	36.6	44.3	48.8	27.3	38.2	41.8	40.4	25.0	25.4	37.4
Mo	1.6	1.8	1.5	1.4	1.3	1.2	1.8	1.1	1.5	0.8	1.2
Cu	6.4	6.0	4.6	5.0	4.3	4.1	5.2	3.2	3.4	12.1	4.9
Pb	4.2	3.2	3.4	3.1	3.2	3.7	3.9	3.7	3.1	3.8	2.9
Zn	14	14	11	16	13	7	15	13	5	19	11
Ni	6.5	5.3	4.9	6.4	5.3	4.6	4.9	5.7	2.5	17.1	8.5
As	2.9	2.9	2.6	1.2	1.8	1.8	1.8	3.0	2.8	1.4	2.9
Sb	0.4	0.3	0.4	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3
Y	8.6	6.2	7.7	9.6	6.6	6.1	6.9	6.5	5.3	12.0	11.6
La	7.4	9.4	8.9	8.8	5.6	5.3	7.6	7.7	4.5	5.5	7.8
Ce	14.0	16.5	16.0	16.1	10.5	9.5	14.2	15.0	8.5	10.0	14.1
Pr	1.58	1.72	1.84	1.75	1.12	1.07	1.58	1.61	0.96	1.18	1.60
Nd	6.2	5.4	6.6	6.4	3.9	4.1	6.1	5.6	3.8	4.8	6.3
Sm	1.19	0.99	1.19	1.17	0.87	0.89	1.16	0.96	0.74	1.13	1.20
Eu	0.41	0.33	0.37	0.38	0.31	0.29	0.39	0.39	0.29	0.33	0.37
Gd	1.21	1.02	1.21	1.21	0.89	0.84	1.17	1.02	0.74	1.39	1.42
Tb	0.23	0.16	0.19	0.23	0.15	0.15	0.18	0.17	0.14	0.25	0.24
Dy	1.31	0.89	1.11	1.38	0.94	0.84	1.11	1.00	0.78	1.42	1.48
Ho	0.29	0.20	0.24	0.32	0.21	0.20	0.22	0.22	0.17	0.33	0.34
Er	0.85	0.68	0.77	0.97	0.66	0.57	0.69	0.71	0.52	1.07	1.09
Tm	0.14	0.10	0.12	0.16	0.11	0.10	0.11	0.11	0.09	0.17	0.17
Yb	0.94	0.59	0.75	0.93	0.58	0.63	0.73	0.70	0.50	0.99	1.03
Lu	0.16	0.10	0.12	0.15	0.10	0.09	0.12	0.10	0.08	0.17	0.17
ΣREE	35.91	38.08	39.41	39.95	25.94	24.57	35.36	35.29	21.81	28.73	37.31
(La/Yb) _{cn}	5.45	11.03	8.22	6.55	6.68	5.82	7.21	7.62	6.23	3.85	5.24
(La/Sm) _{cn}	3.90	5.95	4.69	4.71	4.03	3.73	4.11	5.03	3.81	3.05	4.07
(Gd/Lu) _{cn}	0.93	1.26	1.25	1.00	1.10	1.15	1.21	1.26	1.14	1.01	1.03
(Ce/Ce*) _{cn}	0.98	0.98	0.95	0.98	1.01	0.96	0.98	1.02	0.98	0.94	0.96
(Eu/Eu*) _{cn}	1.04	1.00	0.94	0.97	1.07	1.02	1.02	1.20	1.19	0.80	0.86

Table 1. Major (% wt) and trace element (ppm) concentrations and some ratios (continued).

El./Samp.	A-72	A-73	A-74	A-75	A-76	A-77	A-78	A-79	Average	PAAS
SiO ₂	50.65	55.51	54.48	55.72	52.96	41.75	53.02	51.19	50.24	62.80
Al ₂ O ₃	5.78	6.13	6.74	6.38	6.11	5.52	6.34	5.96	6.23	18.90
Fe ₂ O ₃	1.09	1.24	1.49	1.37	1.23	1.97	1.74	1.23	1.44	7.23
MgO	0.51	0.45	0.67	0.62	0.55	0.95	0.72	0.61	0.69	2.20
CaO	20.97	17.73	17.91	17.54	19.15	24.93	18.36	20.15	20.66	1.30
Na ₂ O	1.04	1.09	1.12	1.17	1.09	1.13	1.19	1.16	1.21	1.20
K ₂ O	2.00	2.21	2.05	1.94	2.02	1.11	1.73	1.73	1.82	3.70
TiO ₂	0.13	0.12	0.19	0.18	0.15	0.27	0.20	0.15	0.17	1.00
P ₂ O ₅	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.16
MnO	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.07	0.06	0.04	0.05	0.11
Cr ₂ O ₃	0.007	0.007	0.007	0.007	0.008	0.007	0.007	0.009	0.007	0.016
LOI	17.7	15.4	15.2	14.9	16.6	22.2	16.5	17.7	17.37	6.00
Sum	99.91	99.91	99.90	99.91	99.91	99.91	99.92	99.92	99.91	104.59
TOT/C	4.44	3.67	3.75	3.76	4.01	5.49	3.89	4.32	4.44	3.67
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	8.76	9.06	8.08	8.73	8.67	7.56	8.36	8.59	8.07	3.32
Sc	4	5	7	6	5	7	6	5	5.47	16.00
Ba	245	280	238	236	237	125	200	199	215.63	650.00
Co	2.3	2.0	3.2	3.5	2.5	5.2	5.4	3.1	3.58	23.00
Cs	1.2	1.2	1.4	1.4	1.5	1.0	1.2	1.2	1.37	15.00
Ga	5.3	5.1	6.0	6.0	5.1	4.9	5.8	5.1	5.39	-
Hf	0.9	1.1	1.1	1.3	0.9	1.4	1.3	1.1	1.12	5.00
Nb	0.9	0.9	1.3	1.3	1.1	1.3	1.4	1.3	1.22	19.00
Rb	51.7	56.5	52.0	50.4	52.4	30.5	43.1	46.7	48.94	160.00
Sr	156.1	133.5	135.9	131.2	140.5	140.8	111.1	131.6	152.68	200.00
Th	2.2	2.5	2.8	2.8	2.6	2.2	2.4	2.6	2.63	14.60
U	0.6	0.8	0.6	0.6	0.6	1.4	1.1	0.8	0.99	3.10
V	32	34	44	41	36	54	45	33	36.47	150.00
W	0.7	0.8	0.8	0.8	0.6	1.0	0.9	0.8	0.84	-
Zr	26.6	31.8	33.9	43.5	31.2	54.9	42.8	35.9	39.77	210.00
Mo	1.4	1.6	1.3	1.2	1.3	0.5	1.0	1.6	1.32	-
Cu	2.8	2.4	4.2	4.0	3.4	7.1	5.4	4.1	4.87	50.00
Pb	2.2	2.0	2.4	3.9	2.7	2.1	4.0	2.1	3.14	20.00
Zn	7	7	12	12	10	19	15	11	12.16	85.00
Ni	3.6	3.2	5.0	4.7	3.5	10.1	7.7	5.1	6.03	55.00
As	1.6	2.1	2.4	2.5	2.6	1.6	4.1	1.9	2.31	-
Sb	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4	0.2	0.25	-
Y	5.8	8.3	8.7	7.2	8.2	10.5	10.3	9.1	8.17	27.00
La	5.4	7.4	7.6	6.1	6.6	5.0	6.1	5.4	6.74	38.00
Ce	9.0	12.0	12.3	11.5	10.8	7.8	12.4	9.3	12.08	80.00
Pr	1.07	1.58	1.55	1.29	1.40	1.13	1.40	1.16	1.40	8.83
Nd	3.8	5.7	6.0	4.9	5.5	4.3	5.7	3.9	5.21	32.00
Sm	0.80	1.13	1.25	0.99	1.06	0.97	1.16	0.95	1.04	5.60
Eu	0.28	0.36	0.38	0.31	0.36	0.34	0.37	0.33	0.35	1.10
Gd	0.81	1.18	1.36	0.99	1.15	1.21	1.34	1.17	1.12	4.70
Tb	0.14	0.20	0.23	0.18	0.19	0.23	0.23	0.21	0.19	0.77
Dy	0.84	1.09	1.19	1.06	1.20	1.45	1.38	1.26	1.14	4.40
Ho	0.17	0.25	0.27	0.22	0.26	0.34	0.32	0.27	0.25	1.00
Er	0.55	0.72	0.78	0.73	0.76	1.04	1.00	0.89	0.79	2.90
Tm	0.09	0.12	0.13	0.11	0.12	0.17	0.15	0.14	0.13	0.405
Yb	0.56	0.69	0.78	0.75	0.79	1.01	1.02	0.92	0.78	2.80
Lu	0.09	0.12	0.13	0.12	0.13	0.18	0.16	0.15	0.13	0.40
ΣREE	23.60	32.54	33.95	29.25	30.32	25.17	32.73	26.05	31.37	182.91
(La/Yb) _{cn}	6.68	7.43	6.75	5.63	5.78	3.43	4.14	4.06	6.20	9.40
(La/Sm) _{cn}	4.23	4.10	3.81	3.86	3.90	3.23	3.30	3.56	4.06	4.25
(Gd/Lu) _{cn}	1.11	1.22	1.29	1.02	1.09	0.83	1.04	0.96	1.10	1.45
(Ce/Ce*) _{cn}	0.90	0.84	0.86	0.98	0.85	0.79	1.02	0.89	0.94	1.05
(Eu/Eu*) _{cn}	1.06	0.95	0.89	0.95	0.99	0.95	0.90	0.95	0.99	0.65

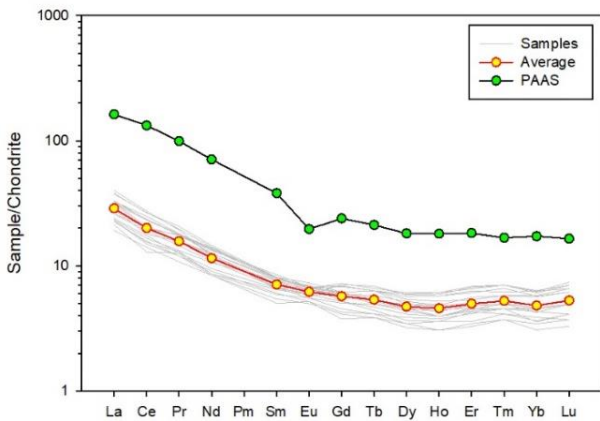


Figure 8. Comparison of REE contents with PAAS.

The Ce anomaly is useful in determining the redox conditions of the environment [36]. Ce is found in terrestrial sedimentary rocks and igneous rocks in trivalent state like other REEs [37]. However, at the oxygen-rich upper level of seawater, Ce+3 oxidizes to Ce+4, which is highly insoluble in water, causing it to separate from the other REEs. In anoxic or suboxic environments, on the contrary, it is reduced from insoluble Ce+4 to Ce+3 [38].

Ce anomaly took values between 0.95 and 1.05 in the lower part (A-61 to A-71) of the sequence (Figure 9). In this part, the amounts of variations between the samples are small. However, the Ce anomaly takes values between 0.80 and 1.00 in the upper part of the sequence (A-72 to A-79). In this part, the amounts of variations between samples are greater when compared with the lower part. The instability that has occurred between the lower and upper parts of the sequence indicates that there has been variation in the oxygen level of the water during deposition.

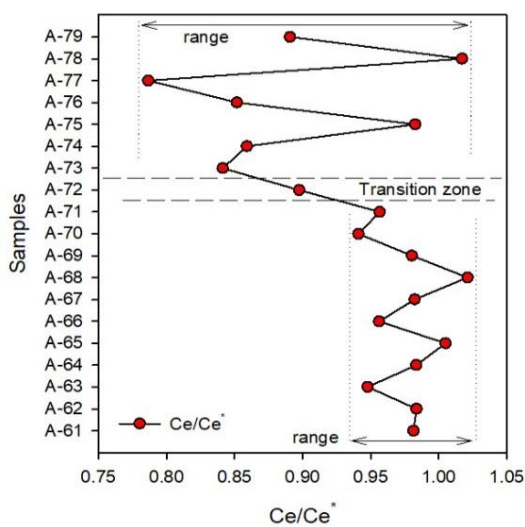


Figure 9. Ce anomaly variations along the sequence.

3.4 Correlation coefficients

Correlation coefficients are useful in determining the belongings of the elements. The matrix of the significant

positive and negative correlation coefficients is arranged in Table 2. Strong positive correlations of Na₂O and K₂O with Al₂O₃ and SiO₂, respectively, indicate that they are associated with feldspars. The strong positive correlation between Al₂O₃ and SiO₂ indicates that the grain size contrast is insignificant, that is, the grains are well sorted. There is a very strong positive correlation between Total Carbon (TOTC) and CaO. Accordingly, the carbon concentration is mostly related to calcite (cement) in the diagenetic phase. MgO and MnO, which have strong positive correlations with CaO, are also associated with cement. The strong positive correlation between CaO and Loss on Ignition (LOI) indicates that LOI is mostly of calcite origin. Strong negative correlation between CaO and SiO₂ indicates that CaO and SiO₂ are inversely proportional. The variations in SiO₂ concentrations in the samples are controlled by diagenetic calcite. Strong positive correlation of Sc with Fe₂O₃, MgO, and TiO₂ may indicate its association with ferromagnesian or heavy minerals. The strong positive correlation of Ba with SiO₂, Al₂O₃, and K₂O may indicate its association with K-feldspars. The strong positive correlation of Co with Fe₂O₃ and TiO₂ may associate it with heavy minerals. The strong positive correlation between U and CaO shows the relation of U with cement. The strong positive correlation of Zr with Fe₂O₃ and TiO₂ indicates its association with heavy minerals. The strong positive correlation between Fe₂O₃ and TiO₂ may show their association with biotite. The strong positive correlations of Cu and Ni with MgO, CaO, and LOI may indicate that they are associated with diagenesis and behave according to the redox conditions of the environment [39]. The strong positive correlation of Rb with SiO₂ and Al₂O₃ indicates that it is associated with clastics. The strong positive correlation of Sr with LOI indicates that it is related to the diagenetic phase. The strong positive correlation of Hf with Zr indicates its relationship with zircon mineral.

3.5 Provenance

The SiO₂ concentrations of the samples are controlled by the random concentrations of diagenetic CaO. This affects the major oxide composition of the clastic phase, making provenance and tectonic setting diagrams using major oxide concentrations useless for the sandstones. Therefore, it is more appropriate to use trace element diagrams for the sandstones in this study.

The Zr/Sc vs. Th/Sc diagram is frequently used to evaluate the effect of sedimentary recycling [40]. The Th/Sc ratio is a general indicator of provenance and Zr/Sc is an index used to determine zircon enrichment. The first cycle sediments show a positive correlation with the compositional variation line in the diagram. But an increase in the Zr/Sc ratio is observed in the recycled sediments. Sandstone samples don't cross to the right of the compositional variations line in the diagram and cluster closely to the andesite composition. The lack of shift in the direction of the Zr/Sc axis indicates that the sandstones didn't experience sedimentary recycling (Figure 10). In this sense, sandstones are first cycle sediments transported directly from the source.

Table 2. Matrix of correlation coefficients.

N=19	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	LOI	TOTC	Sc	Ba	Co	Hf	Sr	Th	U	Zr	Cu	Ni	
SiO ₂																						
Al ₂ O ₃	.90																					
Fe ₂ O ₃	-.05	.22																				
MgO	-.78	-.52	.51																			
CaO	-1.00	-.93	-.03	.73																		
Na ₂ O	.77	.91	.37	-.34	-.79																	
K ₂ O	.93	.85	-.23	-.82	-.92	.64																
TiO ₂	-.02	.25	.88	.54	-.06	.42	-.24															
MnO	-.77	-.59	.45	.83	.73	-.50	-.75	.30														
LOI	-.99	-.93	.00	.74	.99	-.82	-.92	-.04	.75													
TOTC	-.99	-.93	-.04	.74	.99	-.81	-.92	-.05	.72	1.00												
Sc	-.18	.08	.73	.61	.11	.10	-.29	.76	.42	.15	.13											
Ba	.92	.76	-.33	-.91	-.89	.58	.97	-.34	-.81	-.90	-.90	-.39										
Co	-.04	.14	.74	.43	-.01	.31	-.26	.69	.32	.00	.01	.69	-.29									
Hf	.29	.46	.74	.12	-.34	.63	.09	.73	-.07	-.34	-.37	.49	.04	.46								
Sr	-.61	-.49	.13	.60	.62	-.28	-.58	.23	.57	.56	.56	.02	-.56	.01	-.02							
Th	.62	.81	.27	-.18	-.65	.76	.60	.37	-.32	-.66	-.66	.37	.49	.33	.48	-.23						
U	-.83	-.65	.34	.83	.80	-.54	-.79	.20	.96	.81	.79	.33	-.84	.21	-.13	.56	-.36					
Zr	.28	.49	.78	.13	-.33	.69	.08	.76	-.03	-.34	-.37	.43	.03	.46	.95	.04	.45	-.09				
Cu	-.75	-.53	.47	.83	.71	-.35	-.77	.43	.90	.71	.68	.35	-.84	.26	.09	.68	-.29	.89	.17			
Ni	-.76	-.52	.54	.89	.70	-.40	-.77	.46	.95	.73	.71	.48	-.87	.38	.03	.55	-.27	.93	.08	.93		

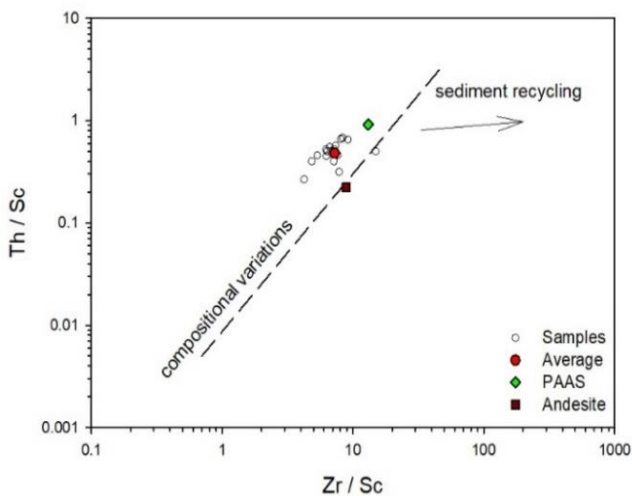


Figure 10. Th/Sc-Zr/Sc diagram [40].

In addition to traditional petrographic methods [41-43], geochemical methods are also used as the major method for provenance extraction [44-49]. Y, La, Th, Zr, Sc, Co, Ni, Cr, Hf, V, and REE are useful determinants for provenance analysis as they are transferred from source to sediment mostly unchanged during sedimentary processes [50-53]. REE patterns and Eu anomaly sizes of post-Archean clastic deposits are of particular importance as an indicator of provenance [40]. The main reason for this is that basic rocks have lower LREE/HREE ratios and no negative Eu anomalies, while more silicic rocks have higher LREE/HREE ratios and significant negative Eu anomalies [54]. Eu depletion in post-Archean sedimentary rocks is not an event resulting from surface processes, but evidence of an earlier magmatic event resulting from the retention of Eu in

Ca-rich plagioclase in the lower crust. Therefore, igneous rocks derived from the mantle rarely show negative Eu anomalies [55]. For the sandstones, slightly inclined REE patterns and low negative Eu anomalies indicate the existence of plagioclase-rich magmatic rocks in the source region that is not significantly affected by intra-crustal fractionation.

Th and Sc are effective elements for provenance diagnosis [31]. In the Th/Sc vs. Eu/Eu* binary diagram, a line representing average igneous rock compositions can be obtained [56]. This line is very useful for estimating provenance. In the diagram, sandstone samples cluster close to the average andesite composition (Figure 11).

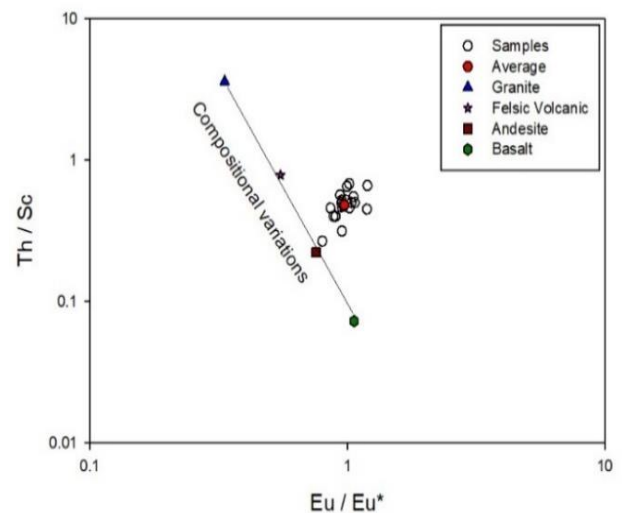


Figure 11. Eu/Eu*-Th/Sc binary diagram [56]. Compositional variations were taken from [57].

Comparison of some trace element ratios sensitive to provenance with average igneous rock compositions is very useful for revealing the composition of source [58-62]. In this sense, the average ratios of sandstone samples such as La/Sc, La/Co, Th/Sc, Th/Co, Th/Cr, Zr/Sc, Zr/Co, Ba/Sc, and Ba/Co and average igneous rock compositions of Condie [57] were compared (Table 3). This comparison reveals that the sandstones are close to the average andesite composition.

The magmatic and metamorphic complex of the Kırşehir Massif around the study area is the most likely source of sandstones [63-67]. Görür et al. [12], stated that the western end of the Tuzgölü basin faced the closing Inner Taurus Ocean so that the material transportation to the basin was from the Kırşehir Block at the east.

Table 3. Critical element ratios for provenance.

Rat/Roc.	*Granite	*Felsic Volcanic	*Andesite	*Basalt	This study
La/Sc	8.00	2.15	<u>1.11</u>	0.33	1.23
La/Co	13.33	4.67	<u>0.91</u>	0.31	1.88
Th/Sc	3.60	0.78	<u>0.22</u>	0.07	0.48
Th/Co	6.00	1.70	<u>0.18</u>	0.07	0.74
Th/Cr	2.25	2.04	<u>0.08</u>	0.02	0.05
Zr/Sc	50.00	16.54	<u>8.89</u>	3.97	7.27
Zr/Co	83.33	35.83	<u>7.27</u>	3.74	11.11
Ba/Sc	160.00	65.38	<u>36.11</u>	12.42	39.39
Ba/Co	266.67	141.67	<u>29.55</u>	11.71	60.25

* Data from [57]

3.6 Tectonic setting

The mineralogical and geochemical compositions of the sediments deposited in a basin are closely related to the composition and tectonic setting of the source rocks [68, 69]. Accordingly, many discrimination diagrams have been derived which determine the tectonic setting by using the major and trace element contents of the deposited sediments [70-73].

Trace element diagrams of Bhatia, and Crook [72] were found reliable by LaMaskin et al. [74] (Figure 12). In these triangular diagrams (La-Th-Sc, Th-Co-Zr/10, and Th-Sc-Zr/10) tectonic settings are divided into four. These are A-Oceanic Island Arc (forearc, back-arc), B-Continental Island Arc (apical inter-arc, forearc, back-arc), C-Active Continental Margin (retro-arc foreland, marginal basins, oblique-slip basins), and D-Passive Continental Margin (major peri-cratonic depocentres on trailing edges). In all three diagrams, the sample average falls on the "Continental Island Arc" region.

While constructing the tectonic model of the Tuzgölü basin, Görür et al. [12], suggested the existence of the Inner Tauride Ocean between the Menderes Taurus Block and the Kırşehir Block (Figure 13). According to this tectonic model, the Tuzgölü basin developed as a forearc basin with the subduction of the Inner Taurus Ocean under the Kırşehir Block. The Continental Island Arc tectonic setting obtained from the diagrams represents a subduction event at the continental margin. Therefore, the tectonic setting of the samples supports the presence of the Inner Taurus Ocean and the fore-arc basin model proposed by Görür et al. [12].

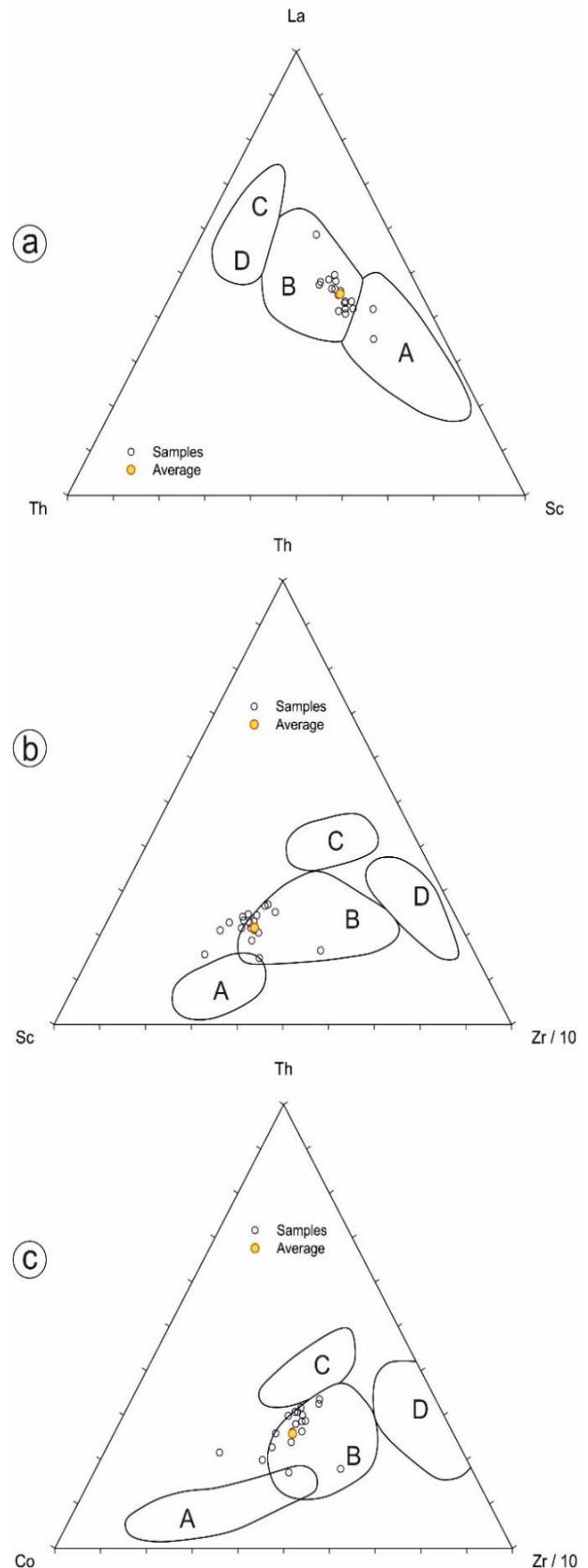


Figure 12. Ternary plots of (a) La-Th-Sc, (b) Th-Sc-Zr/10 and (c) Th-Co-Zr/10 [72]. A-Oceanic Island Arc, B-Continental Island Arc, C-Active Continental Margin, and D-Passive Margin.

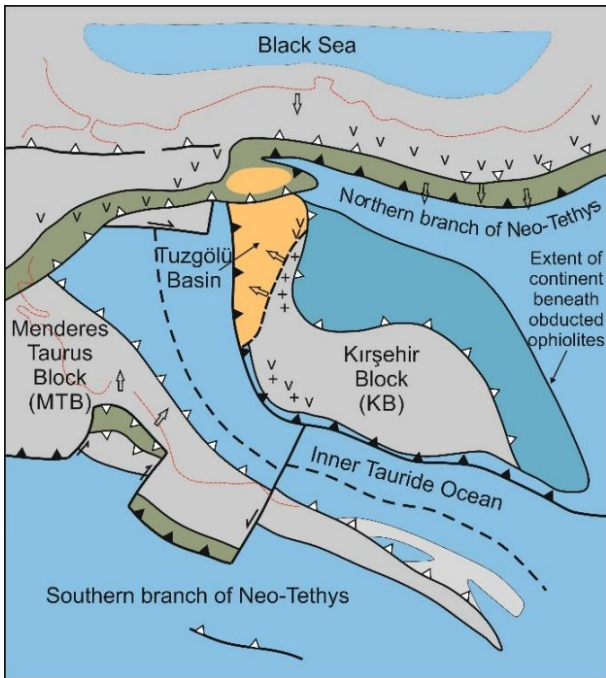


Figure 13. Paleocene paleogeography around Tuzgölü Basin after Görür et al. [12]. Note the existence of the Inner Tauride Ocean.

4 Conclusions

Sandstones are classified as feldspathic litharenite. Quartz, plagioclase, and calcite minerals were detected in the XRD analysis. According to the Zr/Sc-Th/Sc diagram, no sedimentary recycling is observed. This shows that these sandstones are first cycle sediments transported directly from the source. The fact that the sandstones are the first cycle, increases the reliability of the diagrams used. REE contents were considerably depleted when compared to PAAS. The variation in the negative Ce anomaly effect along the sequence indicates that oxygen level in the water varied during deposition. Critical element ratios for provenance such as La/Sc, La/Co, Th/Sc, Th/Co, Th/Cr, Zr/Sc, Zr/Co, Ba/Sc, and Ba/Co, Th/Sc-Eu/Eu* diagram and average REE pattern suggest provenance in “intermediate magmatic” composition for the sandstones. La-Th-Sc, Th-Co-Zr/10 and Th-Sc-Zr/10 diagrams give the “Continental Island Arc” tectonic setting for the samples. This setting describes an arc that developed on the continental margin of the subduction zone. Provenance analyses also support the existence of this arc by pointing to a source with an intermediate composition rather than a cratonic source. The tectonic setting proposed for the sandstones in this study supports the tectonic model that the Tuzgölü basin was a fore-arc basin adjacent to the Kırşehir Block.

Acknowledgments

This study is derived from some part of the first author's Ph.D thesis, which was financially supported by Selçuk University Research Fund (09101002, BAP). Authors would like to thank the reviewers for their constructive criticism and valuable contributions to the study.

Conflict of interest

The authors of the study declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): %12

References

- [1] A. Aydemir, Hydrocarbon potential of the Tuzgölü (Salt Lake) Basin, Central Anatolia, Turkey: A comparison of geophysical investigation results with the geochemical data. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 61 (1), 33-47, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2007.10.004>
- [2] A. Aydemir, Tectonic investigation of Central Anatolia, Turkey, using geophysical data. *Journal of Applied Geophysics*, 68, 321-334, 2009.
- [3] A. Aydemir and A. Ateş, Interpretation of Suluklu-Cihanbeyli-Goloren magnetic anomaly, Central Anatolia, Turkey: An integration of geophysical data. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 159 (3-4), 167-182, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pepi.2006.06.007>
- [4] C. Gürbüz and J. R. Evans, A seismic refraction study of the western Tuz Gölü basin, central Turkey. *Geophysical Journal International*, 106 (1), 239-251, 1991. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1991.tb04614.x>.
- [5] H. Ü. Ercan, M. Ç. Karakaya, A. Bozdağ, N. Karakaya and A. Delikan, Origin and evolution of halite based on stable isotopes ($\delta^{37}\text{Cl}$, $\delta^{81}\text{Br}$, $\delta^{11}\text{B}$ and $\delta^{7}\text{Li}$) and trace elements in Tuz Gölü Basin, Turkey. *Applied Geochemistry*, 105, 17-30, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.04.008>.
- [6] K. Dirik and M. C. Göncüoğlu, Neotectonic characteristics of Central Anatolia. *International Geology Review*, 38 (9), 807-817, 1996. <https://doi.org/10.1080/00206819709465363>.
- [7] E. Özsayın and K. Dirik, Quaternary activity of the Cihanbeyli and Yeniceoba fault zones: İnönü-Eskişehir fault system, Central Anatolia. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 16 (4), 471-492, 2007.
- [8] M. Y. Hüseyinca, Mineralogical and geochemical characteristics of the sediments in Lake Tuz and the close vicinity (in Turkish). Ph.D. Thesis, Selçuk University, Konya, 2015.
- [9] A. Uygun and E. Şen, Tuz Gölü Havzası ve doğal kaynakları I: Tuz Gölü suyunun jeokimyası. *Bulletin of the Geological Society of Turkey*, 21, 113-120, 1978.
- [10] K. Dirik and O. Erol, Tuzgölü ve civarının tektonomorfolojik evrimi Orta Anadolu, Türkiye. *Türkiye Petrol Jeologları Derneği Özel Sayı*, 5, 27-46, 2000.
- [11] M. Clark and A. Robertson, The role of the Early Tertiary Ulukisla Basin, southern Turkey, in suturing of the Mesozoic Tethys Ocean. *Journal of the Geological Society*, 159 (6), 673-690, 2002.
- [12] N. Görür, F. Y. Oktay, İ. Seymen and A. M. C. Şengör, Palaeotectonic evolution of the Tuzgölü basin complex, Central Turkey: sedimentary record of a Neo-Tethyan closure. In J. E. Dixon, A. H. F. Robertson (Eds.), *The*

- geological evolution of the eastern mediterranean, pp. 467-482, Geological Society Special Publications, London, 1984.
- [13] A. Koçyiğit, An example of an accretionary forearc basin from northern Central Anatolia and its implications for the history of subduction of Neo-Tethys in Turkey. Geological Society of America Bulletin, 103 (1), 22-36, 1991. [https://doi.org/10.1130/00167606\(1991\)103<0022:aeoaf>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/00167606(1991)103<0022:aeoaf>2.3.co;2).
- [14] Y. Arıkan, Tuz Gölü havzasının jeolojisi ve petrol imkanları. M.T.A. Dergisi, 85, 17-38, 1975.
- [15] I. Çemen, M. C. Göncüoğlu and K. Dirik, Structural evolution of the Tuzgölü basin in Central Anatolia, Turkey. The Journal of geology, 107 (6), 693-706, 1999.
- [16] M. Clark and A. Robertson, Uppermost Cretaceous–Lower Tertiary Ulukışla Basin, south-central Turkey: sedimentary evolution of part of a unified basin complex within an evolving Neotethyan suture zone. Sedimentary Geology, 173 (1), 15-51, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2003.12.010>.
- [17] A. I. Okay and O. Tüysüz, Tethyan sutures of northern Turkey. Geological Society, London, Special Publications, 156 (1), 475-515, 1999.
- [18] A. M. C. Şengör, Tectonics of the tethysides: orogenic collage development in a collisional setting. annual review of earth and planetary sciences, 15 (1), 213-244, 1987.
- [19] G. M. Stampfli, The intra-alpine terrain: A paleotethyan remnant in the alpine variscides. Eclogae Geologicae Helveticae, 89 (1), 13-42, 1996.
- [20] A. M. C. Şengör and Y. Yılmaz, Tethyan evolution of Turkey: a plate tectonic approach. Tectonophysics, 75 (3), 181-241, 1981.
- [21] A. Okay, Geology of Turkey: A Synopsis. Anschitt, 21, 19-42, 2008.
- [22] N. Görür, O. Tüysüz and A. M. C. Şengör, Tectonic evolution of the Central Anatolian basins. International Geology Review, 40 (9), 831-850, 1998. <https://doi.org/10.1080/00206819809465241>.
- [23] M. Şenel, Türkiye Jeoloji Haritası/Geological Map of Turkey, scale 1:500,000. Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, Ankara, 2002.
- [24] İ. Seymen, Kaman dolayında Kırşehir Masifinin jeolojisi. Doçentlik Tezi, İ.T.Ü. Maden Fakültesi, İstanbul, 1982.
- [25] A. Özcan, M. C. Göncüoğlu, N. Turan, Ş. Uysal, K. Şentürk and A. Işık, Late Paleozoic evolution of the Kütahya-Bolkardağ Belt. METU Journal of Pure and Applied Sciences, 21 (1-3), 211-220, 1988.
- [26] A. Uygun, Tuzgölü havzasının jeolojisi, evaporit oluşumları ve hidrokarbon olanakları. İç Anadolu'nun Jeolojisi Sempozyumu, T.J.K. 35. Bilimsel ve Teknik Kurultayı Bildiriler Kitabı, pp. 66-71, Ankara, 1981.
- [27] E. Örsayın, T. A. Çiner, F. B. Rojay, R. K. Dirik, D. Melnick, D. Fernández-Blanco, G. Bertotti, T. F. Schildgen, Y. Garcin, M. R. Strecker and M. Sudo, Plio-Quaternary extensional tectonics of the Central Anatolian Plateau: A case study from the Tuz Gölü Basin, Turkey. Turkish Journal of Earth Sciences, 22 (5), 691-714, 2013.
- [28] A. Kürçer and Y. E. Gökten, Paleoseismological three dimensional virtual photography method; A case study: Bağlarkayası-2010 trench, Tuz Gölü Fault Zone, Central Anatolia, Turkey. In E. Sharkov (Ed.), Tectonics - Recent Advances, IntechOpen, 2012.
- [29] A. Aydemir and A. Ateş, Structural interpretation of the Tuzgolu and Haymana Basins, Central Anatolia, Turkey, using seismic, gravity and aeromagnetic data. Earth Planets and Space, 58 (8), 951-961, 2006.
- [30] E. Anders and N. Grevesse, Abundances of the elements: Meteoritic and solar. Geochimica et Cosmochimica Acta, 53 (1), 197-214, 1989. [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037\(89\)90286-X](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037(89)90286-X).
- [31] S. R. Taylor and S. M. McLennan, The continental crust: Its composition and evolution. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1985.
- [32] R. L. Folk, Petrology of sedimentary rocks. Hemphill Publishing Company, Austin, Texas, 1974.
- [33] H. Vital and K. Stattegger, Major and trace elements of stream sediments from the lowermost Amazon River. Chemical geology, 168 (1-2), 151-168, 2000. [http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2541\(00\)00191-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2541(00)00191-1).
- [34] F. J. Pettijohn, P. E. Potter and R. Siever, Sand and sandstone. Springer US, New York, 1972.
- [35] R. L. Cullers, T. Barrett, R. Carlson and B. Robinson, Rare-earth element and mineralogic changes in Holocene soil and stream sediment: A case study in the Wet Mountains, Colorado, U.S.A. Chemical geology, 63 (3-4), 275-297, 1987. [http://dx.doi.org/10.1016/0009-2541\(87\)90167-7](http://dx.doi.org/10.1016/0009-2541(87)90167-7).
- [36] H. Elderfield and M. J. Greaves, The rare earth elements in seawater. Nature, 296, 214, 1982. <https://doi.org/10.1038/296214a0>
- [37] D. Z. Piper, Rare earth elements in the sedimentary cycle: A summary. Chemical geology, 14 (4), 285-304, 1974. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(74\)90066-7](https://doi.org/10.1016/0009-2541(74)90066-7).
- [38] C. R. German and H. Elderfield, Rare earth elements in Saanich Inlet, British Columbia, a seasonally anoxic basin. Geochimica et Cosmochimica Acta, 53 (10), 2561-2571, 1989. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(89\)90128-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(89)90128-2).
- [39] W. G. Powell, P. A. Johnston and C. J. Collom, Geochemical evidence for oxygenated bottom waters during deposition of fossiliferous strata of the Burgess Shale Formation. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 201 (3), 249-268, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(03\)00612-6](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(03)00612-6).
- [40] S. M. McLennan, S. Hemming, D. K. McDaniel and G. N. Hanson, Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics. In M. J. Johnsson, A. Basu (Eds.), Geological Society of America Special Papers, Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments, pp. 21-40, 1993.
- [41] W. R. Dickinson and C. A. Suczek, Plate tectonics and sandstone compositions. AAPG Bulletin, 63 (12), 2164-2182, 1979.

- [42] S. Critelli, P. E. Rumelhart and R. V. Ingersoll, Petrofacies and Provenance of the Puente Formation (Middle to Upper Miocene), Los-Angeles Basin, Southern California - Implications for Rapid Uplift and Accumulation Rates. *Journal of Sedimentary Research Section a-Sedimentary Petrology and Processes*, 65 (4), 656-667, 1995.
- [43] H. Dokuz, Çankırı-Çorum Havzası Oligosen kumtaşlarının petrografisi ve provenansı, *Yozgat. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7 (3), 1089-1094, 2018. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.502251>
- [44] K. Hayashi, H. Fujisawa, H. D. Holland and H. Ohmoto, Geochemistry of similar to 1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61 (19), 4115-4137, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(97\)00214-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(97)00214-7).
- [45] L. Zhou, Z. Wang, W. Gao, K. Zhang, H. Li and L. Zhang, Provenance and tectonic setting of the Lower Cambrian Niutitang formation shales in the Yangtze platform, South China: Implications for depositional setting of shales. *Geochemistry*, 79 (2), 384-398, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2019.05.001>.
- [46] R. L. Cullers, Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA. *Chemical geology*, 191 (4), 305-327, 2002. [http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00133-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00133-X).
- [47] B. P. Roser and R. J. Korsch, Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. *Chemical geology*, 67 (1-2), 119-139, 1988. [http://dx.doi.org/10.1016/0009-2541\(88\)90010-1](http://dx.doi.org/10.1016/0009-2541(88)90010-1).
- [48] P. A. Floyd and B. E. Leveridge, Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: Framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones. *Journal of the Geological Society*, 144, 531-542, 1987. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.144.4.0531>
- [49] D. Bal Akkoca and Z. Baytaşoğlu, The mineralogy and geochemistry of Neogene sediments from eastern Turkey, southeast of Arapgir (Malatya). *Turkish Journal of Earth Sciences*, 22 (4), 645-663, 2013. <https://doi.org/10.3906/yer-1202-13>
- [50] D. J. Wronkiewicz and K. C. Condie, Geochemistry and provenance of sediments from the Pongola Supergroup, South Africa: Evidence for a 3.0-Ga-old continental craton. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53 (7), 1537-1549, 1989. [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037\(89\)90236-6](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037(89)90236-6).
- [51] J. S. Armstrong-Altrin, Y. I. Lee, S. P. Verma and S. Ramasamy, Geochemistry of Sandstones from the Upper Miocene Kudankulam Formation, Southern India: Implications for Provenance, Weathering, and Tectonic Setting. *Journal of Sedimentary Research*, 74 (2), 285-297, 2004. <https://doi.org/10.1306/082803740285>.
- [52] L. Sun, H. Gui and S. Chen, Geochemistry of sandstones from the Neoproterozoic Shijia Formation, northern Anhui Province, China: Implications for provenance, weathering and tectonic setting. *Chemie der Erde - Geochemistry*, 72 (3), 253-260, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2011.11.006>.
- [53] Z. W. Wang, J. Wang, X. G. Fu, W. Z. Zhan, J. S. Armstrong-Altrin, F. Yu, X. L. Feng, C. Y. Song and S. Q. Zeng, Geochemistry of the Upper Triassic black mudstones in the Qiangtang Basin, Tibet: Implications for paleoenvironment, provenance, and tectonic setting. *Journal of Asian Earth Sciences*, 160, 118-135, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.04.022>.
- [54] R. L. Cullers and J. L. Graf, Rare earth elements in igneous rocks of the continental crust: predominantly basic and ultrabasic rocks. In *Rare earth element geochemistry*, pp. 237-274, Elsevier Amsterdam, 1984.
- [55] S. R. Taylor and S. M. McLennan, Chemical composition and element distribution in the Earth's crust. In R. A. Meyers (Ed.), *Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)*, pp. 697-719, Academic Press, New York, 2003.
- [56] R. L. Cullers and V. N. Podkovyrov, The source and origin of terrigenous sedimentary rocks in the Mesoproterozoic Ui group, southeastern Russia. *Precambrian Research*, 117 (3-4), 157-183, 2002. [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-9268\(02\)00079-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-9268(02)00079-7).
- [57] K. C. Condie, Chemical composition and evolution of the upper continental crust : Contrasting results from surface samples and shales. *Chemical geology*, 104, 1-37, 1993.
- [58] R. L. Cullers, The geochemistry of shales, siltstones and sandstones of Pennsylvanian-Permian age, Colorado, USA: implications for provenance and metamorphic studies. *Lithos*, 51 (3), 181-203, 2000. [http://dx.doi.org/10.1016/S0024-4937\(99\)00063-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0024-4937(99)00063-8).
- [59] S. M. McLennan, S. R. Taylor, M. T. McCulloch and J. B. Maynard, Geochemical and Nd-Sr isotopic composition of deep-sea turbidites: Crustal evolution and plate tectonic associations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54 (7), 2015-2050, 1990. [http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90269-Q](http://dx.doi.org/10.1016/0016-7037(90)90269-Q).
- [60] R. L. Cullers, The controls on the major- and trace-element evolution of shales, siltstones and sandstones of Ordovician to tertiary age in the Wet Mountains region, Colorado, U.S.A. *Chemical geology*, 123 (1-4), 107-131, 1995. [http://dx.doi.org/10.1016/0009-2541\(95\)00050-V](http://dx.doi.org/10.1016/0009-2541(95)00050-V).
- [61] R. L. Cullers, A. Basu and L. J. Suttner, Geochemical signature of provenance in sand-size material in soils and stream sediments near the Tobacco Root batholith, Montana, U.S.A. *Chemical geology*, 70 (4), 335-348, 1988. [http://dx.doi.org/10.1016/0009-2541\(88\)90123-4](http://dx.doi.org/10.1016/0009-2541(88)90123-4).
- [62] M. M. Karadağ, Geochemistry, provenance and tectonic setting of the Late Cambrian-Early Ordovician Seydişehir Formation in the Çaltepe and Fele areas, SE Turkey. *Geochemistry*, 74 (2), 205-224, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2013.07.002>.

- [63] D. Boztuğ and Y. Harlavan, K–Ar ages of granitoids unravel the stages of Neo-Tethyan convergence in the eastern Pontides and central Anatolia, Turkey. *International Journal of Earth Sciences*, 97 (3), 585-599, 2008. <https://doi.org/10.1007/s00531-007-0176-0>.
- [64] D. Boztuğ, R. C. Jonckheere, M. Heizler, L. Ratschbacher, Y. Harlavan and M. Tichomirova, Timing of post-obduction granitoids from intrusion through cooling to exhumation in central Anatolia, Turkey. *Tectonophysics*, 473 (1), 223-233, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.05.035>.
- [65] S. Köksal, R. L. Romer, M. C. Göncüoğlu and F. Toksoy-Köksal, Timing of post-collisional H-type to A-type granitic magmatism: U–Pb titanite ages from the Alpine central Anatolian granitoids (Turkey). *International Journal of Earth Sciences*, 93 (6), 974-989, 2004. <https://doi.org/10.1007/s00531-004-0432-5>.
- [66] İ. Kuşcu, G. Gençalioğlu Kuşcu, L. D. Meinert and P. A. Floyd, Tectonic setting and petrogenesis of the Çelebi granitoid, (Kırıkkale-Turkey) and comparison with world skarn granitoids. *Journal of Geochemical Exploration*, 76 (3), 175-194, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(02\)00254-6](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(02)00254-6).
- [67] K. Koçak, Mineralogy, geochemistry, and Sr–Nd isotopes of the Cretaceous leucogranite from Karamadazı (Kayseri), central Turkey: implications for their sources and geological setting. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 45 (8), 949-968, 2008. <https://doi.org/10.1139/E08-040>
- [68] J. S. Armstrong-Altrin, Evaluation of two multidimensional discrimination diagrams from beach and deep-sea sediments from the Gulf of Mexico and their application to Precambrian clastic sedimentary rocks. *International Geology Review*, 57 (11-12), 1446-1461, 2015. <https://doi.org/10.1080/00206814.2014.936055>
- [69] Q. Du, Z. Han, X. Shen, C. Han, Z. Song, L. Gao, M. Han and W. Zhong, Geochronology and geochemistry of Permo-Triassic sandstones in eastern Jilin Province (NE China): Implications for final closure of the Paleo-Asian Ocean. *Geoscience Frontiers*, 10 (2), 683-704, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.03.014>.
- [70] M. R. Bhatia, Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. *The Journal of geology*, 91 (6), 611-627, 1983.
- [71] B. P. Roser and R. J. Korsch, Determination of tectonic setting of sandstone - mudstone suits using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio. *Journal of Geology*, 94, 635-650, 1986. citeulike-article-id:5332564.
- [72] M. R. Bhatia and K. A. W. Crook, Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92 (2), 181-193, 1986. <https://doi.org/10.1007/BF00375292>
- [73] S. P. Verma and J. S. Armstrong-Altrin, Geochemical discrimination of siliciclastic sediments from active and passive margin settings. *Sedimentary Geology*, 332, 1-12, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2015.11.011>
- [74] T. A. LaMaskin, R. J. Dorsey and J. D. Vervoort, Tectonic controls on mudrock geochemistry, Mesozoic rocks of eastern Oregon and western Idaho, USA: Implications for cordilleran tectonics. *Journal of Sedimentary Research*, 78 (12), 765-783, 2008.





Economic analyses of onshore commercial large scale wind power plant installed in Turkey

Türkiye’de kurulu olan kara tipi ticari ve büyük ölçekli rüzgar güç santralinin ekonomik analizleri

Akin Ilhan^{1,*}, Mehmet Bilgili², Melih Sari³, Besir Sahin⁴

¹ Ankara Yıldırım Beyazıt University, Department of Energy Systems Engineering, Ankara, Turkey

² Çukurova University, Department of Mechanical Engineering, Ceyhan, Adana, Turkey

³ Mustafa Kemal University, Building and Construction Office, Hatay, Turkey

⁴ Çukurova University, Department of Mechanical Engineering, Sarıçam, Adana, Turkey

Abstract

In this study, the average wind conditions and economic analyses of four identical wind turbines of three-bladed and 3 MW of rated power located in an installed wind farm abbreviated as WTPP and found in Eastern Mediterranean region of Turkey in Hatay province, were conducted. In this way, the probability density distributions based on wind directions regarding these identical wind turbines of the wind farm as well as cumulative probability density distributions regarding wind speeds for all identical wind turbines were performed. Besides, the economic analysis in terms of the present value calculation for a 3 MW rated power wind turbine was executed, in which the results demonstrated that the application of the wind turbine project of this type would be profitable.

Keywords: Net present value, Payback period, Specific cost

1 Introduction

Energy is among the most significant and inevitable demands of the today’s World. On the other hand, it certainly has a necessary item within the scope of the technological developments of countries, economic improvement, and above all, energy is very important in the human life [1-2]. Recently, the worldwide energy demand that is developing in parallel with the technological developments, population rise, and fossil fuel rapid depletion; has demonstrated a substantial increase [3-5]. The enhancement in energy consumption depends mainly on agents such as the population growth, the sustained improvement of the living standards, and the continuous industrialization of the developing countries. Towards 2030, a 21% rise in the worldwide energy demand will be definitely encountered. Besides currently, questions on climate change issues, alternative energy generation sources, emissions of greenhouse gases and reduction of the other worse effects to environment based on fossil fuels, have structured the most important problems of World’s governments. To deal with these immediate problems directly, these topics are currently handled on the agenda of the World states.

Özet

Bu çalışmada; Türkiye'nin Doğu Akdeniz bölgesinde, Hatay şehrinde bulunan ve WTPP olarak kısaltılmış kurulu bir rüzgar çiftliğinde yer alan, üç kanatlı ve 3 MW’lık nominal güce sahip dört özdeş rüzgar türbininin ortalama rüzgar koşulları ve ekonomik analizleri yapılmıştır. Bu çerçevede; rüzgar çiftliğinin, bu özdeş rüzgar türbinlerine ilişkin, rüzgar yönlerine göre olasılık yoğunluğu dağılımları ve aynı rüzgar türbinleri için, rüzgar hızlarına göre kümülatif olasılık yoğunluğu dağılımları, gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, 3 MW’lık anma gücüne sahip bir rüzgâr türbinine, bugünkü değer hesaplaması yöntemiyle, ekonomik analiz uygulanmıştır ve elde edilen sonuçlar, bu tip rüzgâr türbini projesinin uygulanmasının karlı olacağını göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Geri ödeme süresi, Net bugünkü değer, Spesifik maliyet

Because of the reason that conventional energy generation is not very economical today, besides due to the harmful environmental effects of energy utilization, and due to the continuously increasing energy demand of humanity, some troubles are associated in obtaining of the sustainable energy demand. As a result, an unsustainable situation occurs in current demand to energy when considered in terms of a global perspective including economic, environmental, human and climatic needs. Besides, to keep the CO₂ emissions, which eventuate based on the energy generation, inside the specified limits, significance is required to be given principally to the renewable energy sources [6].

Wind energy is one of the most important types of renewable energy sources. In this regards, the comparison of the global wind installed capacity concerning the wind installed capacity of Turkey is presented in Figure 1, considering the years between 2000 and 2020. In this context, the global wind installed capacity has increased from 18,039 MW to 743,000 MW. However, the total wind power installations increased from 18.90 MW to 8,288 MW for the same period in Turkey.

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: akin.ilhan1983@gmail.com (A. Ilhan)

Geliş / Received: 22.01.2021 Kabul / Accepted: 04.08.2021 Yayınlanma / Published: 14.01.2022

doi: 10.28948/ngumuh.866312

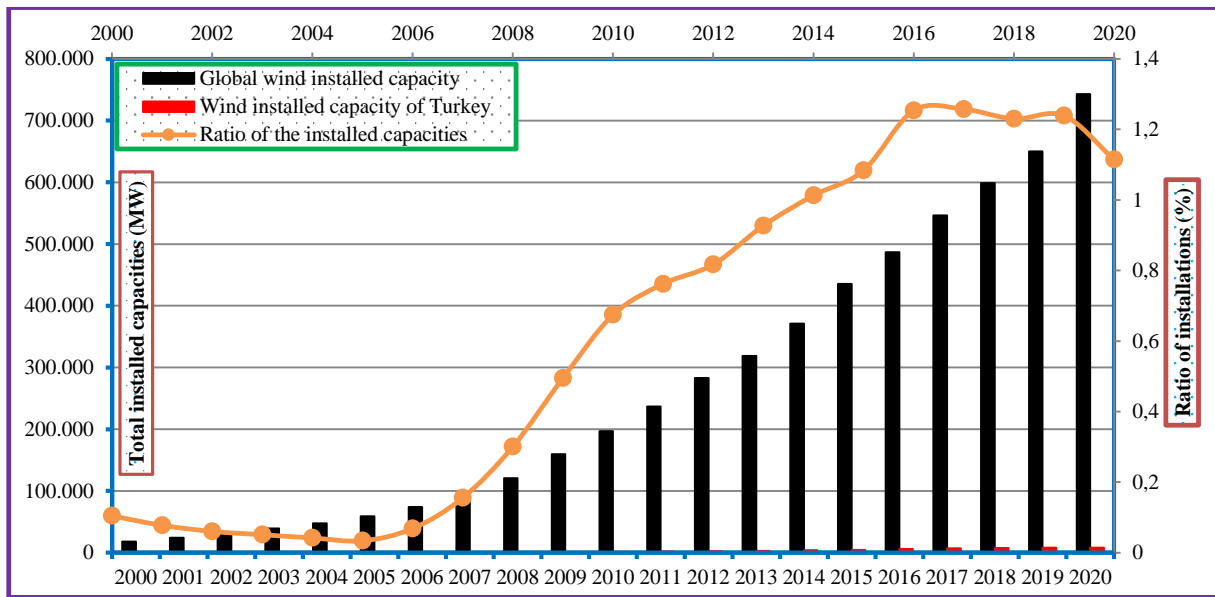


Figure 1. Total wind installed capacities of the World and Turkey

The ratio, determined according to the total wind power installations of Turkey divided by the global total wind power installations was 0.10% in 2000, while this ratio in 2020 was calculated to be 1.12%. Therefore, this study reveals that Turkey, compared to other countries in the World, performs good progress in terms of wind farm installations.

Turkey's growth of the energy demand indicated that the cumulative electricity generation of the country has risen from 94,861.7 GWh to 305,168 GWh, considering the years between 1996 and 2020. In this regards, based on wind energy installations of the country by the end of 2020, 197 wind power plants were put into operation which corresponded a total installed wind power of 8.288 GW. So, 8.91% of the cumulative 93.0227 GW installed power of Turkey was obtained from wind energy in terms of electrical energy production. Additionally, Turkey has the target to increase the wind energy share in electricity production to reach a total of 20 GW at the end of 2023. However, only 41.44% of this goal has been accomplished. For this reason, around 11.7 GW of additional wind power installations have been projected in the next three years. Considering this stipulated period, effective and conscious usage of wind energy potential, wind turbine technology improvement, an elaborate investigation of wind turbine aerodynamics and turbine performance characteristics, and advanced researches on economic analyses of wind turbines are very essential. In this study, initially, the average wind conditions for horizontal axis wind turbines located in an installed wind farm of WTPP were determined based on probability densities of wind blowing directions as well as based on probability densities of wind blowing speeds. This is followed by the economic analysis performed considering an identical wind turbine of the same farm.

2 Materials and methods

2.1 The economic analysis concept

2.1.1 The cost of the wind energy conversion system

Wind energy conversion system cost can be analyzed based on different elements of a total set of data including equipment costs (i.e., wind turbine cost, alternator cost, and tower cost), civil worker cost during the construction of the turbine or during the operating period, planning costs, project costs, grid connection costs, and other possible capital costs. Around 84% of the total installed cost of such a wind energy generation project involves these cited prominent costs. Accordingly, the total cost of a wind energy conversion system can be separated into sub-cost elements by defining the following major categories:

- The wind turbine costs: These costs comprehend generator, transformer, power converter, gearbox, rotary blades, tower and other possible costs.
- Civil work and worker costs: These costs include construction costs occurred during site preparation and the costs regarding tower foundations and payments of the personnel responsible for these works.
- Planning and project costs: These costs cover an important percentage of the total costs of a wind energy conversion system.
- Grid connection costs: These costs contain sub-costs of elements such as transformer costs, sub-station costs, and local distribution or transmission network connection costs.
- Other possible capital costs: The costs subsume road constructions inside the farm, buildings such as control rooms, and other auxiliary control systems, etc.

The following figure presents the total cost analysis and related sub-cost shares considering a typical onshore wind turbine power plant. Besides, the proportions indicated in Figure 2 can alter with respect to the country, the project type, and also based on the utilized wind turbines. From this perspective, the used wind turbine costs, construction and civil works, grid connection costs, and other capital costs can vary in a range of percentage 64% to 84%, 4% to 16%, 9% to 14%, and 4% to 10%, respectively in which the estimated percentage values are obtained with reference to the total installed costs [7].

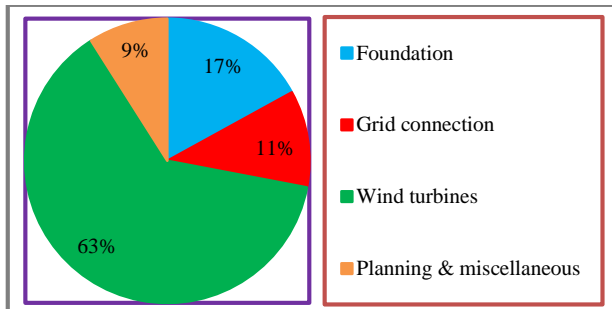


Figure 2. Analysis of the total cost during the installation process of a typical 3 MW onshore wind turbine power plant [7]

2.1.2 Simple payback period

Measuring economic value of an investment is pursued by the basic and the most comprehensively used method referred to as the simple payback period. Based on the obtained benefits from an applied energy project; the payback period (*PBP*) of the project is simply the number of years that the investment should face for it to become equal to the repayment of the total cost of the project. On the whole, the projects having the lowest payback period are chosen by the investors.

The equation below is used for the calculation of the *PBP* of an energy project,

$$PBP \text{ (Years)} = \frac{\text{Total initial investment}}{\text{Annual benefits with the current energy costs}} \quad (1)$$

The interest rate and the economic life are not considered in the simple payback period, which is the primary inconvenience of this method. Even so, this method can be utilized in cases having many risks and uncertainties for the future.

2.1.3 The net present value of the wind power farm project

The Net Present Value (*NPV*) method is used to conduct the wind turbine economic analysis of a 3 MW rated power, P_r wind turbine located in the WTPP.

A wind project *NPV* is the value of all incomes which are discounted to the beginning of the investment. The *NPV* is taken into account by subtracting the initial investment in the calculations. In Equation (2), the real rate of interest is defined by “ r ” demonstrating the sum of the discount rate, i and the inflation rate, s for this estimation. The discount rate (i) is selected based on the cost and the available capital source, taking a balance between equity and the debt

financing into account as well as performing an estimate of the financial risks entailed in the wind project. So, the real rate of the interest (r) can be characterized as presented in Equation (2) shown below [8]:

$$\text{Real rate of interest } (r) = \text{Discount rate } (i) + \text{Inflation rate } (s) \quad (2)$$

Equation (2) was utilized in order to evaluate future income and expenditures. Besides, first yearly income (P_1) is taken and divided by $(1+r)^1$ term for the calculation of the net present value, in which the worth of the yearly incomes is denoted by P_j , which has the set of yearly income values between (1, 2, 3, 4, ..., n). In the presence of the second yearly income; the net present value is computed in addition to the procedure applied to the first yearly income plus the second yearly income divided by $(1+r)^2$. In this manner, in the cases of third income, fourth income, and the n^{th} income, the divisions by $(1+r)^3$, $(1+r)^4$, and $(1+r)^n$ terms are executed, respectively. Consequently, the net present value is computed by summing up whole cited terms together to the initial investment [8]:

$$\text{Net present value} = \frac{P_1}{(1+r)^1} + \frac{P_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{P_n}{(1+r)^n} \quad (3)$$

With the Net Present Value (*NPV*), those parameters including initial investment capital, maintenance cost, annual running cost, annual savings, and the salvage value of the wind turbine can be considered. Accordingly, the profitability of a wind turbine project can be evaluated in terms of obtaining a clear idea for the investor. Equation (4) presented below can be utilized for the expression of the cited method using another equation,

$$\text{Net Present Value} = \sum_{m=m+1}^t \frac{F_n}{(1+i)^n} - \sum_{n=0}^m \frac{M_n}{(1+i)^n} \quad (4)$$

In a wind project, the terms designated by M_n , F_n , m , $t-m$, and i are the cost, revenue on the n^{th} year, the year that the investment completed, wind project economic life, and the discount rate, respectively.

Considering these explanations, if the *NPV* value is greater than 0, the forecasted wind project can be taken into account as an economically acceptable project. Additionally, when it is required to pick a single project among a large number of wind projects, the one having the highest net present value is chosen [9].

2.1.4 Real rate of return

The real rate of return is defined according to the value of the real rate of interest, r making the wind project net present value at precisely zero. On a given investment, the real rate of return is a measure of the real interest rate which is earned. Besides, if the $NPV > 0$: The considered project will have a real rate of return being higher than the real rate of interest, r . On the other hand, if the $NPV < 0$: The project will have a lower rate of return.

An iterative procedure should be followed in order to find the roots of the expression for the present value which is required for the estimation of the real rate of return. One

approach is to make a forecast that is substituted into the equation. In the case of the guess to be so high, the net present value will be negative. On the other hand, in the case of the guess to be so low, the net present value will be positive [8].

2.1.5 Wind turbine present value cost analysis

An initiative has been performed regarding the estimation of the present value cost analysis for the electricity cost considering twenty years of wind turbine project duration. For the calculation of the present value, initially, we must know the wind turbine project investment. Consequently, total wind turbine cost is obtained as demonstrated below:

$$\text{Total turbine cost} = \text{Turbine cost} + \text{Installation cost} \quad (5)$$

The “installation cost” shown in Equation (5) can be accepted as 0.30 of the wind turbine price [8].

Based on the central aspect of the analysis, the payments which include the initial payment as well, are used for the calculation of the net present value and the real rate of return over 20 years of the project lifetime. And in this analysis, the tax payments, credits, and depreciation credits are not taken into account.

Wind turbine project total expenditure is characterized as shown below,

$$\begin{aligned} \text{Total expenditure} \\ = \text{Total turbine cost} \\ + \text{Operation and maintenance cost over the expected lifetime} \end{aligned} \quad (6)$$

In this analysis, the operation and maintenance cost can be taken as a fixed amount for each year or with respect to a percentage of the wind turbine cost. This situation may also cover a service contract signed with the turbine manufacturer company. In the current study, the operation and maintenance costs were taken to be 1.5% of the wind turbine price [8].

For the definition of the net income for each year, the electricity price and the gross yearly income obtained from electricity sales are needed to be known. In this context, the gross yearly income gained from the electricity sale can be acquired as demonstrated below in Equation (7):

$$\begin{aligned} \text{Gross yearly income from electricity sale} \\ = \text{Energy produced in a year} \times \text{Price of electricity} \end{aligned} \quad (7)$$

In Equation (7), energy production is given by, $N.C_p.8760.P_r$, where N is the number of turbines, C_p is the capacity factor, 8760 is the number of hours in one year, and P_r is the rated power of the turbine. Hence, the net income per year is formulated as shown in Equation (8) below,

$$\begin{aligned} \text{Net income stream per year} \\ = \text{Gross yearly income from electricity sale} \\ - \text{Operation and maintenance cost per year} \end{aligned} \quad (8)$$

Eventually, Equations (9) and (10) can respectively be obtained for the yearly net real rate of return and the present value of electricity per kWh.

$$\begin{aligned} \text{Yearly net real rate of return} \\ = \frac{\text{Net present value of income stream}}{\text{Total turbine cost}} \cdot \frac{1}{\text{Project lifetime}} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{Present value of electricity per kWh} \\ = \frac{\text{Net present value of income stream}}{\text{Yearly energy production} \cdot \text{Project lifetime}} \end{aligned} \quad (10)$$

3 Results and discussions

3.1 Results for wind condition and economic analysis of WTPP

In this part of the study, the horizontal axis wind turbine one-year data obtained from an existing wind farm in Hatay province of Turkey was used. The technical characteristics of the VESTAS V90-3.0 MW identical wind turbines of the farm are demonstrated in Table 1 [10]. These wind turbines have main specific characteristics of rated power (P_r), rotor diameter (D_{rotor}), rotor swept area (A_d), hub-height, number of blades (n), nominal turbine rotor rotational speed corresponding to 3 MW, 90 m, 6,362 m², 80 m, 3, 16.10 rpm, respectively. The measured data regarding four identical wind turbines of WTPP was used in the considered year. These identical wind turbines have been symbolized as WT-1, WT-2, WT-3, and WT-4 [10].

Table 1. The technical specifications of four identical wind turbines located in WTPP [10]

Features of wind turbines	Specification
Rotor diameter (D_{rotor})	90 m
Rotor swept area (A_d)	6,362 m ²
Number of blades (n) on the route	3
Nominal turbine rotor rotational speed	16.10 rpm
Hub height (tower height)	80 m
Blade length	44 m
The wind speed at which the turbine begins to turn (cut-in wind speed)	4 m/s
Turbine shutdown or cut-out wind speed	25 m/s
Turbine rated power (P_r)	3 MW
Frequency	50 Hz
The output voltage from the generator	1000 V

3.1.1 Results of average wind condition analysis of WTPP

The discussions on wind direction and wind speed analyses were performed considering the literature studies based on the statistical methods [11-15]. Considering wind direction data as well as wind speed data obtained from studied WTPP, initially, the demonstration of Figures 3 and 4 was executed as presented below. In these regards, considering four identical wind turbines of the WTPP, while Figure 3 shows the probability densities (PD) with respect to the wind directions; Figure 4 indicates the cumulative probability densities (CPD) as a function of wind speeds.

By the examination of four equivalent wind turbine annual data; probability density (PD) presented in Figure 3 demonstrates the dominant wind direction in which the wind is most likely to blow most of the time. North and south directions have been respectively indicated by 0 degree and 180 degree based on the general wind direction assumption. As clearly seen in this figure, peak values of the probability densities (PD) of the wind directions occur firstly at 330 degree and secondly at 120 degree.

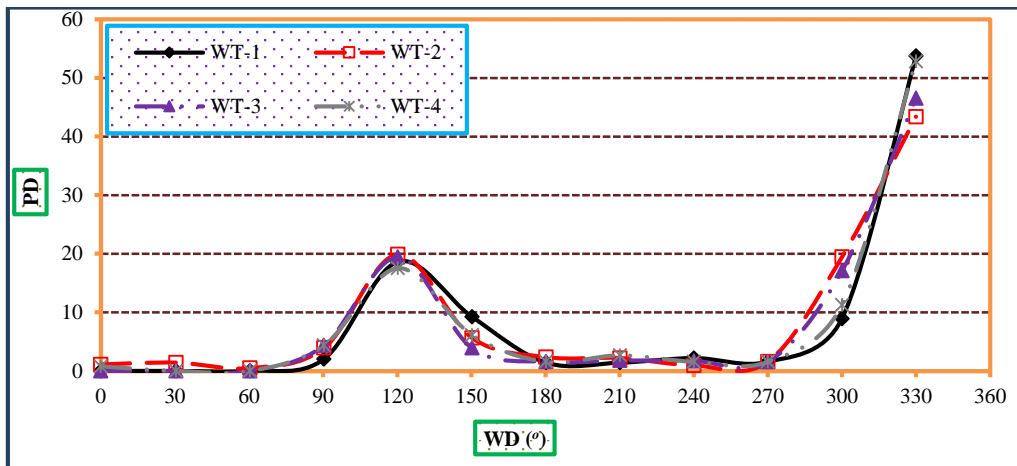


Figure 3. PD distributions based on wind directions for four identical wind turbines of WTPP

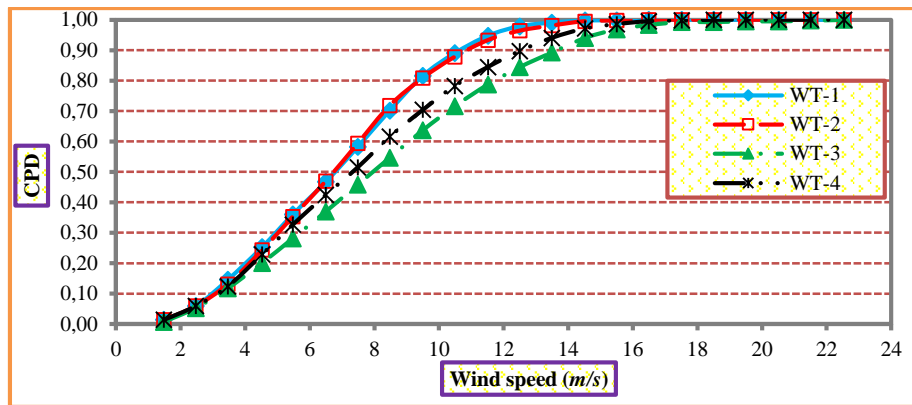


Figure 4. CPD distributions based on wind speed for four identical wind turbines of WTPP

These results declare that wind in this WTPP generally blows from the directions of east-southeast and north-northwest.

Besides, the cumulative probability density (CPD) presented in Figure 4 supplies information regarding wind speed density distributions to which the wind turbines are exposed. Analysis of this figure reveals that hourly wind speeds in this wind farm are higher than 4 m/s in about 80% of the occasions. Similarly, considering wind turbines WT-1, WT-2, WT-3, and WT-4, respectively; hourly wind speeds in this farm are less than 10 m/s at the percentage values of approximately 89%, 88%, 72%, and 78% of the occasions.

On the other hand, it is possible to divide the free stream (U_∞) magnitude into three regions of value ranges, i.e.,

- Region 1: $3 \text{ m/s} \leq U_\infty \leq 5 \text{ m/s}$, region of low wind speeds,
- Region 2: $5 \text{ m/s} \leq U_\infty \leq 10 \text{ m/s}$, region of moderate wind speeds,
- Region 3: $10 \text{ m/s} \leq U_\infty \leq 25 \text{ m/s}$, region of high wind speeds.

3.1.2 Results of economic analysis of a 3 MW wind turbine of the WTPP

In the analysis of the electricity cost obtained from the wind turbine, it is suitable to perform the following assumptions: For whole wind turbines, the useful lifetime

was accepted to be twenty (20) years, the operation and maintenance costs were adopted regarding the turbine cost as 1.5% of the cost; and the real rate of interest (r) was also determined to be convenient based on the wind turbine cost and marketing conditions to be taken as 7%.

The gross average yearly income obtained from the electricity sale and the net average income per year were determined as 947,014 \$/year and 887,014 \$/year, respectively, under the wind turbine cost, the installation cost, the operation and maintenance costs, and the price of electricity of 4,000,000 \$, 1,200,000 \$, 60,000 \$/year, and 0.099 \$/kWh, respectively. The gross yearly income and the net income per year have been indicated as mean values per year. The reason is that 30 hours, 20 hours, 15 hours, 5 hours, and 7 hours maintenance have been performed to the turbine by stopping it, by 2nd, 3rd, 8th, 13th, and 19th years, respectively.

The stopping times of the turbine and in which years and for how long it was stopped were presented to us with the attached list. Since, the wind turbine didn't produce the same amount of electricity every year, some variations in the gross yearly income and net income per year occurred. Besides, the capacity factor of wind power plant has been determined to be equal to $C_p=0.36416$.

Table 2. The present value calculation conducted considering a wind turbine of 3 MW rated power (P_r)

Year n	Expenditures \$	Gross income \$	Net income (P) \$	Present value factor $1/(1+r)^n$ $r = 0.07$	The net present value of income \$
0	-5,200,000	-	-	-	-
1	-60,000	947,430	887,430	0.93458	$\frac{P_1}{(1+r)^1}$ 829,373.83
2	-60,000	944,185.38	884,185.38	0.87344	$\frac{P_2}{(1+r)^2}$ 772,281.75
3	-60,000	945,266.92	885,266.92	0.81630	722,641.51
4	-60,000	947,430	887,430	0.7629	677,016.10
5	-60,000	947,430	887,430	0.71299	632,725.33
6	-60,000	947,430	887,430	0.66634	591,332.08
7	-60,000	947,430	887,430	0.62275	552,646.80
8	-60,000	945,807.69	885,807.69	0.58201	515,548.14
9	-60,000	947,430	887,430	0.54393	482,703.12
10	-60,000	947,430	887,430	0.50835	451,124.41
11	-60,000	947,430	887,430	0.47509	421,611.60
12	-60,000	947,430	887,430	0.44401	394,029.53
13	-60,000	946,889.23	886,889	0.41496	368,027.50
14	-60,000	947,430	887,430	0.38782	344,160.65
15	-60,000	947,430	887,430	0.36245	321,645.47
16	-60,000	947,430	887,430	0.33873	300,603.24
17	-60,000	947,430	887,430	0.31657	280,937.61
18	-60,000	947,430	887,430	0.29586	262,558.52
19	-60,000	946,672.92	886,673	0.27651	245,172.45
20	-60,000	947,430	887,430	0.25842	229,328.78
Total	-6,400,000	18,940,272	17,740,272	-	9,395,468

Considering this value of the capacity factor as well as Equation (7), the economic analysis has been performed.

The wind turbine cost of 4,000,000 \$ for the considered 3 MW wind turbine is reported to be at the same level compared with the values found in the literature of the identical.

On the other hand, for a wind turbine of 3 MW rated power (P_r) of this wind farm: The results of the present value calculation has been demonstrated in Table 2.

Utilization of Equations (8) and (9) yielded that while the yearly net real rate of return was calculated to be 9.0341 percent/year, whereas the present value of electricity per kWh was determined to be 0.004211 \$/kWh.

Explicit information has been reached considering the profitability of the wind project with the utilization of the Net Present Value method. When a 3 MW rated power (P_r) wind turbine of this wind farm is studied, the revenues and the costs were calculated as 18,940,272 \$ and 6,400,000 \$, respectively, under the initial investment capital (turbine specific cost), the annual running cost, the operation and maintenance costs, the annual savings, and the salvage value corresponding to 4,000,000 \$, 320,000 \$, 60,000 \$/year,

894,807 \$, and 625,000 \$, respectively. Utilization of Equation (3) indicated that the net present value (NPV) of the wind turbine project was calculated as 9,395,468 \$. These calculations indicated that the PBP of the project has been reported as 5.86 years. Within the light of this information and the above calculations, it will be correct to say that the application of this wind turbine project has been reported to be profitable.

4 Conclusions

In this study, average wind conditions in terms of wind blowing direction and wind speed probability distributions of four equivalent wind turbines of 3 MW rated power and located in an installed wind farm of Hatay province of Turkey, abbreviated as WTPP were initially investigated. Besides, economic analysis of a 3 MW rated power wind turbine which is located in this WTPP has been conducted:

Based on the probability density function performed with respect to the wind blowing direction, the wind in this WTPP has been reported to mostly blow firstly at 330 degree and secondly at 120 degree, corresponding to approximately 50% and 20% of probability densities, respectively. Namely, it has been conducted that wind turbines in the WTPP were

mostly subjected to wind at geographical directions of firstly north-northwest and, secondly, east-southeast directions. In this regards, it has been conducted that wind regime in this region has non-variable and steady characteristics. Besides, wind speeds in this wind farm were reported to be higher than 4 m/s in about 80% of the occasions. Similarly, hourly wind speeds in this farm were reported to be less than 10 m/s at approximately 89%, 88%, 72%, and 78% of the occasions considering *WT-1*, *WT-2*, *WT-3*, and *WT-4*, respectively. In this context, based on the free-stream wind speed value ranges, the wind blowing magnitude in the WTPP has been reported to be in Region 2.

When a 3 MW rated power wind turbine of WTPP is considered, based on the calculations of expenditures including calculations of wind turbine cost, the installation cost, economic life, salvage value and the operation and maintenance costs; as well as considering the calculations on the gross income, including the study for the price of electricity, net income; and the net present value calculations including the real rate of interest (r) calculations as well, it has been observed that the application of such wind turbine project would be profitable. These calculations revealed that the PBP of the project was estimated as 5.86 years.

Conflicts of interest

No conflict of interest was declared by the authors.

Similarity rate (iThenticate): 14%

References

- [1] Y.A. Kaplan, Overview of wind energy in the World and assessment of current wind energy policies in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 562-568, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.027>.
- [2] J. Waewsak, M. Landry and Y. Gagnon, Offshore wind power potential of the gulf of Thailand. *Renewable Energy*, 81, 609-626, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.03.069>.
- [3] G. Emmanouil, G. Galanis, C. Kalogeri, G. Zodiatis and G. Kallos, 10-year high resolution study of wind, sea waves and wave energy assessment in the Greek offshore areas. *Renewable Energy*, 90, 399-419, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.031>.
- [4] A. Korompili, Q. Wu and H. Zhao, Review of VSC HVDC connection for offshore wind power integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1405-1414, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.064>.
- [5] P. Söderholm and M. Pettersson, Offshore wind power policy and planning in Sweden. *Energy Policy*, 39, 518-525, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.05.065>.
- [6] C.W. Zheng, C.Y. Li, J. Pan, M.Y. Liu and L.L. Xia, An overview of global ocean wind energy resource evaluations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1240-1251, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.063>.
- [7] International Renewable Energy Agency, 2013. <http://www.irena.org>.
- [8] M. Ragheb, Economics of wind energy. National Geographic, March 2017.
- [9] S. Mathew, Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics. Springer, Netherland, 2006.
- [10] Vestas. <http://www.vestas.com>, Accessed 24 July 2021.
- [11] G. Huang, L. Peng, Y. Su, H. Liao and M. Li, A wireless high-frequency anemometer instrumentation system for field measurements. *Wind and Structures*, 20(6), 739-749, 2015. <http://dx.doi.org/10.12989/was.2015.20.6.739>.
- [12] S.S. Law, J.Q. Bu, X.Q. Zhu and S.L. Chan, Wind characteristics of Typhoon Dujuan as measured at a 50 m guyed mast. *Wind and Structures*, 9(5), 387-396, 2006. <http://dx.doi.org/10.12989/was.2006.9.5.387>.
- [13] Q.S. Li, L. Zhi and F. Hu, Field monitoring of boundary layer wind characteristics in urban area. *Wind and Structures*, 12(6), 553-574, 2009. <https://doi.org/10.12989/was.2009.12.6.553>.
- [14] G. Solari, M. Burlando, P. De Gaetano and M.P. Repetto, Characteristics of thunderstorms relevant to the wind loading of structures. *Wind and Structures*, 20(6), 763-791, 2015. <http://dx.doi.org/10.12989/was.2015.20.6.763>.
- [15] H. Wang, T. Tao and T. Wu, Wind power spectra for coastal area of East Jiangsu Province based on SHMS. *Wind and Structures*, 22(2), 235-252, 2016. <http://dx.doi.org/10.12989/was.2016.22.2.235>.





İplik işletmeleri iklimlendirme sektöründe kullanılan pleyt üzerindeki akışın sayısal olarak incelenmesi

Numerical investigation of flow on plate used in the air conditioning sector of yarn production facilities

Emrah Gönen^{1,*} , Ahmet Kaya² 

^{1,2} Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 46100, Kahramanmaraş, Türkiye

Özet

İplik fabrikalarında üretimin kaliteli ve kesintisiz olabilmesi için havanın şartlandırılarak üretim alanına homojen bir şekilde dağıtılması son derece önemlidir. İklimlendirilmiş havanın ortama homojen olarak yayılması ise üfleme menfezlerine konumlandırılan pleytler aracılığı ile sağlanmaktadır. Bu çalışmada, bir iplik işletmesinde halihazırda kullanılan pleyt üzerindeki akış incelenmiştir. Mevcut pleyt üzerinden olan akışı iyileştirmek için üç yeni tasarım geliştirilmiştir. Pleytler üzerindeki hava akışının homojenliği ve ortam havasına etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal analiz sonuçları karşılaştırılarak optimum pleyt tasarımı belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Tekstil, İklimlendirme, Pleyt, Hava kanalı, Akış analizi.

1 Giriş

İplik üretiminde ortaya çıkabilecek olası üretim kusurlarını ortadan kaldırmak için iplik üretim tesislerinin iklimlendirilmesi gerekmektedir. Pamuk elyafı iplik olana kadar çekme, sarma, birleştirme gibi çok sayıda işlemden geçer ve bu işlemler sırasında toz ve uçuntu açığa çıkar. İpliğe mukavemet kazandırmak için salon ortamının doğru şartlandırılmış olması ve şartlandırılan havanın ortama homojen dağıtılması gerekir. Dolayısıyla ipliğe mukavemet vermek, salon havasını temizlemek ve uçuntuları toplamak amacıyla, iplik üretim tesislerinde bir klima tesisine ihtiyaç duyulmaktadır.

Tekstil kliması uygulamalarında genellikle 10000–200000 m³/h gibi yüksek debilere ihtiyaç duyulmaktadır. Tekstil klimasında, genelde aspiratör kullanılarak zemin altındaki kanallar vasıtasıyla salon havası toplanır. Toplanan kirli hava temizlenmek üzere “döner filtre ünitesine” gönderilir. Burada filtreden geçirilerek temizlenen hava, aksel fanlar vasıtasıyla nemlendirme hücresine gönderilir ve hava içerisine su püskürtülür. Böylece, evaporatif soğutma yoluyla nemlendirilen hava, bir vantilatör vasıtasıyla nemlendirme hücresinden alınır ve işletme tavanına yerleştirilmiş üfleme kanallarına bağlı menfezler ile ortama sevk edilir. İklimlendirilmiş hava, kanallar üzerine monte edilen “pleytlü üfleme menfezleriyle” ortama üflenir

Abstract

In order to ensure quality and uninterrupted production in spinning mills, the homogeneous distribution of conditioned air delivered to the directly affects the efficiency and quality of yarn production. The homogeneous distribution of the conditioned air to the environment is provided by the plates in the grilles. In this study, three different plate structures have been designed by examining the wing structures and angles of the plates used in the blowing channels of the spinning mills. The homogeneity of the air flow on the plates and its effect on the ambient air have been examined numerically. The optimum plate design has been revealed by comparing the numerical analysis results.

Keywords: Textile, Air conditioning, Plate, Air duct, Flow analysis.

ve çevrim bu şekilde devam eder. Havanın, ortama homojen şekilde dağıtılması iplik üretiminin verim ve kalitesini doğrudan etkilemektedir. Havanın ortama homojen olarak yayılması ise pleytler aracılığı ile sağlanmaktadır.

Literatürde, iklimlendirme sistemlerinde akışın yönlendirilmesi konusunda birçok sayısal çalışma yapılmış ve bunlardan bazıları incelenerek aşağıda verilmiştir.

Yıldırım vd. [1] bir odanın havalandırmasında kullanılan slot difüzör ve jet nozulun oda içindeki yerleşim pozisyonunu ANSYS ile belirlemişlerdir. Jet nozulun atış mesafesinin yüksek olduğunu, slot difüzörde ise havanın perde şeklinde ve hızlı indiğini, difüzörün altında bulunanların bundan olumsuz etkilendiğini ve bu nedenle slot difüzörlerin tavan yüksekliği fazla olan yerlerde tercih edilmesinin daha uygun olduğunu tespit etmişlerdir.

Kaya vd. [2] merkezi klima santralleri için tasarlanan düz ve piramit şekilli anemostat tip difüzörün boş hücrede oluşturduğu akış ve basınç düşümünü ANSYS programı ile araştırmışlardır. Düz yapıya sahip anemostat tip difüzörün 80° kanat açısında hava akışının daha homojen şekilde yayıldığını tespit etmişlerdir.

Sönmez vd. [3] kesik konik tip profile sahip delikli difüzör yapısının akış dağılımı ve basınç düşümüne etkisini ANSYS programında sayısal olarak incelemişlerdir. Akışı iyileştirmek amacı ile farklı delik geometri difüzörler

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: emrah.gonen@outlook.com (E. Gönen)

Geliş / Received: 25.12.2020 Kabul / Accepted: 11.08.2021 Yayınlanma / Published: 14.01.2022

doi: 10.28948/ngumuh.846854

tasarlamış ve akışa etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Delik geometrisinin kare olduğu difüzör tipinin delik geometrisi altıgen ve daire olduğu difüzör tipine göre basınç düşümünün daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

Yiğit vd. [4] piyasada kullanılan standart tip difüzörlerden farklı olarak, akışı homojenize edebilme özelliği yüksek bir difüzör tasarlamışlardır. 0°-55° arasında değişen düşey kanat açılına sahip olan difüzör yapılarının akış dağıtıcılığını ANSYS programında sayısal olarak incelemişlerdir. Düşey kanat açısı 45°-55° arasındaki difüzör tasarımlarının havalandırılan ortamdaki havanın homojen şekilde dağıtılmasını sağlamakta olduğunu ve bu kanat açılına sahip difüzörlerin ortamda oluşan hava hızı açısından değerlendirildiğinde konfor şartlarına en uygun difüzörler olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Patel ve Dhakar [5] bir oda içerisindeki üç farklı klima konumunun ısı konfora etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Klima konumunun tavanda olması durumunda en iyi soğutmanın sağlanacağını ve klimanın soğutma süresinin kısaltıldığını tespit etmişlerdir.

Kuas ve Başkaya [6], içerisinde insan ve nesnelere bulunduğu bir ofis ortamına sevk edilen soğuk havanın, ortam hacmindeki akışını sayısal olarak incelemişlerdir. Menfez ve hacim içindeki nesne konumlarının hava hareketine ve insan konforuna etkisini araştırmışlardır. Havalandırılan hacmin boş veya değişik nesnelere ve insanla dolu olmasının oda içerisindeki hava akış yapısını önemli derecede etkilediğini tespit etmişler ve bu tür çalışmalarda insan ve nesnelere dikkate alınması gerektiğini vurgulamışlardır.

Öntaş [7], kapalı bir ofis hacmi içerisinde hava dağılımına, yarıklı tipli menfez (slot difüzör) ve kare menfezlerin etkisini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Yarıklı tipli havalandırma menfezi ve kare tipli havalandırma menfezi ile yapılan çalışmalar karşılaştırıldığında yarıklı tipli menfez yapısının tavana yakın yerlerde daha etkin bir hava akışına neden olmasına rağmen zemine yakın yerlerde hava hızlarının kare tipli menfez ile gerçekleştirilmiş olan çalışmaya göre daha düşük kaldığını, bu durumun ise konfor koşulları göz önünde bulundurulduğunda esintisizliğe ve sonuç olarak insanlarda rahatsızlığa neden olabileceğini tespit etmiştir.

Yüce ve Pulat [8], bir ofis ortamındaki hava akışını türbülans kinetik enerjisi ve sıcaklık dağılımlarını havalandırma verimliliğini tahmin edebilmek amacıyla incelemişlerdir. Analizler farklı giriş sıcaklıkları (298, 300 ve 303 K) ve farklı giriş hızları (1.5, 2.0, ve 3.0 m/s) içeren dokuz farklı şart için gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucu elde ettikleri verilerle havalandırma sistemi giriş koşullarının ısı konfor ve havalandırma verimliliği üzerindeki etkilerini tespit etmeye çalışmışlardır. Mevcut şartlarda 2 m/s hava giriş hızı ve 303 K hava giriş sıcaklığına sahip bir havalandırma sisteminde homojen sıcaklık dağılımı elde etmenin mümkün olabileceği sonucuna ulaşmışlardır.

Canpolat vd. [9] bir oda içerisinde bulunan klimanın, hava üfleme doğrultusunun (10°, 30°, 50°, 70°) oda içindeki sıcaklık ve hız dağılımına etkisini ANSYS programında sayısal olarak incelemişlerdir. Oda içerisindeki hız, sıcaklık ve türbülans yoğunluğuna bağlı olarak meydana gelen

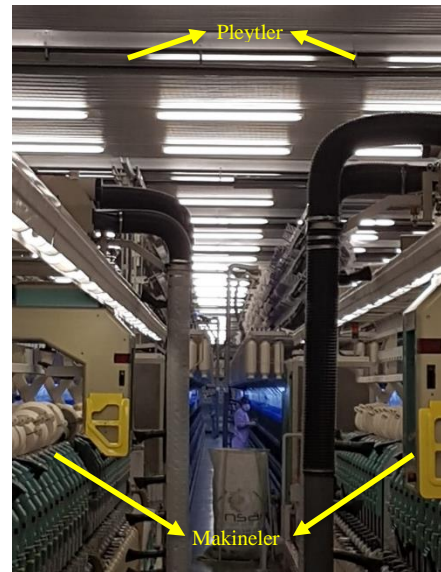
cereyanın etkisini ifade etmek amacıyla yüzde memnuniyetsizlik (PD) değeri yapılan çalışmada ısı konfor parametresi olarak tanımlanmıştır. Dört farklı üfleme doğrultusunda (10°, 30°, 50°, 70°) farklı noktalardaki XY kesitleri için elde edilmiş olan PD dağılımları dikkate alındığında üfleme doğrultusu 70° olduğunda daha az bölgede cereyan olduğu ve mevcut şartlarda en uygun üfleme açısının 70° olduğunu tespit etmişlerdir.

Awwad vd. [10] kare geometriye sahip beş kanatlı tavan difüzörünün kanat (65°, 60°, 45°) ve dudak (0°, 5°, 10°, 15°) açılarını değiştirerek bir oda içerisindeki akışı sayısal olarak incelemişlerdir. 65° kanat açılı difüzör yapısının daha geniş alana sahip ortamlarda kullanılması gerektiğini, bu kanat açısında konfor koşullarına daha hızlı ulaşıldığını fakat enerji tüketiminin ve gürültü seviyesinin arttığını, 45° kanat açısının ise tavan yüksekliğinin fazla olduğu ortamlarda kullanılmasının uygun olacağını tespit etmişlerdir. Ayrıca 15° dudak açısında akışın tavanda daha fazla tutunduğunu ve enerji tüketimini diğer dudak açılına sahip difüzörlere göre önemli derecede düşürdüğü sonucuna ulaşmışlardır.

Bu çalışmada ise, iplik üretim tesisinde kullanılan pleytler üzerinde sayısal analiz çalışmaları yapılmıştır. Mevcut pleyt üzerinde, homojen akış elde etmek amacıyla tasarım iyileştirmeleri yapılarak üç farklı pleyt tasarımı geliştirilmiştir.

2 Materyal ve metot

Bu çalışma, Kahramanmaraş ilinde bulunan TEMSAN Makina ve Tekstil San. Tic. A.Ş. bünyesinde kullanılan pleyt problem olarak ele alınmış olup mevcut durumda kullanılan pleyt geometrisinden kaynaklı problemlerin çözümüne yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Firma iplik üretim ve dokuma tesislerinde kullanılmak üzere tekstil klima sistemleri ve bu sistemlere yönelik tamamlayıcı ürünlerin üretim ve imalatını gerçekleştirerek otomasyon ve yazılımını kendi bünyesinde yapmaktadır. Sayısal çalışmada kullanılan hız değerleri, çalışan bir iplik üretim tesisinin ring klimasının üfleme menfezlerinden ölçülerek alınmıştır.

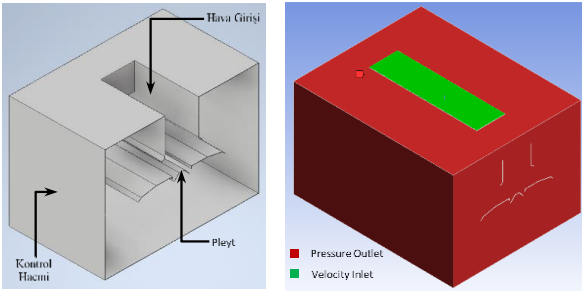


Şekil 1. İplik üretim tesisini

Ring fitil halindeki pamuğu inceltip büküm vererek mukavemetini artırarak masuraya saran makineye verilen isimdir. Bu makinenin bulunduğu kısmı iklimlendiren klima ünitesi ise ring kliması olarak isimlendirilmektedir. Şekil 1’de iplik üretim tesisinde makine ve pleytlerin konumlandırılması paylaşılmıştır. Analizlerde mevcut durumda kullanılan pleyt yapısı dahil olmak üzere 4 farklı pleyt kanat yapısı kullanılmıştır. Analizler boyunca pleyt kanatları üzerinden hava akışının homojenliği ve ortam havasına etkisi irdelenmiştir.

2.1 Pleytli üfleme menfezi

Sayısal analizlerde kullanılan pleytli üfleme menfezi geometrisi Şekil 2’de verilmiştir. Yapılan çalışmada Pleytli üfleme menfezi hava giriş kesiti ölçüleri 840 mm x 220 mm, kontrol hacmi ölçüleri 1000 mm x 1250 mm x 750 mm dir. Difüzörün çıkışından 200 mm uzaklığa pleyt monte edilmiştir.



Şekil 2. Pleytli üfleme menfezi

2.1.1 Pleyt tasarımları

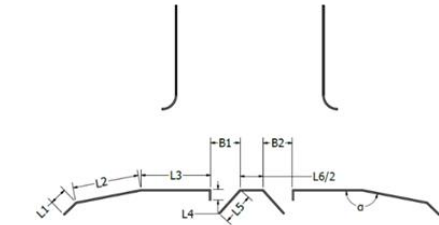
Sayısal analizlerde kullanılacak mevcut tasarım ve 3 farklı kanat geometrisine sahip pleytler AUTODESK INVENTOR programında tasarlanmıştır. Tasarımlar Şekil 4, 5, 6, 7’de verilmiş olup geometrik detaylar Tablo 1’de paylaşılmıştır.

Tablo 1. Tasarımların geometrik detayları

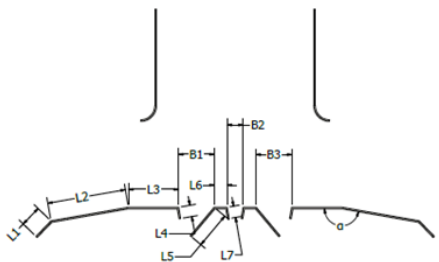
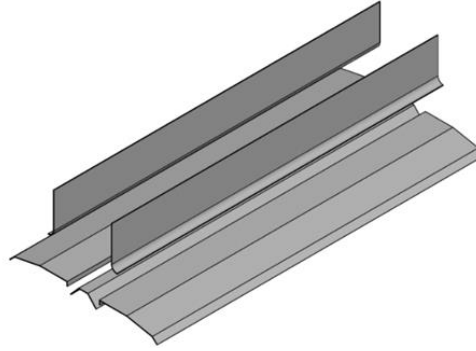
	Mevcut Tasarım	Tasarım 1	Tasarım 2	Tasarım 3
Kanat Sayısı	3 Adet	4 Adet	4 Adet	4 Adet
Kanat Açısı (α)	170°	170°	170°	135°
Kanatlar Arası Toplam Boşluk Uzunluğu (B)	88 mm	122 mm	88 mm	88 mm
Kanatların Toplam Uzunluğu (Lx2)	625 mm	625 mm	452 mm	428 mm

2.2 Değişken parametreler

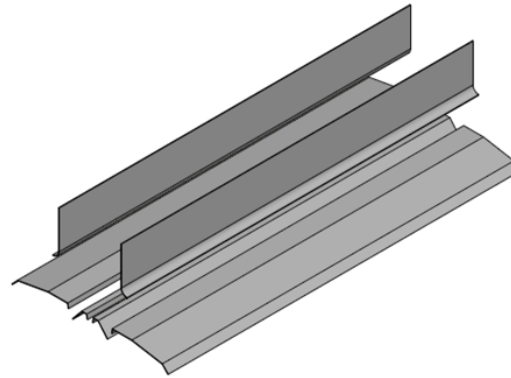
Yapılan çalışmada, mevcut pleyt üzerindeki kanat sayısı, kanat açısı α , kanatlar arası toplam boşluk uzunluğu B, kullanılan kanatların toplam uzunluğu L, yeni tasarımlarda işlenmiş ve bu tasarımlar üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir.

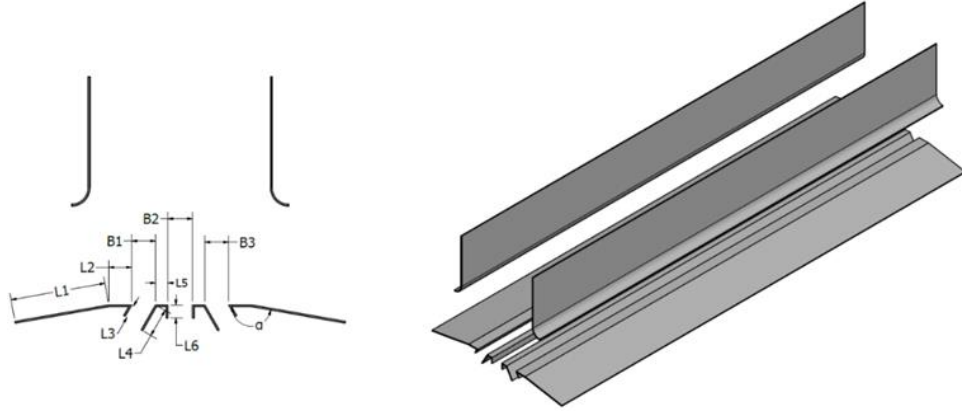


Şekil 3. Mevcut tasarım

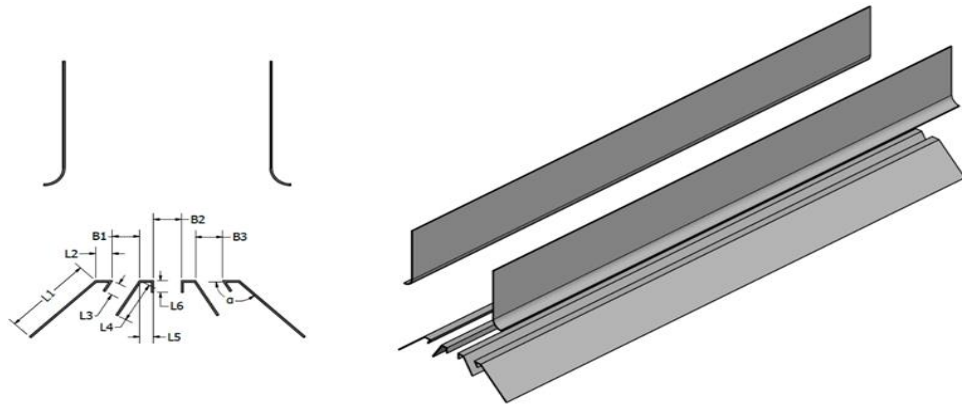


Şekil 4. Tasarım 1





Şekil 5. Tasarım 2



Şekil 6. Tasarım 3

2.3 Sayısal modelleme

Oluşturulan pleyt tasarımlarının akış analizleri ANSYS 19.2 programında gerçekleştirilmiştir. Havanın difüzöre girdiği kesit 'velocity-inlet (hız girişi)' kontrol hacmi 'atmosfer' olarak isimlendirilmiş ve 'pressure outlet (basınç çıkışı)' sınır şartı verilmiştir (Tablo 2). Difüzör ve pleyt 'wall-plate' sınır şartı tanımlanmıştır. Hız sınır şartı olarak girilen değer, çalışan bir tekstil klima sistemi menfezlerinden ölçülen değerdir. Mesh yapısı ve kesit görüntüleri Şekil 7'de verilmiştir.

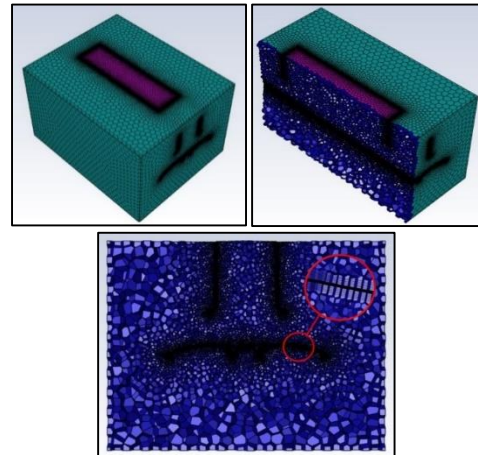
Tablo 2. Sınır şartları

Kesit	Sınır Şartı
Velocity-inlet (Hız girişi)	2.25 m/s
Pressure Outlet (Kontrol hacmi)	0 Pa

Ağ yapısının kalitesi sayısal çözümlemenin kararlılığı ve doğruluğu üzerinde önemli rol oynamaktadır. Ağ kalitesinin önemli bir göstergesi ortogonal kalitedir. Ortogonal kalite, hücrenin ağırlık merkezinden her bir yüzeyine karşılık gelen yüzey alan vektörü ile birlikte hücrenin ağırlık merkezinden bitişik hücrelerin ağırlık merkezlerine olan vektörler kullanılarak hesaplanır [11].

En kötü hücreler 0'a, en iyi hücreler ise 1'e daha yakın bir ortogonal kaliteye sahiptir. Tüm hücreler için ortogonal kalite 0.01'den fazla olmalı ve ortalama kalite ise bu

değerden daha yüksek olmalıdır [11]. Tasarımların ağ kaliteleri Tablo 3'te verilmiştir.



Şekil 7. Ağ yapısı ve kesit görüntüleri

Tablo 3. Pleyt tasarımlarının ağ kalitesi

Pleyt Tasarımı	Eleman Sayısı	Maks. Çarpıklık
Mevcut	2862351	0,80
1	2932157	0,80
2	2726852	0,79
3	3203118	0,79

Çarpıklık, herhangi bir hücrenin geometrisiyle eşdeğer hacme sahip bir başka hücrenin geometrisi arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır. Çarpık (çok eğimli) hücreler çözümün doğruluğunu azaltıp, istikrarsızlaştırabilir. Örneğin, dörtgen geometriye sahip ağlar 90 dereceye yakın köşe açılara sahipken, üçgen hücreler tercihen 60 dereceye yakın açılara veya 90 dereceden daha az açılara sahip olmalıdır. Genel kural, çoğu akışta üçgen veya dörtgen ağ yapıları için maksimum çarpıklığın 0.95'in altında tutulması gerektiği ve ortalama çarpıklığın ise 0.95'ten daha düşük olması gerektiğidir [11]. Yapılan çalışmada çarpıklık değerleri 0.79 – 0.80 aralığında olup, kabul edilebilir bir değere sahiptir.

Kullanılacak ağ yapısının kalitesi analiz sonuçlarının doğruluğunu önemli ölçüde etkilemektedir. Uygun ağ yapısını belirlemek için ağ iyileştirme çalışması yapılmıştır. Farklı eleman boyutlarının bulunduğu ağ yapılarındaki modeller ANSYS programında analiz edilerek optimum ağ yapısı belirlenmiştir. Tablo 4'te yapılan ağ iyileştirme çalışması sonuçları gösterilmiştir. Tabloda görüldüğü gibi 2.5 milyon – 3.2 milyon arası eleman sayıları kabul edilebilir hata oranına sahiptir. Bu durum dikkate alınarak yapılan çalışmalarda bu aralıktaki eleman sayıları kullanarak ağ yapıları oluşturulmuştur. Akış analiziyle ilgili birçok çalışma incelenmiş ve bu tür çalışmalarda standart k-ε türbülans modeli tercih edildiği görülmüştür [1-4, 7-9]. Bu çalışmada da k-ε türbülans modeli kullanılmıştır.

Tablo 4. Üçüncü tasarım için ağ bağımsızlık çalışması

Deneme	Eleman Sayısı	Maks. Çarpıklık	Orta Boşluktaki Ortalama Hız (m/s)	Hata Oranı (%)
1	1578607	0,7999	0,6562	
2	1828741	0,7998	0,6414	2,25
3	2197786	0,7961	0,5868	8,51
4	2547845	0,7970	0,5715	2,61
5	3203118	0,7977	0,5655	1,05

2.3.1 Standart k-ε türbülans modeli

İki denklemlilik türbülans modelleri içerisinde birçok akış çözümlemesinde kabul edilebilir sonuçlar vermesi bakımından yaygın olarak kullanılan yarı ampirik bir türbülans modelidir. Model, türbülans kinetik enerjisi (k) ve kayıp oranı (ε) için yazılan iki transport denkleminin çözümü ve türbülans viskozitesinin (μ_t) hesabını içermektedir.

Kaldırma kuvvetlerinin etkisi ihmal edildiğinde, bu transport denklemleri k ve ε için sırası ile **Denklem 1** ve **Denklem 2**'de verilen şekilde yazılabilir [3].

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2)$$

2.4 Deneysel çalışma

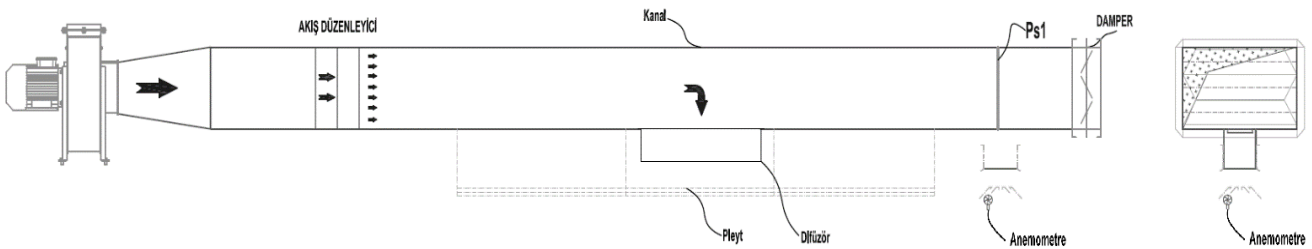
Çalışma kapsamında, kullanılan deney düzeneğinin şematik görünümü **Şekil 8**'de verilmiştir. Düzenek hava akışını sağlayan 11 kW motor gücüne sahip salyangoz fan, akışın düzleştirilmesi için kullanılan akış düzenleyiciler, hava kanalı, akışın pleyt üzerine yönlendirilmesini sağlayan difüzör ve akış yönlendirici pleytler olmak üzere 5 ana kısımdan oluşmaktadır. Sayısal çalışmada kullanılan sınır koşulları düzenekte sağlanarak, pleyt orta boşluğunda anemometre ile hava hızı taraması yapılmıştır. Hız ölçümlerinde Cem DT-619 model pervaneli tip anemometre kullanılmıştır. Hız taraması sonucunda pleyt boşluğunda çıkan ortalama hava hızı tespit edilmiş olup, sayısal modellemenin mesh bağımsızlık çalışmasında aynı düzlemden alınan ortalama hız ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen veriler **Tablo 5**'te paylaşılmıştır.

Tablo 5. Üçüncü tasarım için deneysel doğrulama

Çalışma Tipi	Orta Boşluktaki Ortalama Hız (m/s)	Hata Oranı (%)
Sayısal	0,56	5,36
Deneysel	0,53	

3 Bulgular ve tartışma

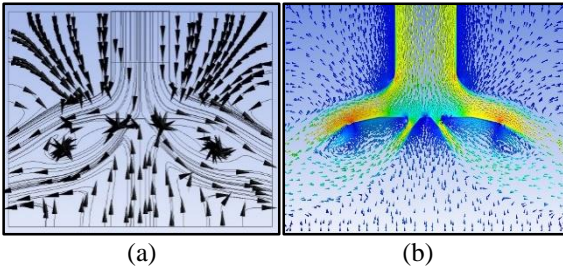
Bu çalışmada, pleytli üfleme menfezlerinde akışın ortama homojen yayılmasını sağlayan farklı pleyt tasarımlarının akışa etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Difüzörden çıkan havanın, pleyt kullanarak işletme ortamına homojen bir şekilde genişletilmesi hedeflenmiştir.



Şekil 8. Deney düzeneği

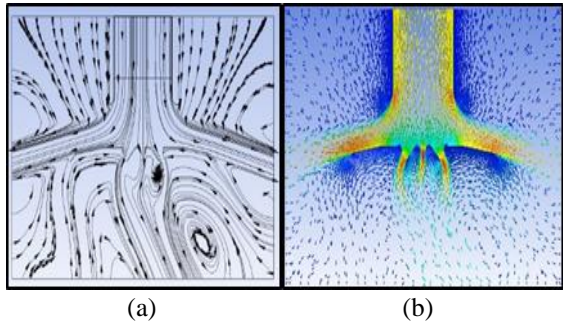
Benzer çalışmalar ışığında türbülans modeli olarak standart $k-\epsilon$ seçilmiştir. Ağ yapısını eleman boyutlarını değiştirerek gerçeğe daha yakın sonuçlar veren ağ yapısı belirlenmiş ve sayısal çalışmalarda kullanılmıştır.

Şekil 9’da, mevcut pleyt tasarımı üzerinden olan akışın dağılımı verilmiştir. Akışın geniş açıda ortama yayılması ve akışın aşağı inmemesi, ortamdaki uçuntuları artıracak ve üretim sürecini olumsuz yönde etkileyecektir. Pleyt kanatları altında vorteksler oluşmakta ve bu sebeple akışta geri dönüşler olmaktadır. Pleyt üzerindeki hava jetinden kaynaklı orta kesitten çıkan akış kenarlara doğru yönelmektedir. Bu durumdan dolayı iplik tozları yukarı doğru hareket etmekte ve işletme içerisindeki toz uçuntu oranı artmaktadır.



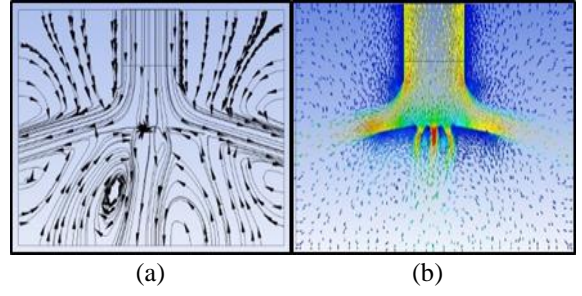
Şekil 9. Mevcut tasarım üzerinde akış dağılımı ((a) akış çizgileri (b) vektörel dağılım)

Tasarım 1 için yapılan analiz sonucunda elde edilen akış görüntüleri Şekil 10’da verilmiştir. Pleyt üzerinde oluşan hava jetinden kaynaklı olarak, pleyt altında hava geri dönüşleri meydana gelmiştir. Bu tasarımın kullanılması durumunda da ortamda bulunan iplik ve elyaf tozları hava akımından olumsuz olarak etkilenecekler ve yukarı doğru yönlenecektir. Bu durum ürün (iplik) kalitesini ve verimliliğini olumsuz yönde etkileyecektir.



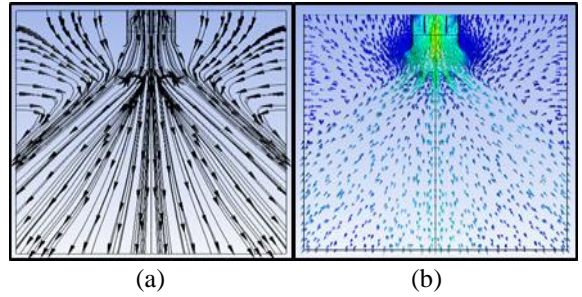
Şekil 10. Tasarım 1 üzerinde akış dağılımı ((a) akış çizgileri (b) vektörel dağılım)

Tasarım 2 için elde edilen sonuçlar da tasarım 1 için elde edilen sonuçlara benzer davranış sergilemiştir (Şekil 11). Tasarım 1’in ortasında bulunan 3 boşluklu yapının geometrik boyutları değiştirilmesine rağmen ortadaki boşluktan hava jeti oluştuğundan, kenarlardaki hava çıkışı ortaya yönelmiş ve iplik üretim hattına doğru hava jeti oluşmuştur. Oluşan hız vektörleri incelendiğinde, pleyt üzerindeki hava jetinden kaynaklı olarak ortamda ters dönüşler meydana gelmiştir. Bu sonuçla, ortamdaki uçuntuların havada kalma süresinin uzayacağı tahmin edilmektedir.



Şekil 11. Tasarım 2 üzerinde akış dağılımı ((a) akış çizgileri (b) vektörel dağılım)

Tasarım 3 için elde edilen akış analizi Şekil 12’de verilmiştir. Akış analizi incelendiğinde, havanın aşağı doğru yönleneceği görülmektedir. Pleyt üzerinde boşluklar optimize edilerek daha homojen bir dağılım elde edilmesi mümkündür. Bu tasarım ile, ortamdaki uçuntuların havada asılı kalma süresinin diğer pleyt tasarımlarına göre daha az olacağı anlaşılmaktadır. Ayrıca diğer tasarımlara göre daha dar kanat açısına sahip olduğundan dolayı difüzörden çıkan akış rahat bir şekilde yönlendirilip basınç kaybını azaltarak enerji tasarrufu sağlayacaktır.



Şekil 12. Tasarım 3 üzerinde akış dağılımı ((a) akış çizgileri (b) vektörel dağılım)

4 Sonuçlar

Bu çalışmada tekstil iplik üretim tesislerinde kullanılan klima santrallerinin üfleme menfezlerinde akışın ortama homojen yayılmasını sağlayarak işletme içerisindeki iplik tozlarının (uçuntu) emisyon slotlarına yönlendirilmesini sağlayan pleyt yapıları üzerinde çalışılmış ve pleytin akış üzerindeki etkisi sayısal olarak incelenmiştir.

Pleyt merkezlerinde boşluklu bir yapının bulunması halinde merkezdeki pleyt kanatlarına açı verilerek yayıcılık özelliği kazandırılmasının akışın homojen yayılmasını etkileyen bir parametre olduğu tespit edilmiştir.

Tasarımlarda pleyt merkezine kanat bırakılarak pleytin x eksenindeki uzunluğu artırıldığında akışın olumsuz olarak etkilendiği ve ortamdaki akışta ters dönüşler oluşacağı sonucuna varılmıştır.

Pleyt merkezlerine bırakılacak boşluklarının doğru tayin edilmesi ve bu boşluklarının difüzörden çıkan hava akış hızına bağlı olarak optimum boşluk mesafesinin belirlenmesi gerektiği düşünülmektedir.

Tekstil işletmeleri iplik üretim ve dokuma tesislerinin üretim şartları ve ortam istekleri dikkate alınarak mevcut

durum ve 3 farklı pleyt tasarımın akış yapıları karşılaştırıldığında 135° kanat açısına sahip 4 kanatlı tasarım 3'ün, menfezlerden çıkan hava akışını üretim alanına daha homojen bir şekilde yaydığı ve istenmeyen akış yapılarının meydana gelmediği görülmüştür.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %17

Kaynaklar

- [1] A. Yıldırım, C. Özalp, M. Söyler ve E. Hürdoğan. İklimlendirme sistemlerinde kullanılan farklı tip menfez ve difüzörlerin yerleşimi, jet nozulun hız dağılımlarının incelenmesi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 1(1): 22-27, 2018.
- [2] A. Kaya, M.S. Kamer, K. Sönmez ve A.V. Vakkasoğlu, Klima santrallerindeki boş hücreler için tasarlanan bir anemostat tip difüzörün akış analizi. IV. Uluslararası Katılımlı Anadolu Enerji Sempozyumu, sayfa 1266, Edirne, Türkiye, 18-20 Nisan 2018.
- [3] M. S. Kamer, K. Sönmez ve A. Kaya. Farklı kesit genişlemeli geometrilerin klima santralleri için tasarlanan bir anemostat tip difüzörlü boş hücredeki akışa etkisinin sayısal olarak incelenmesi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(4): 694-711 2018. <https://doi.org/10.15317/Scitech.2018.161>
- [4] Ş. Yiğit, C. Sungurlu ve B. Çuhadaroğlu, HVAC sistemlerinde kullanılacak yeni tip bir difüzör için performans incelemesi, 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, sayfa 19-36. İzmir, Türkiye, 17-20 Nisan 2013.
- [5] A. Patel, P. S. Dhakar, CFD Analysis of air conditioning in room using Ansys Fluent. *Journal of Emerging Technologies and innovative Research*, November 2018, Madhya Pradesh, India, 5 (11): 436 - 441 2018.
- [6] G. Kuas ve Ş. Başkaya. Havalandırılan bir ofis odasında hava hareketinin sayısal analizi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 17 (2): 35 – 52 2002.
- [7] E. Öntaş, Kapalı hacimlerde slot difüzör kullanımının hava dağılımına etkisi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul, Türkiye, 2008.
- [8] B. E. Yüce ve E. Pulat, Bir ofis odasındaki termal akışın kış şartlarında sayısal olarak incelenmesi, 13. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi. İzmir, Türkiye, 19-22 Nisan 2017.
- [9] A. S. Canbolat, Ö. Kaynaklı, B. Türkan ve N. Yamankaradeniz. Klima cihazı üfleme çıkış açısının ısı konfor üzerindeki etkisinin nümerik olarak incelenmesi, 13. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, sayfa 1203–1213, İzmir, Türkiye, 19-22 Nisan 2017.
- [10] A. Awwad, M. H. Mohamed and M.Fatouh. Optimal design of a louver face ceiling diffuser using CFD to improve occupant's thermal comfort, *Journal of Building Engineering*, 11(1): 134-157, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.job.2017.04.009>
- [11] Ansys, Inc. ANSYS Fluent User's Guide. Canonsburg, PA, 2013.





CNC Freze tezgahları için bir program arayüzünün tasarlanması Designing a program interface for CNC milling machines

Mikail Olam^{1,*}, Nihat Tosun²

^{1,2} Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Elâzığ, Türkiye

Özet

Bu çalışmada, mobilya endüstrisinde kullanılan CNC freze tezgâhları için Visual Basic programlama dili kullanılarak bir program arayüzü tasarlanmıştır. Hazırlanan program arayüzü ile CNC freze tezgâhı arasında PCI hareket kontrol kartı kullanıldı. Bu program arayüzünün ergonomik tasarımı sayesinde, kullanıcılar CNC tezgahlarında kullanılan G ve M kodlarına ihtiyaç duymadan rahatlıkla kullanabileceklerdir. Yapılan çalışmada, program arayüzü resim formatlarındaki iki boyutlu şekilleri başarılı bir şekilde vektörel çizime dönüştürerek takım yollarını oluşturmaktadır. Vektörel çizimler program arayüzünde txt, bmp, png, jpeg, tiff, emf ve gif resim formatlarında dışa ve içe aktarma işlemleri doğru bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Program arayüzünde bulunan başlık çubuğu, menü çubuğu, anlık durum göstergesi, şekil oluşturma alanı, hızlı erişim düğmeleri, koordinat listesi, cep boşaltma, işlem ayarı, çoklu işlem ve resim ayarı penceresi araçları için hazırlanan metotların işlevleri doğru bir şekilde yapıldığı görüldü.

Anahtar kelimeler: CNC, program arayüzü, Visual basic, Hareket kontrol kartı

1 Giriş

Hassas ve verimli işleme yanında kolay kullanım sağlayan bilgisayarlı sayısal kontrol (CNC) gelişmiş bir üretim teknolojisidir [1, 2]. Endüstriyel makinelerin beyni olan bilgisayar sayısal kontrol, modern bir imalat sisteminin temel unsurudur [3, 4]. CNC tezgâhları, imalat resminde ön görülen şekil ve boyutlarda bitmiş parça imal etmek için kullanılmaktadır [5]. Takım tezgâhlarının amacı, hammaddeye toleranslarla belirtilen bir kalitede şekil vermektir. Şekil verme işlemi, takım ve parçanın izafi hareketleri sonucu olarak talaş kaldırma ile gerçekleşir [6]. CNC tezgâhlarında programla belirtilen bu hareketler, tezgâhın kontrol ünitesi tarafından vurgu şeklinde elektronik sinyallere dönüştürür [7]. Bu sinyaller motoru ve buna bağlı mekanik iletim sistemi (dişli çark, civata mekanizması vb.) ile bağlı olan kızağı harekete geçirerek sağlar. Bütün bu hareketli tezgâh parçalarının kullanıcı tarafından bilgisayar destekli kontrolleri program arayüzleri kullanılarak yapılmaktadır. Bu program arayüzleri, CNC tezgahlarında bulunan motorlara ait sürücü devreleri ve tezgâh parçalarının durum bilgisini veren sensörlerden gelen verinin bilgisayar tarafından işleyip/yorumlayan paket programlardır [8]. Program arayüzleri tarafından CNC tezgahlara iletilen/alınan

Abstract

In this study, a new program interface has been designed using the visual basic programming language for CNC milling machines used in the furniture industry. PCI motion control card was used between the prepared program interface and the CNC milling machine. Thanks to the ergonomic design of this program interface, users can easily use them without the need for G and M codes used on CNC machines. As a result of the work done; It was seen that toolpaths were created by successfully converting two-dimensional shapes in picture formats into vectorial drawing. It correctly performs the function of exporting and importing vectorial drawings into the program interface in txt, bmp, png, jpeg, tiff, emf and gif image formats. It was seen that the methods prepared for the title bar, menu bar, instant status indicator, shape creation area, quick access buttons, coordinate list, pocket emptying, process setting, multi-process and picture setting window tools in the program interface function properly.

Keywords: Program interface, Visual basic, CNC, Motion control card

komutları elektriksel sinyallerine dönüşümünü elektronik kartlar (haberleşme kartı) sağlamaktadır. Haberleşme kartları program arayüzü tarafında gönderilen komutları G ve M kod formatına dönüştürüp motor sürücülerine ileten programlanmış devre kartlarıdır [9, 10]. Bu haberleşme kartları bilgisayardaki ISA, PCI (Peripheral Component Interconnect), COM, LPT, USB, ethernet gibi portlarını kullanarak iç/dış aygıtlar ile veri iletimini sağlar [11–13]. Veri yolları verileri çok kanaldan çoklu bitler (kelimeler) şeklinde ileten paralel veri yolu ya da tek kanal üzerinden bit bit ileten seri veri yolu biçimindedir [14]. PCI günümüz masaüstü bilgisayarlarında kullanılan en yüksek performansa sahip yol sistemidir [15]. PCI veri yolları, tak-çalıştır özellikli 32/64 bit paralel veri yolunu kullanmaktadır [16]. Günümüz bilgisayarlarında 2019 yılında PCI veri yolunun geliştirilen en son versiyonu olan PCIe 5.0 ile 128GB/s bant genişliğinde 32GT/s bağlantı hızıyla veri aktarımı yapmaktadır [17]. PCI slotları LAN, SCSI, USB ve diğer kartları desteklemektedir. Günümüzde PCI veri yollarını kullanan birçok hareket kontrol kartları vardır. Bu kontrol kartlarının birbirleriyle temel farkları giriş/çıkış pin sayısı, çalışma frekansları, kullandıkları veri uzunlukları (32/64 bit), kontrol ettikleri motor sayısı ve destekledikleri

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mikailolam@gmail.com (M.Olam)

Geliş / Received: 15.06.2021 Kabul / Accepted: 11.08.2021 Yayımlanma / Published: 14.01.2022
doi: 10.28948/ngumuh.952757

enterpolasyon tipleri (doğrusal, dairesel, sürekli) gibi özelliklerdir [18, 19]. Ancak bu kontrol kartlarının birçoğu açık kaynak kodlu olarak sunulmamaktadır. Açık kaynak kodlu yazılımlar kullanıcı tarafından değiştirilebilir/geliştirilebilir yazılımlardır [20, 21]. Günümüzde CNC tezgahlar için bilgisayarlarda ticari olarak sunulan birçok program arayüzü (mach3, Haidenhain, Fidia, Siemens, vb.) vardır [22, 23]. Ticari ürün olarak sunulan CNC program arayüzlerinin kullanıcı tarafından geliştirilmesi ya da değiştirilmesine izin verilmemektedir.

Bu çalışmada, bilgisayarın PCI portunu kullanan açık kaynak hareket kontrol kartı (motion control) kullanılarak mobilya endüstrisinde kullanılacak ergonomik kullanıma sahip bir CNC program arayüzü geliştirildi.

2 Deneysel metot

Bu çalışmada, visual basic programlama dili kullanılarak mobilya endüstrisinde kullanılan CNC freze tezgâhlar için bir programlama arayüzü tasarlanmıştır. Tasarlanan program arayüzü ile CNC tezgâh arasında PCI yuvasına takılan adtech marka ADT 8948A1 hareket kontrol kartı (Tablo 1) kullanılarak haberleşme sağlanmıştır. Şekil 1’de görüldüğü üzere ADT 8948A1 hareket kontrol kartı program arayüzü ile CNC freze tezgahının arasında köprü görevi görmektedir. Program arayüzü tarafından tezgâha gönderilen/alınan komutlar kontrol kartı üzerinden ilgili motorların sürücülerine iletilir ya da alınır. Program arayüzünde oluşturulan bir iş parçasının x, y ve z eksen hareket koordinatlarını CNC freze tezgâhına işlenmek üzere gönderilir. CNC freze tezgâhının üç ekseninde bulunan servo motorlar, program arayüzü tarafından gelen koordinatlarla uygun olarak hareket etmesiyle kesme/işleme işlemi gerçekleşir.

Tablo 1. ADT 8948A1 hareket kontrol kartı (ADT 8948A1 motion control card)

Veri işlem uzunluğu	32 bit
Dijital giriş sayısı	32 (5-24VDC)
Dijital çıkış sayısı	32 (5-24VDC NPN)
Encoder girişi	4 eksen 32 bit
İnterpolasyon	3 eksen (lineer) doğrusal, 2 eksen dairesel, sürekli
Çıkış çalışma frekansı	4 MHz
Hareket halinde hız ve pozisyon değişimi	Var
S tipi ve trapezoidal rampa	Var
Pulse/Dir ve Up/Down tipi pulse	Var
Harici sinyal ile hareketi başlatıp durdurma	Var
Desteklediği kart sayısı	16 Kart a kadar (64 eksen) kullanım
Desteklediği programlama dili	C, C#, C++, BC++, C++ Builder, Labview, Delphi ve Visual Basic



Şekil 1. Sistem çalışma şeması

Program arayüzünde iş parçasının çizimi üç yöntem ile oluşturulabilmektedir. Birinci yöntem, kâğıt ya da düz temiz bir zemin üzerine iki boyutlu teknik resmin çizgileri üzerinde Şekil 2a’da gösterildiği gibi kablosuz kalem fare dolaştırılır. Farenin x ve y yönündeki her piksel hareketi x ve y koordinatları olarak program arayüzüne anlık olarak aktarılır (Şekil 2b). İkinci yöntem, iki boyutlu çizim yapan programlar (paint, fireworks, photoshop, vb.) ile oluşturulan bitmap formatlı (JPEG, PNG, TIFF, vb.) iş parçası çizimi program arayüzüne import edilir. Çizimin x ve y koordinatları program arayüzü oluşturulan algoritma tarafından algılanarak vektörel çizime dönüştürülmesi işlemidir. Birinci ve ikinci yöntem ile program arayüzünde oluşturulan x ve y koordinatlarına z koordinatı da ilave edilerek çizime ait takım yolu elde edilir. Üçüncü yöntem de ticari olarak kullanılan program arayüzleri gibi işlenecek iş parçasını oluşturan X, Y ve Z eksen koordinatlarının manuel olarak girilmesidir. Bu üç eksene ait takım yolu koordinatları, bilgisayarın PCI yuvasına takılan hareket kontrol kartı sayesinde tezgâhın x, y ve z eksenlerinde bulunan servo motorlara iletilir. Böylece bu iş parçası üzerinden kesici takımın üç boyutlu koordinatlara uygun bir biçimde hareket etmesi sağlanarak işleme/kesme işlemi gerçekleştirilir.

3 Sonuçlar ve tartışmalar

Program arayüzü Microsoft Visual Studio editöründeki Basic programlama dili kullanılarak hazırlanmıştır. Program arayüzü Şekil 3’te görüldüğü üzere, başlık çubuğu, menü çubuğu, anlık durum göstergesi, şekil oluşturma alanı, hızlı erişim düğmeleri, koordinat listesi, cep boşaltma, işlem ayarı, çoklu işlem ve resim ayarı penceresi bölümlerinden oluşmaktadır.

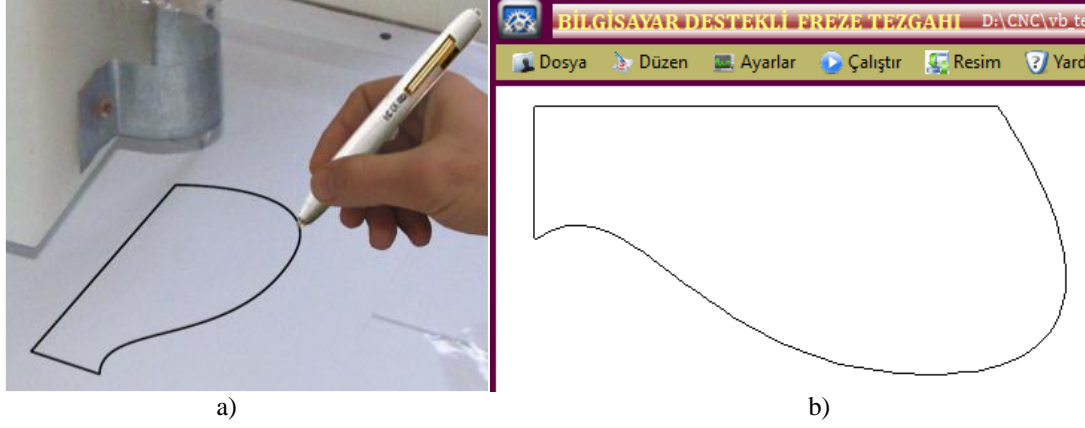
Başlık çubuğu, Şekil 4’te üzerinde gösterilen kontrollerden oluşmaktadır. Bu kontrollerin click olayına Şekil 4’de gösterilen komut satırları yazılarak çalışma ekranını simge durumuna küçültme ve çalışma ekranını kapatma işlevi gerçekleştirildi. Başlık çubuğunda aynı zamanda aktif olan çalışma adı ve yolu eklenen Label etiketi kullanılarak gösterildi.

Menü çubukları Microsoft Visual Studio editörünün “Menüler ve Araç Çubukları” penceresindeki MenuStrip bileşeni kullanılarak Şekil 5’te gösterilen menüler oluşturulmuştur. Vektörel çizim ve bitmap çizimleri için PictureBox nesnelere kullanılmıştır. Program arayüzünde, Geri ve İleri alma işleminin yapılan her işlem 3 boyutlu dizi değişkenlerinde saklanmıştır. Geri alma işleminde Şekil 6’da gösterilen akış diyagramına göre metot yazılmış ve uygulanmıştır.

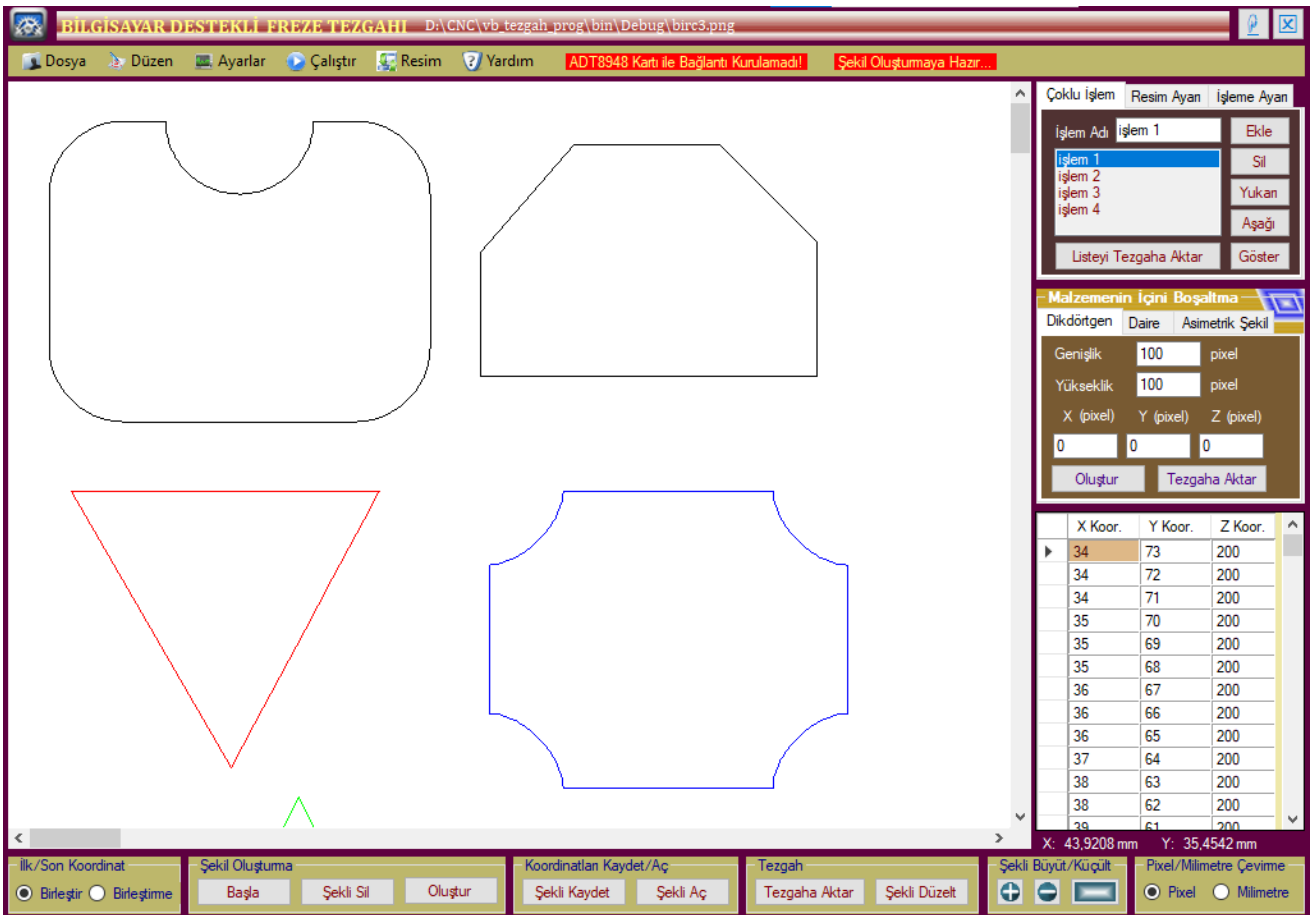
İleri alma işlemi de Geri alma işleminin akış diyagramına benzer şekilde uygulandı ve doğru bir şekilde işlem yaptığı görüldü. Şekil oluşturma alanındaki PictureBox nesnesi üzerine çizilen çizimin Ayarlar menüsündeki

Büyütme/Küçültme seçeneğini girilen oran doğrultusunda yapmaktadır. Şekil büyütme işleminde çizimi oluşturan X ve Y koordinatları büyütme/küçültme oranı çarpıldı, küçültme işleminde ise büyütme/küçültme oranına bölünerek yeni çizim koordinatları bulunarak şekil yeniden çizilmiştir.

Düzen menüsündeki Şekli Alana Sığdır seçeneği, çizimi oluşturan X ve Y koordinatlarının içerisindeki minimum ve maksimum X ve Y koordinat değerleri göre büyütme/küçültme işlemi uygulanarak gerçekleştiril



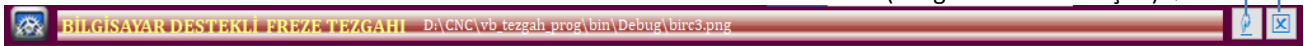
Şekil 2. İki boyutlu çizimin program arayüzüne aktarılması



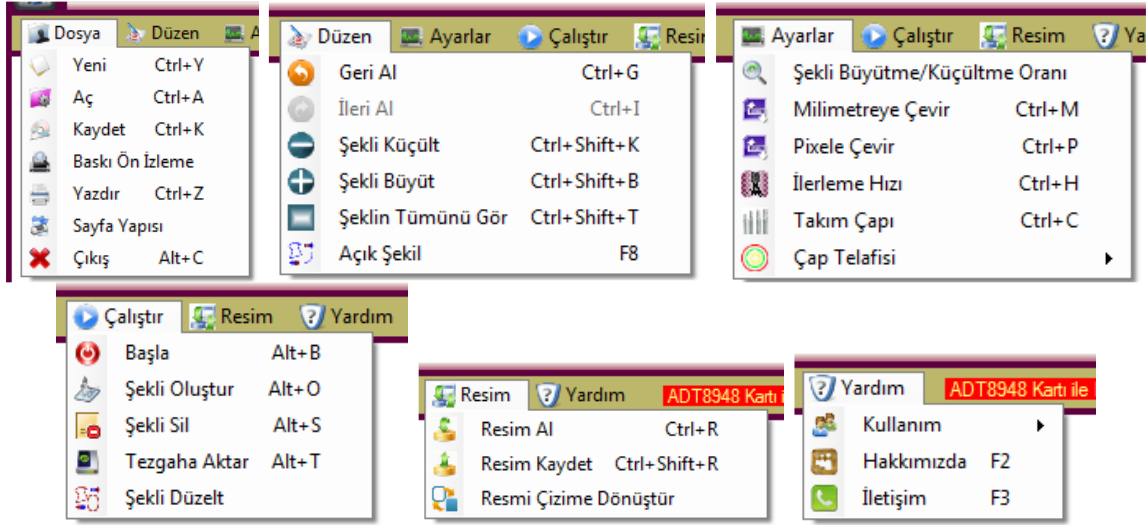
Şekil 3. CNC freze tezgahının program arayüzü

Form1.ActiveForm.Close() (Program arayüzünü kapat)

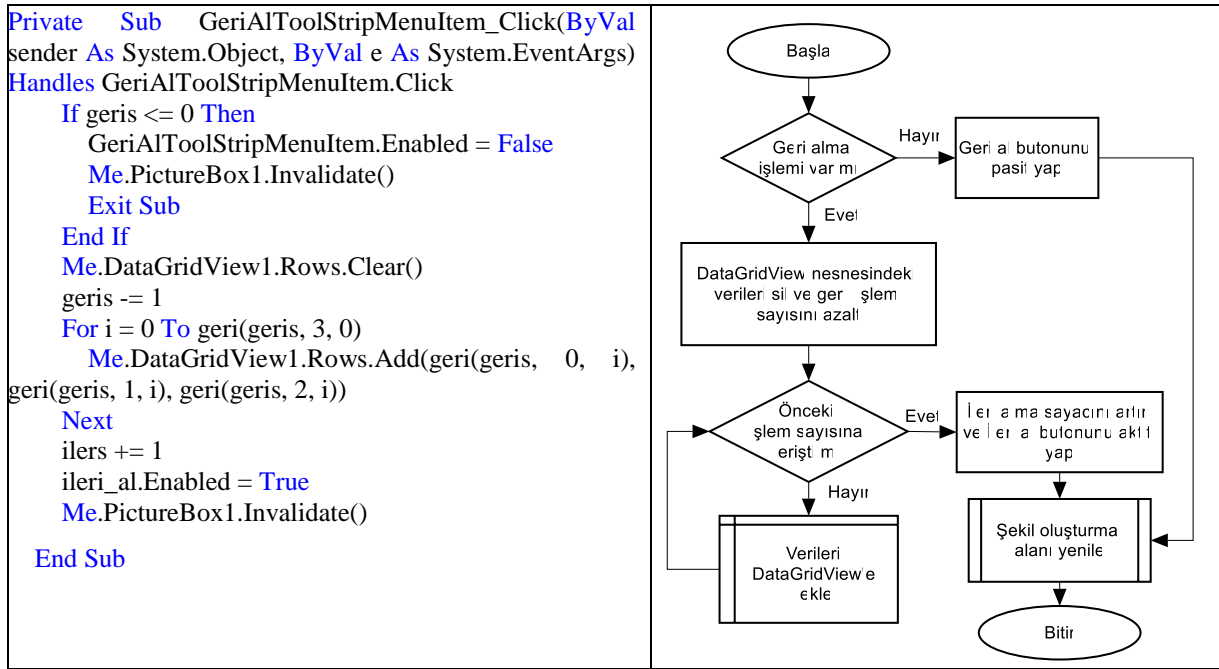
Me.WindowState = FormWindowState.Minimized (Simge durumuna küçült)



Şekil 4. Başlık çubuğu



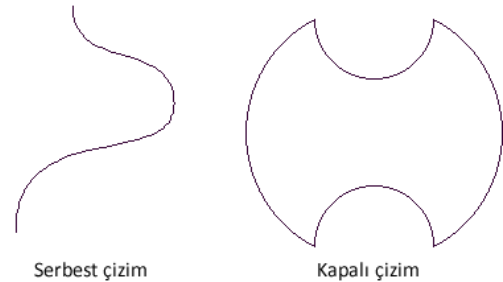
Şekil 5. Menü çubuğu



Şekil 6. Geri alma işleminde hazırlanan komutsal yapısı(sol taraf) ve akış diyagramı (sağ taraf)

Düzen menüsündeki Açık Şekil seçeneği, şekil oluşturma alanında yapılan çizimin başlangıç bitiş noktalarının kapalı/açık olacağını belirtmektedir (Şekil 7). Ayarla menüsünde şekli Büyütme/Küçültme Oranı seçeneğinde şekil oluşturma alanındaki şeklin büyütme/küçültme oranını ayarlar. Ayarla menüsünde Milimetreye Çevir ve Pixele Çevir seçenekleri, koordinat listesi kısmındaki koordinatların pixel/mm birimine dönüştürerek şekli yeniden oluşturur. Dönüştürme işlemi bilgisayarın o anki DPI (bir inch uzunluğu üzerindeki piksel sayısı) değeri baz alınarak yapılmıştır. Ayarlar menüsündeki İşleme Hızı, malzeme işlenirken ilerleme hızını ayarlar. Ayarlar

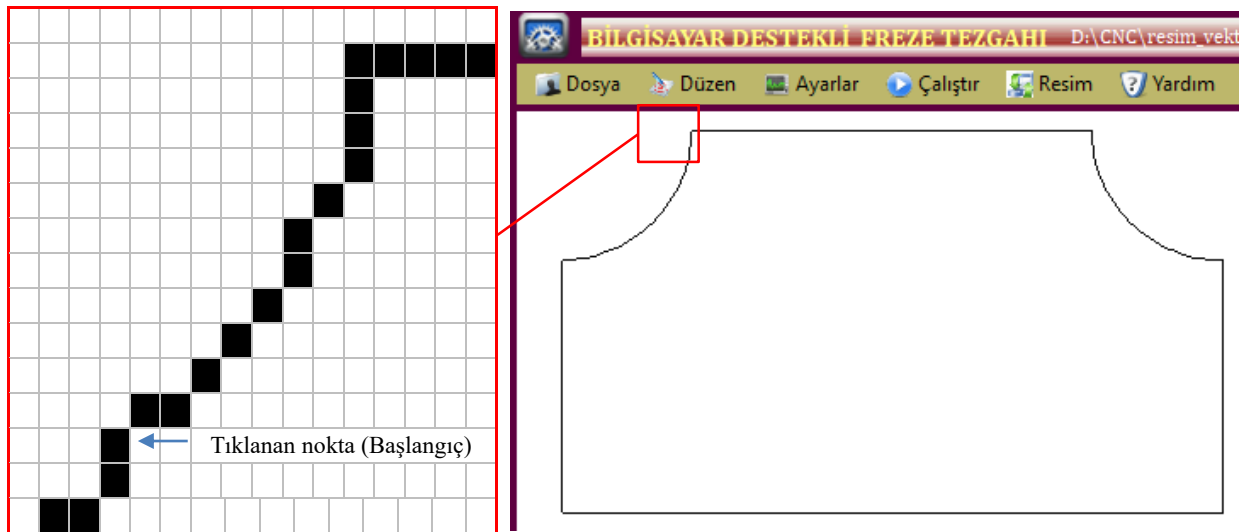
menüsündeki Çakı Çapı, kullanılacak olan çakının çapının girilmesini sağlar.



Şekil 7. Çizim şekli

Çalıştır menüsünde ve hızlı erişim araçlarından Başla seçeneği, iki boyutlu basılı bir çizimin üzerinden veya daha önce oluşturulmuş malzemenin etrafından kablosuz kalem fare ile dolaştırılıp şekil oluşturma alanında çizilmesini sağlar. Başla seçeneği tıklandığında, şekil oluşturma alanında fare imleci sıfır (sol üst köşesi) konumuna yerleşir. Kablosuz kalem fare ikinci kez tıklanması ile kablosuz kalem farenin her piksel hareketinin X ve Y koordinatlarını oluşturup hem şekil oluşturma alanında senkron olarak çizimi oluştur hem de X ve Y koordinatları DataGridView nesnesine (koordinat listesi alanı) ekler. Kablosuz kalem fare çizim üzerinde dolaştırma işlemi tamamlandığında kablosuz kalem farenin sol tuşu tıklanarak oluşturma işlemi sonlandırılır. Kablosuz kalem fare ile Şekil oluşturma alanına eklenen PictureBox nesnesinin MouseMove olayına Şekil 10'da gösterilen metod uygulandı. MouseMove olayı, farenin her konum hareketiyle tetiklenen olaydır. Böylece farenin hareketiyle bir önceki konum koordinatı ile o anki konum koordinatını bilgisi doğrultusunda vektörel çizim yapar. Çalıştır menüsünde ve hızlı erişim araçlarından Şekil Oluşturma, koordinat listesine girilen veya şekil oluşturma alanında bulunan şeklin koordinatları üzerinde yapılan değişiklikler doğrultusunda yeniden oluşturur. Çalıştır menüsünde ve hızlı erişim araçlarından Şekli Sil, şekil oluşturma alanını ve koordinat listesi penceresindeki verileri temizler. Şekil oluşturma alanındaki iki boyutlu çizimlerin koordinatları txt dosya tipi kullanılarak kaydetme/okuma işlemi yapılabilmektedir. Ayrıca oluşturulan çizimler bmp, png, jpeg, tiff, emf ve gif resim formatlarında dışa/içe aktarılmaktadır. Bu bmp, png, jpeg, tiff, emf ve gif uzantılı resim formatlarındaki iki boyutlu vektörel çizim çalışmaları içe aktarma işlemi Resim menüsü Resim Al seçeneği ile yapılmaktadır. İçe aktarılan resim formatlı çizimin vektörel çizime dönüştürülmesi Resim menüsü Resmi Çizime Dönüştür seçeneği uygulanarak yapılmaktadır. Bu işlem Resim Ayarı penceresi yapılabilir ve bu pencerede vektörel çizim ile yüklenen bitmap resim şekil oluşturma alanında gösterimi yapılmaktadır. Şekil 8'de görülen şekil oluşturma

alanına yüklenen bitmap çizimin üzeri tıkladığı noktanın rengini (siyah) referans olarak seçili rengin bulunduğu pikselli takip eder [24]. Tarama işleminin başından sonuna kadar çizimi oluşturan bütün tespit ettiği piksellerin X ve Y koordinat değerlerini Şekil 3'de gösterilen koordinat listesi alanındaki DataGridView nesnesine ekler. Böylece resim formatındaki iki boyutlu çizimin vektörel koordinatları elde edilmiş oldu. Bu iki boyutlu koordinatlar kullanılarak vektörel çizim elde edilir. Çalıştır menüsünde Şekli Düzelt seçeneği ile iki boyutlu vektörel çizimlerin üzerindeki dalgalanmalar düzeltilerek daha doğru bir çizim oluşturulur. Vektörel koordinatları bilinen iki boyutlu iş parçasının işleme derinliği (Z koordinatı) eklenerek CNC freze tezgahına Çalıştır menüsünde ve hızlı erişim araçlarından Tezgâha Aktar seçeneği gönderilir. İşleme Ayarı penceresindeki Şekil Taşıma seçeneği, oluşturulan şeklin malzemenin istenilen yerine işlenmesi için X, Y ve Z belirtilen koordinatlara taşınmasını sağlar. İşleme Ayarı penceresindeki girilen ilerleme miktarı değeri ile oluşturulan şeklin bir seferde aldığı talaş derinliğini başka bir değişle paso değerini belirtilir. Aynı penceredeki İşleme Derinliği ile çakının Z eksen yönündeki ilerleme miktarı belirlenir. İşleme derinliği, işleme yeri, çakı çapı ve ilerleme hızı ayarları yapılan iş parçası, iş listesine eklenerek CNC freze tezgahına aktarmaya hazır duruma getirilir. Koordinat listesi penceresindeki koordinatlar ve belirtilen diğer işleme ayarları doğrultusunda Şekil 9'da tezgâha aktarma penceresinde son kontroller yapıldıktan sonra tezgâha aktarılıp malzemeyi işlemesini sağlar. Ayrıca İçini Boşaltma Penceresi kısmında bir iş parçasının istenilen kısımlarında dikdörtgen, daire ve asimetrik geometrilerde içten dış doğru malzemeyi işleyerek cep boşaltma işlemi yapılmaktadır. Cep boşaltma işleminde CNC freze tezgahının kesme ucuna takılan çakının çapı baz alınarak dıştan içe doğru iş parçasından talaş kaldırarak işlemi gerçekleştirir (Şekil 11a-b). Asimetrik cep boşaltma işleminde ise iş parçası üzerinde işlenecek geometrinin önce dış hattı sonra zig zag yaparak iç kısmını boşaltır (Şekil 11c).



Şekil 8. İki boyutlu bitmap çizimi (sağ tarafta) ve çizimin piksel görünümü (sol taraf)



Şekil 9. CNC freze tezgahına aktarma işlemi

Private Sub PictureBox1_MouseMove(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.Windows.Forms.MouseEventArgs) Handles PictureBox1.MouseMove

```
Try
    kalem = New Drawing.Pen(Color.Black, 1)
    Dim grp As Graphics = Me.PictureBox1.CreateGraphics()
    If s = 2 Then 's: farenin tıklanma sayısı
        grp.DrawLine(kalem, e.X, e.Y, xk, yk)
        grp.Dispose()
        xk = e.X
        yk = e.Y
        Me.DataGridView1.Rows.Add(xk.ToString(), yk.ToString(), CNg(TextBox3.Text))
        If yk > 552 And yk < 582 And kasay = 0 Then
            Panell.AutoScrollPosition = New Point(Math.Abs(Panell.AutoScrollPosition.X), 500)
            Cursor.Position = New Point(xk + 4 - Math.Abs(Panell.AutoScrollPosition.X), yk - 441)
            kasay += 2
            kyuky += 2
        ElseIf yk > 500 And yk < 530 And kyuky = 3 Then
            Panell.AutoScrollPosition = New Point(Math.Abs(Panell.AutoScrollPosition.X), 0)
            Cursor.Position = New Point(xk + 4 - Math.Abs(Panell.AutoScrollPosition.X), yk + 59)
            kasay = 2
            kyuky = 2
        End If
        If xk > 752 And xk < 782 And ksagx = 0 Then
            Panell.AutoScrollPosition = New Point(700, Math.Abs(Panell.AutoScrollPosition.Y))
            Cursor.Position = New Point(xk - 696, 59 + yk - Math.Abs(Panell.AutoScrollPosition.Y))
            ksagx += 2
            ksolx += 2
        ElseIf xk > 700 And xk < 730 And ksolx = 3 Then
            Panell.AutoScrollPosition = New Point(0, Math.Abs(Panell.AutoScrollPosition.Y))
            Cursor.Position = New Point(xk + 4, yk + 59 - Math.Abs(Panell.AutoScrollPosition.Y))
            ksagx = 2
            ksolx = 2
        End If
        End If
        End If
        If s = 3 Then
            If RadioButton3.Checked Then
                Me.DataGridView1.Rows.Add(Me.DataGridView1.Rows(0).Cells(0).Value,
                Me.DataGridView1.Rows(0).Cells(1).Value, CNg(TextBox3.Text))
                grp.DrawLine(kalem, CInt(Me.DataGridView1.Rows(0).Cells(0).Value),
                CInt(Me.DataGridView1.Rows(0).Cells(1).Value), xk, yk)
                grp.Dispose()
                Me.Panell.AutoScrollPosition = New Point(0, 0)
            End If
            Label2.Text = "Şekil Oluşturma İşlemi Bitti..."
            s = 4
            ksagx = 0
            ksolx = 1
            kyuky = 1
            kasay = 0
        End If
    Catch ex As Exception
        MsgBox("Şekil oluşturulamıyor.", MsgBoxStyle.Information, "Şekil Oluşturma Hatası")
    End Try
End Sub
```

Çizim nesnelerinin tanımlanması

Çizimin başlangıç noktasının oluşturulup koordinat listesine eklenmesi

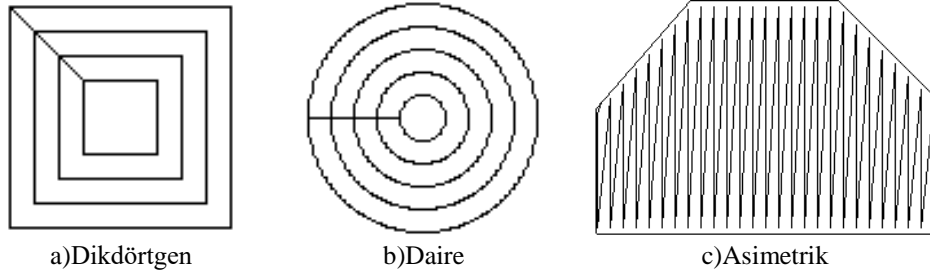
Kablosuz farenin konumuna göre dikey kaydırma çubuğunun kaydırılması

Kablosuz farenin konumuna göre yatay kaydırma çubuğunun kaydırılması

Çizimin bitirilmesi işlemleri

Hata ayıklama

Şekil 10. Kablosuz kalem farenin hareketiyle çizimin oluşturulması



Şekil 11. Cep boşaltma işlemi

4 Sonuçlar

Mobilya endüstrisinde kullanılan CNC freze tezgâhları için hazırlanan program arayüzü ile aşağıdaki işlemler başarıyla gerçekleştirdi.

- Ergonomik tasarımı sayesinde kullanıcıların CNC tezgâhlarında kullanılan G ve M kodlarına ihtiyaç duymadan rahatlıkla kullanılabilen bir arayüz geliştirildi.
- Resim formatlarındaki iki boyutlu şekilleri başarılı bir şekilde vektörel çizime dönüştürerek takım yolları oluşturuldu.
- Dikdörtgen, daire ve asimetrik geometrilerde içten dış doğru malzemeyi işleyerek cep boşaltma işlemi yapıldı.
- Şekil oluşturma alanındaki vektörel çizimler txt, bmp, png, jpeg, tiff, emf ve gif resim formatlarında kaydedildi.
- Program arayüzündeki başlık çubuğu, menü çubuğu, anlık durum göstergesi, şekil oluşturma alanı, hızlı erişim düğmeleri, koordinat listesi, cep boşaltma, işlem ayarı, çoklu işlem ve resim ayarı penceresi için hazırlanan metotlar doğru bir şekilde işlev yaptığı görüldü.

Teşekkür

Bu çalışma, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimi tarafından MF.11.19 no'lu proje kapsamında desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimine teşekkür ederiz.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %8

Burada makalenin benzerlik oranı beyan edilmelidir.

Kaynaklar

- [1] N. Hatem, Y. Yusof, A.Z.A. Kadir, K. Latif, M.M. Abedlhafd, Optimization and execution of multiple holes-drilling operations based on STEP-NC, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 114 (2021) 2031–2043. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06958-y>
- [2] M. Mori, K. Yamazaki, M. Fujishima, J. Liu, N. Furukawa, A study on development of an open servo system for intelligent control of a CNC machine tool, *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 50 (2001) 247–250. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62115-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62115-5)
- [3] Y. Zhang, Q. Zeng, G. Mu, Y. Yang, Y. Yan, W. Song, Y. Gong, A design for a novel open, intelligent and integrated CNC system based on ISO 10303-238 and PMAC, *Teh. Vjesn.* 25 (2018) 470–478. <https://doi.org/10.17559/TV-20170419111243>
- [4] S. Bukofzer, N. Livesey, A framework for an intelligent CNC and data model, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 19 (2002) 727–735. <https://doi.org/10.1007/s001700200083>
- [5] M. OLAM, Mobilya ve dekorasyon endüstrisinde kullanılacak bilgisayar destekli freze tezgâhının tasarımı, Fırat university, 2012.
- [6] G. Yan, H. Chen, X. Zhang, C. Qu, Z. Ju, A dimension-driven adaptive programming for tool-path planning and post-processing in 5-axis form milling of hyperboloidal-type normal circular-arc gears, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 106 (2020) 2735–2746. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04723-w>
- [7] X.B. Ma, Z.Y. Han, Y.Z. Wang, H.Y. Fu, Development of a PC-based open architecture software-CNC system, *Chinese J. Aeronaut.* 20 (2007) 272–281. [https://doi.org/10.1016/S1000-9361\(07\)60044-2](https://doi.org/10.1016/S1000-9361(07)60044-2)
- [8] B.C. Kim, I. Song, D. Mun, Practical method for the fast generation of a CAM model for jet engine parts, *Adv. Mech. Eng.* 13 (2021). <https://doi.org/10.1177/16878140211002700>
- [9] L.M. Xu, F. Fan, Z. Zhang, Y. Chen, D.J. Hu, L. Shi, Methodology and implementation of a vision-oriented open CNC system for profile grinding, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 100 (2019) 2123–2131. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2843-7>
- [10] C. Faria, J. Fonseca, E. Bicho, FIBR3DEmul—an open-access simulation solution for 3D printing processes of FDM machines with 3+ actuated axes, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 106 (2020) 3609–3623. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04713-y>
- [11] F.Q. Qi, X.D. Jing, K. He, Control system of stepper motor based on roundness and cylindricity measuring virtual instrument, in: *Procedia Eng.*, Elsevier, 2011: pp. 2281–2285. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.427>
- [12] D. Chang, A.D. Spence, S. Bigg, J. Heslip, J. Peterson, Open architecture CMM motion controller, in: *Sensors Control. Intell. Manuf. II*, SPIE, 2001: pp. 1–9. <https://doi.org/10.1117/12.452646>

- [13] F. Lustig, J. Dvorak, P. Kuriscak, P. Brom, Open modular hardware and software kit for creations of remote experiments accessible from pc and mobile devices, *Int. J. Online Eng.* 12 (2016) 30–36. <https://doi.org/10.3991/ijoe.v12i07.5833>.
- [14] W. Bolton, *Control Systems*, in: *Instrum. Control Syst.*, Elsevier, 2021: pp. 297–328. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823471-6.00013-7>.
- [15] S.L. Harris, D.M. Harris, *I/O Systems*, in: *Digit. Des. Comput. Archit.*, Elsevier, 2016: pp. 531.e1-531.e64. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-800056-4.00015-7>.
- [16] G. Lee, *Server Virtualization and Networking*, in: *Cloud Netw.*, Elsevier, 2014: pp. 103–120. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-800728-0.00006-0>.
- [17] *The System Bottleneck Shifts To PCI-Express*, (n.d.). <https://www.nextplatform.com/2017/07/14/system-bottleneck-shifts-pci-express/> (accessed May 19, 2021).
- [18] *Centralized Motion Control - Advantech*, (n.d.). https://www.advantech.eu/products/centralized-motion-control/sub_b17a0020-bf63-42e9-af53-1c8c533e45e3 (Accessed May 20, 2021).
- [19] *Motion Control Cards (Control In Motion)*, (n.d.). <https://www.controlinmotion.com/products/motion-control/motion-control-cards/index.shtml> (Accessed May 20, 2021).
- [20] J. Đurković, V. Vuković, L. Raković, Open Source Approach in Software Development-Advantages and Disadvantages, *Manag. Inf. Syst.* 3 (2008) 29–033. [http://www.ef.uns.ac.rs/mis/archive-pdf/2008 - No2/MIS2008_2_5.pdf](http://www.ef.uns.ac.rs/mis/archive-pdf/2008-No2/MIS2008_2_5.pdf).
- [21] M.J. Heron, V.L. Hanson, I. Ricketts, Open Source and Accessibility: Advantages and Limitations, *J. Interact. Sci.* 1 (2013) 2. <https://doi.org/10.1186/2194-0827-1-2>.
- [22] *Newfangled Solutions CNC Software Home of Mach3*, (n.d.). <https://www.machsupport.com/> (Accessed May 20, 2021).
- [23] *Software for download | HEIDENHAIN*, (n.d.). <https://www.heidenhain.com/service/downloads/software> (Accessed May 20, 2021).
- [24] M. Olam, I. Hakkı, N. Tosun, Converting a pixel graphic into toolpath for machining on a CNC milling machine, in: *Institute of Research Engineers and Doctors, LLC*, 2016: pp. 59–61. <https://doi.org/10.15224/978-1-63248-099-6-38>.





Peltier'in ısı akış sensörü olarak kullanıldığı ısıl iletkenlik ölçüm metodu

Thermal conductivity measurement method using Peltier as heat flow sensor

Ahmet Korkmaz¹ , Haydar Bayar² , Yüksel Palacı^{3,*} 

¹ 3P Teknoloji Geliştirme ve Danışmanlık San. Tic. Ltd. Şti., 34896 İstanbul, Türkiye

² Yıldız Teknik Üniversitesi, Gemi İşletme Mühendisliği, 34353, Beşiktaş, İstanbul, Türkiye

³ Yıldız Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği, 34353, Beşiktaş, İstanbul, Türkiye

Özet

İnorganik ısı yalıtım malzemesi geliştirilmesinde, katkıları, oranları, sinterleme sıcaklığı ve süresi gibi birçok parametre çalışıldığından çok sayıda numunenin ısıl iletkenliğini ölçmek gerekmektedir. Ayrıca şekillendirilme sonrası da numuneler küçük fırında sinterlendiğinden, genellikle kalıp ebatları küçük seçilmektedir. ARGE çalışmalarında bu küçük ebatlı numunelerin ısı iletim katsayısını tespit etmeye yönelik uygun maliyette sistem bulmak çok zordur. Bu çalışmada, Peltier'in ısı akış sensörü olarak kullanıldığı ısı iletim katsayısını belirlenmesinde kullanılmak üzere uygun maliyette alternatif cihaz geliştirilmiştir. Ölçüm prensibi, sıcaklıkları farklı iki plaka arasına yerleştirilen numunenin ısı iletim katsayısı ile üzerinden geçen ısı akışı bir başka deyişle Peltier'den ölçülen gerilim arasındaki orantıdan yola çıkarak belirlenmesine dayanmaktadır. Burada, mutlak ısı iletim katsayısı bilinen malzemelerin bu düzenekle ölçümünü yapılmış ve sıcak blok ile numune arasına yerleştirilen Peltier'de okunan gerilim arasında korelasyon kurulmuştur. Bu korelasyon sonrasında ısı iletkenlik katsayısı hesaplanmıştır. Bu düzenekle tespit edilen ısı iletim katsayısı ile bilinen değerler arasında %3 seviyelerinde sapma ile numunelerin ısı iletim katsayısını tespit edilebileceği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Peltier, Isıl iletkenlik, Isı akış sensörü, Yalıtım

1 Giriş

Termal iletkenlik ölçüm teknikleri, termal iletkenlik aralığı, ölçüm süresi, ölçüm doğruluğu, numune türü ve sıcaklık aralığına bağlı olarak farklılık gösterdiği görülmektedir. Termal iletkenlik ölçümü için iki ana yöntem mevcuttur [1]. Bunlar kararlı hal yöntemleri ve kararlı olmayan hal yöntemleri yöntemleridir. Kararlı hal yöntemlerinde, numunenin her noktasındaki sıcaklık sabit olduğunda ve sıcaklık zamanla değişmediğinde kararlı durum koşuluna ulaşılmış olur. Gerekli dengeye ulaşmanın genellikle uzun zaman alması bir dezavantaj oluşturmaktadır. Ayrıca bu yöntem, iyi tasarlanmış bir deneysel kurulumu gerektirdiğinden yüksek maliyetli aparatları içerir. Ancak, ısıl iletkenlik ölçümünde kullanılan

Abstract

Since many parameters such as additives, ratios, sintering temperature and time are studied in the development of inorganic thermal insulation materials, it is necessary to measure the thermal conductivity of many samples. In addition, since the samples are sintered in a small furnace after shaping, the mold sizes are generally chosen small. In R&D studies, it is very difficult to find a cost-effective system to determine the heat transfer coefficient of these small-sized samples. In this study, an alternative device with an affordable cost has been developed to be used in determining the heat transfer coefficient, in which Peltier is used as a heat flow sensor. The measurement principle is based on the determination of the sample placed between two plates with different temperatures, based on the ratio between the heat transfer coefficient and the heat flow passing over it, in other words, the voltage measured from the Peltier. Here, materials with known absolute heat transmission coefficient were measured with this device and a correlation was established between the voltage read in the Peltier placed between the hot block and the sample. After this correlation, the thermal conductivity coefficient was calculated. It has been seen that the heat transmission coefficient of the samples can be determined with a deviation of 3% between the heat transmission coefficient determined in this arrangement and the known values.

Keywords: Peltier, Thermal conductivity, Heat flow sensor, Insulation

birincil ve en doğru yöntemdir. Geçici ısı transferi yöntemleri, ısıtma işlemi sırasında doğrudan termal yayılımı belirleme yeteneğine sahiptir. Bu ölçümler nispeten hızlı bir şekilde yapılabilir, bu da diğerlerine göre bir avantaj sağlar.

Kararlı hal yöntemlerinde, ısı akış ölçerlerin kullanımı, diğer ölçüm teknikleriyle büyük ölçüde aynı ilkelere dayanmaktadır, ancak bunlarla aynı değildir. Isı akış ölçerler doğru ve hızlı cihazlardır ve bu cihazların çalışması düşük iletkenli malzemelerin ısıl iletkenliğini ölçmek için uygundur. Isı akış ölçer yöntemi için maksimum sıcaklık limiti, yaklaşık 200°C ve pratik uygulamalarda yaklaşık 100°C dir [1]. Isı akış ölçer yöntemi karşılaştırılmalı ve dolayısıyla göreceli bir yöntem olarak kabul edilebilir. Yalıtım malzemeleri ve polimerler ($k < 0.3 \text{ W/(m K)}$)

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: y_palaci@yahoo.com (Y. Palacı)

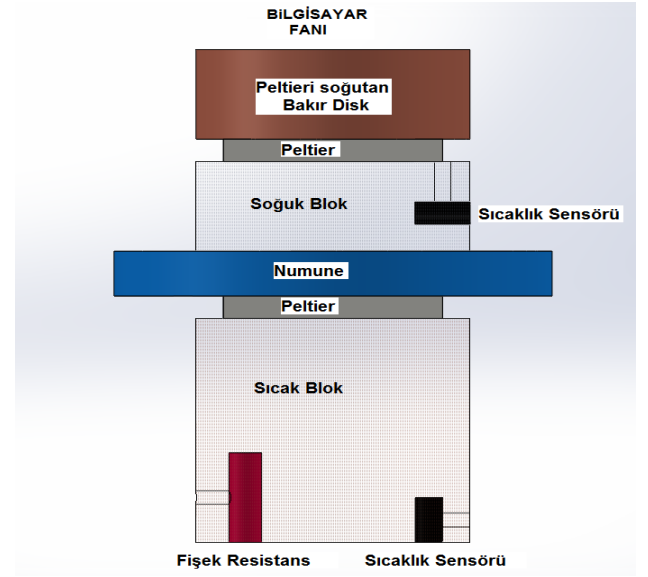
Geliş / Received: 23.09.2021 Kabul / Accepted: 04.10.2021 Yayınlanma / Published: 14.01.2022

doi: 10.28948/ngumuh.998293

genellikle ısı akış ölçer yöntemiyle test edilir. Bunun yanında camlar, seramikler ve ısıl iletkenlikleri yaklaşık 5 W/(mK)'den düşük olan diğer malzemeler için kullanılır. Yaklaşık oda sıcaklığındaki yalıtım malzemeleri için ölçüm belirsizlikleri yaklaşık %3 tür ve yüksek sıcaklıklarda belirsizlikler %10 ile %20 arasındadır [1]. Jonnot vd. [2] düşük örnek boyutlu numuneler için küçük sıcak blok metodunu geliştirmiştir. Bu metod il 3 ila 9 mm arasında değişen kalınlıklara ve 15 mm'ye kadar düşük çaplar sahip numunelerde 0.014–0.2 W/(m K) aralığındaki iletkenlikleri %10 yanılmayla ölçebilmiştir. Rizzo vd. [3] yaptığı çalışmada ise, temaslı ısı akış sensörlerinin kalibrasyonu ve belirsizliği iyileştirmek önlemler önermiştir. Ölçüm belirsizliğinin bilinen değerden sadece %2.7 farklı olduklarını belirtmişlerdir.

Isı akış ölçerin temel fikri, bir termal direnç boyunca sıcaklıktaki bir düşüşün ölçümüne dayalı olarak ısı akışının çıkarılmasıdır. Isı akışı ölçümünün yolu, sertifikalı veya iyi bilinen bir referans numunesi ya da bir ısı akışı sensörü kullanılarak gerçekleştirilir. Isı akışı sensörleri çoğunlukla bir termal direnci kapsayan bir dizi termokupl bağlantısından oluşur. Isı akış sensörlü ısı iletkenlik ölçüm düzeneği Şekil 1'de gösterildiği gibi, numune, biri ısıtılan diğeri soğutulan, farklı sıcaklıklarda sabit tutulan iki plaka (sıcak ve soğuk blok) arasına yerleştirilir [4]. Kararlı sıcaklıklara ulaşıldığında, sensör kararlı bir elektrik çıkış sinyali sağlar. Ölçülen sinyal ve termovoltajdaki değişiklik, plaka boyunca meydana gelen sıcaklık düşüşündeki düşüşle orantılıdır. Kararlı hal koşulları, katmanlı sistemin her noktasındaki ısı akışı miktarı eşit olduğunda ortaya çıkar. Termal denge kurulduktan sonra, termal iletkenliği hesaplamak için kararlı hal sıcaklıkları, numunenin kalınlığı, numunenin ölçülen alanı ve sıcak plakaya ısı akışı girdisi kullanılır. Isı akışı çıkışı genellikle çeşitli referans standartlarıyla, örneğin korumalı bir sıcak plaka aparatında kalibre edilir. Işker ve Yeşilata [5] araştırmalarında, üç farklı kompozit beton numunesinin birbirine yakın ısı iletim katsayısının farkını ölçebilen hassas bir sistem geliştirmişlerdir. Benzer bir çalışma yapan Sadati ve ark. termoelektrik teknolojisi yani Peltier kullanılarak düşük ısıl iletkenliğe sahip malzemelerin ısıl iletkenlik ölçümü için basit, ucuz ve yeni bir yöntem geliştirmiştir [6]. Bu yöntemde kullanılan sistem bir termoelektrik soğutucu, bir termoelektrik jeneratör ve iki fan ile soğutulan iki soğutucudan oluşmaktadır. Termal iletkenliği ölçmek için, bir termoelektrik soğutucu ile bir termoelektrik jeneratör arasına bir numune yerleştirilmiştir. Termoelektrik soğutucunun sıcak tarafında oluşan ısı numuneden geçerek termoelektrik jeneratöre girer ve iki tarafı arasında sıcaklık farkı oluşturur.

Sıcaklık farkı, termal iletkenliğin, numunenin kalınlığının ve termoelektrik soğutucunun güç tüketiminin bir fonksiyonu olan bir elektrik voltajı üretir. Sonuç olarak, üretilen elektrik voltajının, numunenin kalınlığının, elektrik voltajının ve termoelektrik soğutucunun elektrik akımının bir fonksiyonu olarak termal iletkenliğin tahmini için doğrusal olmayan bir fonksiyon elde etmek için matematiksel bir modelleme kullanılmıştır. Bunun yanında, Austin vd. [7], Peltierin yüzeyel ısı akışı ölçümü için Captec® ısı akışı sensörleri ile karşılaştırmıştır.



Şekil 1. Test düzeneğinin 2 boyutlu gösterimi

Captec ve Peltier ölçümleri karşılaştırıldığında ışımsal kısmın aynı olduğunu bulunmuştur. Bununla birlikte, Peltier ölçümleri kullanıldığında konvektif kısmın, Captec ölçümü kullanıldığından yaklaşık iki kat daha büyük olduğunu tespit etmişlerdir.

Yalıtım malzemesi geliştiren araştırmacılar, malzemeleri ve koşulları değiştirerek çok sayıda deney yapmaktadır. Genellikle seramik inorganik yalıtım malzeme geliştirilmesinde, doğadan temin edilen ucuz ham maddeler yani madenler öğütme veya ayrıştırma işleminden sonra katkılarla karıştırılmakta ve disk şeklinde preslenmektedir. Bu işlemi takip eden sinterleme ile gerekli mukavemet ve özellikler ısıtılan disklerde oluşturulmaktadır. Disklerin, ısı iletkenliklerini ölçerek optimum malzeme ve üretim koşullarını tespit edilmektedir. Ancak, ısı iletkenlik ölçüm sistemleri ya çok pahalı ya da büyük ebatlı test numunelerinin üretimini zorunlu kılmaktadır. Bu zorluğu ortadan kaldırmak için laboratuvarında inorganik yalıtım malzemeleri geliştiren bilim adamlarının kullanabileceği düşük maliyeti, kolaylıkla kendilerinin oluşturabileceği ve Peltierin ısı akış sensörü olarak kullanıldığı bir düzenek önerilmektedir.

2 Materyal ve metod

Bu çalışmada Peltierin ısı akış sensörü olarak kullanıldığı bir sistem tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemin çalıştığı ortamın sıcaklığı ölçüm sonuçlarını etkilememesi için 22°C'de sabit tutulmuştur. Numune yüzeylerindeki sıcaklık farkı 10 derece olarak ayarlandığı için, soğuk tarafa doğru ısı akışı olmaktadır. Bu ısı akışı numunenin sıcak tarafında bulunan Peltierde gerilim oluşturmaktadır. Bu gerilim değerinden ısıl iletkenlik katsayısı tahmin edilmektedir. Pazarda mevcut Peltierlerin genel ebatları 40mmx40mm olduğundan ısıl iletkenlik ölçümü yapılacak numune ebatları bundan büyük olmalıdır. Soğuk tarafın sıcaklığını belli bir seviyede tutmak için diğeri bir Peltier soğutucu olarak kullanılmaktadır. Sıcak bloğun ısıtılması için ise alt bloğun içerisine 3D yazıcı ısıtıcısı olarak kullanılan bir adet fişek

rezistans yerleştirilmiştir. Soğuk ve sıcak taraflardaki sıcaklık kontrolü ve ölçümü için her birine bir adet LM35 analog sıcaklık sensörü yerleştirilmiştir. Isı akışı blokları ise bakır disklerden meydana gelmektedir.

2.1 Sistem tasarımı

Çalışmada düzeneğe 22°C'de sıcaklığı sabit tutulan 50 mm kalınlığında, iç ölçüleri (300 mm X 300 mm X 150 mm) bir yoğunluğu 30 kg/m³ strafor kutu içerisinde gerçekleştirilmiştir. Yapılan kapalı düzeneğin içinde sıcak blok tarafı gömülü halde ve sabitlenmiştir. Sıcak bloğun üzerine sensör olarak kullanılacak Peltier yerleştirilmiştir. Ölçülecek numune Peltierin üzerine yerleştirilmektedir. Daha sonra numunenin üzerine diğer bir Peltier tarafından soğutulan blok yerleştirilmektedir. Bu blok içerisinde de sıcaklık sensörü bulunmaktadır. Her iki bloğun da sıcaklıkları PID denetleyici ile sabit tutulmaktadır.

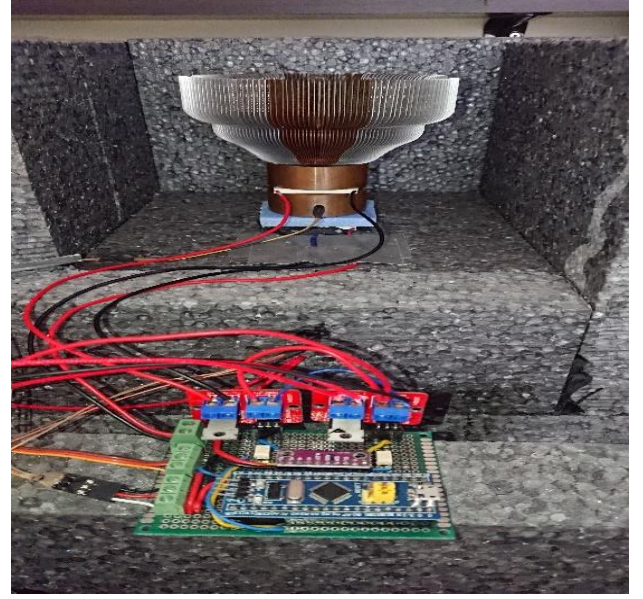
Tasarlanan test düzeneğinin çalışma prensibini şöyle ifade edebiliriz. EPS malzemedeki yapılan küp şeklinde üst yüzeyi açık malzemenin alt tarafında bulunan parça sıcak tarafı temsil etmektedir. Alt sıcak blok basit bir ısıtıcı yardımıyla sıcaklığı sabit kalacak şekilde PID kontrolü ile ısıtılmaktadır. Ölçüm sırasında test ortamının sıcaklığı 22°C derece olduğundan, sıcak bloğun sıcaklığı 5 derece daha yüksek olarak 27°C dereceye ayarlanmıştır. Soğuk blok ise ortam sıcaklığının 5 derece altı olan 17°C'ye ayarlanmıştır. Böylece toplam sıcaklık farkı 10 derece olacak şekilde, sıcak taraf 27°C ve soğuk taraf 17°C derece olarak ayarlanmıştır. Set edilen sıcaklıklara ulaşılması ve sıcaklık farkının 10°C'de sabit kalması ile Peltierin üzerindeki gerilim ölçümü için geçen süre yaklaşık olarak 7-8 dakika olarak tespit edilmiştir. Ayrıca soğuk tarafın sıcaklığını sabitlemek için bu bölgede Peltierin üstünde oluşan ısı bilgisayar fan sistemi kullanılarak uzaklaştırılmaktadır. Sistem dengeye ulaştığında ölçüm için kullanılan Peltierin üzerinden akan ısı sabit olacaktır. Bunun sonucunda Peltierin uçlarından bir gerilim oluşmaktadır ve bu gerilim akan ısının miktarıyla orantılıdır. Bu akan ısının miktarı ve dolayısı ile Peltier gerilimi numunenin termal iletkenliği ile ilişkilidir. Sistemdeki parçaların konumunu ve test düzeneğinin son hali Şekil 2'de görülmektedir.

2.2 Ölçülen numuneler

Çeşitli karışımlar sonucu elde edilen seramik, dairesel geometriye sahip 60-100 mm çap aralığında ve 6-12 mm aralığında kalınlığa sahip numunelerin (Şekil 3) flaş lazer ölçüm tekniği kullanılarak elde edilmiş ısı iletkenlik katsayılarının (k (W/m.K)) peltierin sensör olarak kullanıldığı ölçme sisteminde tekrar ölçümü yapılmış ve bu ölçümler karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir.

2.3 Elektronik kart ve program

Test sisteminde STM32F103C6T6 micro denetleyici geliştirme kartı kullanılmıştır. Peltier ve sıcaklık sensörlerinden gelen analog veriler ADS1115 analog dijital dönüştürücü modülüyle mikro denetleyiciye aktarılmıştır.



Şekil 2. Isı iletkenliği ölçüm test düzeneği

Bu modül 15 bit çözünürlüğünde olup 0.015 mV hassasiyetle çalışmaktadır. Fişek ısıtıcıyı ve soğutma amaçlı kullanılan Peltier sürmek için IRF520N mosfetleri kullanılmıştır.

2.4 Kalibrasyon için kullanılan test malzemeleri

2.4.1 Farklı kalınlıkta hazırlanan malzemeler

Çalışmada ısı iletkenlik katsayısı ölçümü yapılacak malzemelerin kalınlığı değiştiğinden dolayı, kalınlık ile okunan Peltier gerilimi arasında bir bağıntı çıkarılması gerekmektedir. Test sistemi yaklaşık 10mm kalınlığındaki numuneleri ölçmek amacıyla tasarlandığından dolayı, 8mm, 9mm, 10mm, 11mm ve 12mm kalınlığında kağıt bloklar kalibrasyon ölçümü için hazırlanmıştır.

2.4.2 Farklı ısı iletkenliğe sahip malzemeler

Isıl iletkenliğin ölçümünde, Peltier ısı akış sensörü gerili ile ısı iletkenlik ilişkisinin tespit edilmesi ve buna göre kalibre katsayısı bulunması için ısı iletkenliği belirli olan ve farklı ısı iletkenlik katsayısına sahip, farklı kalınlıklarda malzemeler kullanılmıştır. Kullanılan malzemeler Tablo 1'de listelenmiştir. 3 adet farklı k değerlerine sahip numune (2 seramik, 1 EPS) bilinen değerlerinden yola çıkarak Peltierin gerilimi ile termal iletkenlik arasında korelasyon kurulmuştur. Böylece ölçüm yapıp Peltier üzerindeki gerilimine etkisi kalibre edilmiştir. Sonuçlar Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Farklı ısı iletkenlik ve kalınlığa sahip malzemeler

Malzeme	Isıl iletkenliği (W/mK)	Kalınlığı(mm)
1	0.032	10.00
2	0.153	10.90
3	0.272	11.43

2.4.3 Maliyet dağılımı

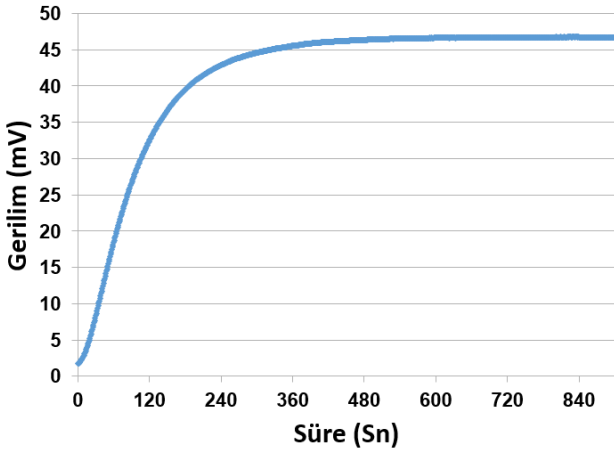
Kullanılan malzemelerin maliyet dağılımları **Tablo 2**'de verilmektedir. Burada maliyet dağılımında elektronik kısmın maliyeti aşağı yukarı bakır maliyetine yakındır. Toplamda ise 850 TL (\$100) karşılık yapılabileceği görülmektedir.

Tablo 2. Isı iletkenlik ölçüm sistemi maliyetleri

Ürün	Adet	Fiyat TL	Toplam TL	Toplam \$
Peltier	2	42	84	10
Bakır malzeme	3	80	240	30
Bakır işçiliği	1	240	240	30
Fişek rezistans	1	8	8	1
Sıcaklık sensörü	2	8	16	2
Bilgisayar fanı	1	40	40	5
Mikro denetleyici	1	40	40	5
Mosfet	2	20	40	5
Analog-dijital dönüştürücü	1	25	25	3
Diğer masraflar	1	85	85	10
TOPLAM				100

3 Bulgular ve tartışma

Numune sonuçlarının değerlendirilmesi için öncelikle sistemde Peltier geriliminin süreye bağlı değişimi incelenmiş ve sistemin kararlı hale gelmesi için gereken süreye bakılmıştır. Peltier geril değeri kullanılırken gerilimin kararlı hale geçtiğinde okunan gerilim değeri alınmıştır. Kararlı hale gelmesinin gösterildiği grafik **Şekil 3**'de gösterilmiştir. Ortalama 8 dakikada okunan gerilim değeri değişimi minimize olup kararlı hale gelmektedir.



Şekil 3. Okunan gerilimin kararlı hale gelme süresi

3.1 Kalınlık kalibrasyonu

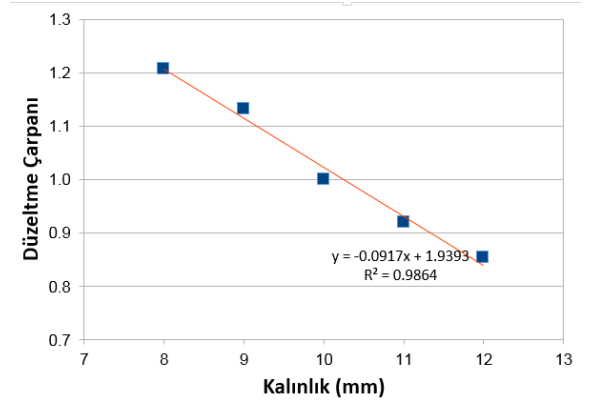
Ölçülecek numunelerin kalınlığı sabit olmadığından, Peltierden ölçülen gerilim de kalınlığa göre değişecektir. Bu kalınlık etkisini minimize etmek için 8 mm, 9 mm, 10 mm, 11 mm ve 12 mm kalınlığındaki kâğıt blokları ile ölçümler alınmış ve kalınlık ile Peltier gerilim arasındaki ilişki çıkarılmıştır. **Tablo 3**'de bu kalınlık ve gerilim değerleri verilmeyle beraber, referans alınan 10 mm kalınlığa göre gerilim değişiminin oranı da gösterilmiştir. Ayrıca **Şekil 4**'te

kalınlığa karşı okunan sensör gerilim değerlerinin (Gs) dağılımının verildiği grafik görülmektedir. Kalınlık attıkça ölçülen gerilimde lineer bir ilişki ile azalması beklendiğinden ölçüm değerleri Excel programı kullanılarak, lineer bir ilişki fonksiyona dönüştürülmüştür. Fonksiyon **Denklem 1**'de verilmiştir. **Denklem 1**'de hesaplanan $\Ç1$ değeri kalınlığa göre düzeltme katsayısı çarpanı olarak hesaplanmaktadır. Sensör gerilim değerleri (Gs) ise Peltier ısı akış sensöründen okunan değerdir.

$$\Ç1 = -0.917(Gs) + 1.9393 \quad (1)$$

Tablo 3. Farklı kâğıt kalınlıkları için Peltier gerilim değerleri ve düzeltme katsayıları

Numune	Kalınlık (mm)	Peltier sensör gerilim Değeri(Gs) (mV)	Düzeltilme Çarpanı($\Ç_1$)
1	8	30.6	1.207
2	9	28.7	1.132
3	10	25.36	1.000
4	11	23.33	0.920
5	12	21.66	0.854



Şekil 4. Kalınlığa karşı okunan gerilim değerleri dağılımı ve bu ilişkiyi en iyi tanımlayan lineer fonksiyon

3.2 Isı iletim katsayısı Kalibrasyonu

Isı iletim katsayısına bağlı olarak Peltier ısı akış sensörünün kalibrasyonu için ısı iletim katsayısı bilinen 3 farklı numune için öncelikle kalınlıklarının çarpanı bulunmuş ve buna göre değerleri düzeltilmiştir. Daha sonra Excel programı yardımı ile bilinen ısı iletkenlik değerleri(k) (W/mK) okunan kalınlık çarpanı ile düzeltilmiş gerilim değerleri(Gk) **Denklem 2**'de görüldüğü gibi hesaplanmıştır. Isı iletim katsayısı kalibrasyonu için kullanılan numunelerin bilinen ısı iletim katsayısı ve kalınlığa göre düzeltilmiş gerilim değerleri **Tablo 4**'de dağılımı ise **Şekil 5**'deki grafikte verilmiştir. Excel programı ile hesaplanan dağılıma en iyi tarifleyen ikinci derece polinom **Denklem 3**'de verilmiştir. Burada K gerilimden yola çıkarak hesaplanan ısı iletim katsayısını vermektedir.

$$Gk = Gs / \Ç1 \quad (2)$$

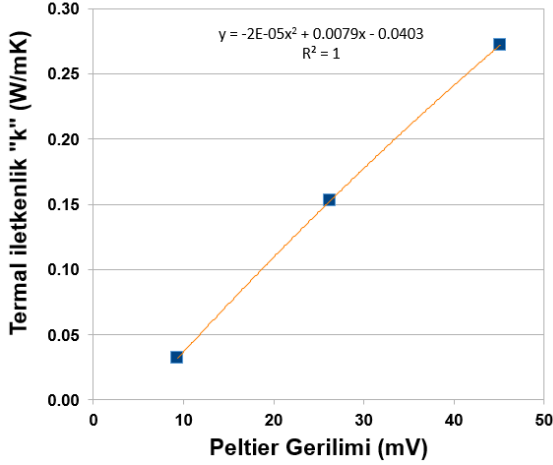
$$K = -2E-05(Gk)^2 + 0,0079(Gk) - 0,0403 \quad (3)$$

Tablo 4. Numunelerin bilinen ısı iletkenlik katsayısı ile kalınlık düzeltmesi yapılmış gerilim değerleri

Numune	Gerçek "k" Değeri	Ölçülen Peltier Gerilim (Gs) (mV)	Numune Kalınlığı (mm)	Kalınlık Düzeltme Çarpanı (Ç1)	Düzeltilmiş Peltier Gerilimi (Gk)
1	0.032	9.57	10.00	1.022	9.360
2	0.153	24.75	10.90	0.940	26.331
3	0.272	40.24	11.43	0.891	45.144

3.3 Isı iletim katsayısı ölçümü ve karşılaştırma

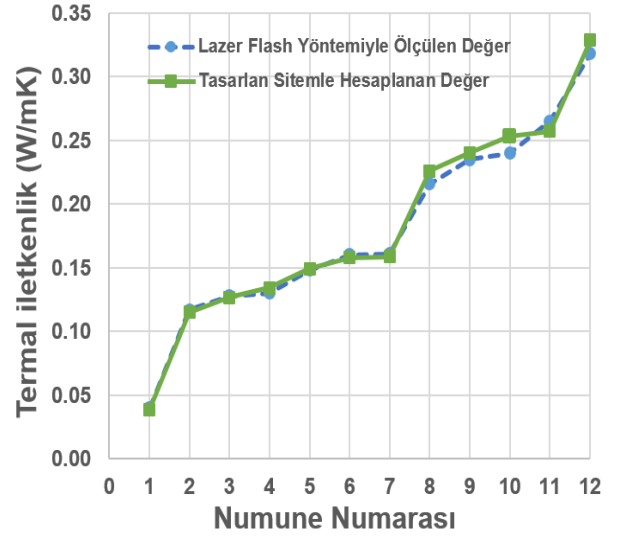
Daha önce lazer flash yöntemiyle ısı iletkenliği ölçülmüş 11 seramik ve 1 adet XPS yalıtım malzemesinin ölçümleri tasarlanan sistem ile yapılmıştır. Tablo 5’de, sensör gerilim değerleri (Gs), kalınlık düzeltme çarpanı (Ç1), düzeltilmiş gerilim (Gk) ve hesaplanan termal iletkenlik (K) değerleri verilmiştir. Hesaplanan ısı iletim katsayısı ile lazer flash yöntemiyle ölçülen değerlerin dağılımı Şekil 6’ verilmiştir. Görüleceği üzere hesaplanan değerlerle bilinen değerler arasında en fazla %5.62 gibi bir farklılık olabilmektedir.



Şekil 5. Kalınlığa göre düzeltilmiş gerilim değerlerine karşı ısı iletim katsayıları grafiği

Tablo 5. Farklı kalınlıklarda ve farklı ısı iletim katsayısına sahip numunelerin hesaplanan değerleri

Numune Sıra no	Ölçülen Peltier Gerilimi	Numune Kalınlığı (mm)	Kalınlık Düzeltme Oranı	Düzeltilmiş Peltier Gerilimi	Ölçülen "k" Değeri	Gerçek "k" Değeri	Sapma %
1	11.400	9.0	1.114	10.232	0.039	0.040	3.66
2	24.870	8.1	1.197	20.783	0.115	0.117	1.82
3	21.740	10.6	0.967	22.492	0.127	0.128	0.96
4	27.620	8.4	1.173	23.550	0.134	0.130	3.12
5	29.200	8.8	1.132	25.784	0.149	0.148	0.88
6	28.000	9.9	1.034	27.069	0.158	0.160	1.27
7	27.100	10.3	0.997	27.187	0.159	0.161	1.39
8	34.260	11.2	0.912	37.547	0.226	0.216	4.57
9	46.750	8.4	1.172	39.892	0.240	0.235	2.29
10	56.100	6.6	1.334	42.048	0.254	0.240	5.63
11	36.220	11.9	0.849	42.652	0.257	0.265	2.96
12	76.400	6.0	1.386	55.105	0.329	0.318	3.32



Şekil 6. Numunelerin kalınlıklarına göre hesaplanan ve bilinen ısı iletkenlik katsayısı dağılımı grafiği

4 Sonuçlar

Yalıtım uygulamalarında kullanılan materyal ya da malzemelerin ısı iletkenlik ölçümüne yönelik bu yöntem oldukça ekonomik ve diğer yöntemin çıktıklarına yakın sonuçlar vermektedir. Bu çalışmada incelenen Peltierin ısı akış sensörü olarak kullanıldığı ölçüm yöntemi; ölçüm hassasiyeti, küçük boyutlu numune kullanımı ve deney süresinin kısalığı nedeniyle tercih edilebilir. Ayrıca çoklu sistem tasarımına uygun bir düzeneştir.

Not

Bu makale birinci yazar Ahmet Korkmaz'ın yüksek lisans çalışmasından üretilmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %13

Kaynaklar

- [1] N. Yüksel, The review of some commonly used methods and techniques to measure the thermal conductivity of insulation materials, *Insulation Materials in Context of Sustainability*, IntechOpen 2016. <https://doi.org/10.5772/64157>
- [2] Y. Jannot, S. Schaefer, A. Degiovanni, J. Bianchin, V. Fierro, and A. Celzard, A new method for measuring the thermal conductivity of small insulating samples, *Review of Scientific Instruments*, 90, 054901-9, 2019. <https://doi.org/10.1063/1.5065562>
- [3] G. Rizzo, R. Christen, and M. Stöck, Calibration methodology for contact heat flux sensors with enhanced accuracy, *Measurement Science and Technology*, 32(4), 045003, 2021. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6501/abcf62>
- [4] 2019ASTM C518-17, Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017. <https://doi.org/10.1520/C0518-17>
- [5] Y. Işıker, ve B. Yeşilata, Yapı malzemelerinin ısı iletim katsayılarının tespitine yönelik yeni bir yöntem geliştirilmesi, *Harran Univ. Muh. Der.*, 01, 14-21, 2017. <https://dergipark.org.tr/pub/humder/issue/30491/341142>
- [6] S. Sadati, N. Rahbar H. Kargarsharifabad, and K. Doost, Low thermal conductivity measurement using thermoelectric technology - Mathematical modeling and experimental analysis, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 127, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105534>
- [7] M. Austin, T. Vogt, W. A. Sempey, A. Sommer, ve J. Dumoulin, Investigation into the use of thermoelectric modules as an alternative to conventional flux meters: application to convective and radiative heat flux in buildings. *International Journal of Thermal Sciences*, 160, 1-13, 2021.





Modifiye edilmiş ve modifiye edilmemiş bor karbür (B₄C) nanopartiküllerinin yapısal yapıştırıcıların mekanik özellikleri üzerine etkisinin karşılaştırılması

Comparison of the effect of modified and unmodified boron carbide (B₄C) nanoparticles on the mechanical properties of structural adhesives

Kürşat Gültekin^{1,*} 

¹ Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 55270, Samsun, Türkiye

Özet

Nanoteknoloji ve malzeme bilimi üzerine yapılan araştırmalarda, daha üstün mekanik, termal ve fiziksel özelliklere sahip polimer matrisli malzemeler geliştirilmektedir. Bununla birlikte, epoksi matris içerisine nano boyutta ve farklı özellikte çeşitli partiküller katılarak malzemelere istenilen özellikler kazandırılmaya çalışılmaktadır. Bu kapsamda, matris içerisine eklenen bor bileşikleriyle üretilen polimerik malzemeler, malzeme bilimine yeni bir bakış açısı getirmiştir. Yapılan çalışmada, hegzagonal bor karbür (B₄C) nanopartiküllerinin ve modifikasyon işleminin yapısal yapıştırıcıların mekanik özelliklerini nasıl etkilediği incelenmiştir. Bu amaçla, ilk olarak B₄C nanopartiküllerinin yüzeyi 3-(glycidylxypropyl) trimethoxysilane bileşiği kullanılarak modifiye edilmiştir. Araldite 2011 yapısal yapıştırıcısı içerisine ağırlıkça %1, %2 ve %3 oranlarında modifiye edilmiş ve modifiye edilmemiş B₄C nanopartikülleri katılarak, yeni yapısal yapıştırıcılar üretilmiştir. Üretilen nanopartikül katkılı yapıştırıcıların mekanik özelliklerini ve modifikasyonun önemini belirlemek için çekme testi ve dinamik mekanik analiz (DMA) yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, modifiye edilmiş B₄C nanopartikül katkılı yapısal yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin (çekme dayanımı, elastisite modülü, depolama modülü) iyileştiği gözlemlenirken, modifiye edilmemiş B₄C katkısıyla üretilen yapıştırıcılarda ise mekanik özelliklerin azaldığı gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Yapısal yapıştırıcı, Bor karbür, Yüzey modifikasyonu, Mekanik özellikler

1 Giriş

Termoset polimerler olarak bilinen epoksi yapıştırıcılar, üstün fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle, havacılık ve otomotiv endüstrisinde sıklıkla kullanılmaktadır [1-2]. Epoksi yapıştırıcılar, aynı veya farklı malzemeleri birleştirmede güçlü bir yapışma elde edilmesi, termal kararlılık ve kimyasal direnç gibi özelliklerinin yanı sıra, kurluşma işlemi sonrasında çapraz bağlı yapısı nedeniyle düşük kırılma tokluğuna sahiptirler. Bu durum, epoksi yapıştırıcıların birçok kullanım alanında yapısal ve fonksiyonel malzeme olarak uygulamasını kısıtlamaktadır [3]. Günümüzde malzemelerin mekanik, termal ve fiziksel

Abstract

Polymer matrix materials with superior mechanical, thermal and physical properties are being developed in research on nanotechnology and materials science. In addition, it is tried to gain the desired properties to the materials by adding various particles of nano size and different properties into the epoxy matrix. In this context, polymeric materials produced with boron compounds added to the matrix have brought a new perspective to materials science. In this study, it was investigated how hexagonal boron carbide (B₄C) nanoparticles and modification process affect the mechanical properties of structural adhesives. For this purpose, firstly, the surface of B₄C nanoparticles was modified using 3-(glycidylxypropyl) trimethoxysilane compound. New structural adhesives were produced by adding 1%, 2% and 3% by weight modified and unmodified B₄C nanoparticles into Araldite 2011 structural adhesive. Tensile test and Dynamic Mechanical Analysis (DMA) were performed to determine the mechanical properties of the produced nanoparticles doped adhesives and the importance of modification. When the results obtained from the experiments were compared, it was observed that the mechanical properties (tensile strength, elasticity modulus, storage modulus) of modified B₄C nanoparticle doped structural adhesives improved, while the mechanical properties were decreased in the adhesives produced with the unmodified B₄C nanoparticles additive.

Keywords: Structural adhesive, Boron carbide, Surface modification, Mechanical properties

özelliklerini iyileştirmek için, matris malzemesi içerisine farklı boyut ve özellikte dolgu maddeleri katılarak malzemelere istenilen özellikler kazandırılmaya çalışılmaktadır. Epoksi yapıştırıcıların kullanımını kısıtlayan fiziksel, termal ve mekanik özelliklerini geliştirmek için, matris malzeme içerisine mikro ve nano boyutta çeşitli katkı maddeleri eklenmektedir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, grafen, karbon nanotüp (KNT), fulleren, kil, grafen oksit, Al₂O₃ gibi katkı maddelerinin epoksi matris içerisine eklenmesiyle epoksilerin fiziksel, termal ve mekanik özelliklerin iyileştiği görülmektedir [4-13]. Han vd. [14] tarafından epoksi

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: kursat.gultekin@omu.edu.tr (K. Gültekin)
Geliş / Received: 19.08.2021 Kabul / Accepted: 12.10.2021 Yayımlanma / Published: 14.01.2022
doi: 10.28948/ngumuh.984658

yapıştırıcı içerisine hacimce %0.125 oranında grafen katılmasıyla çekme dayanımının yaklaşık %20, hacimce %0.25 oranında KNT katılmasıyla ise %23 oranında arttığı ifade edilmiştir. Rafiee vd. [15], epoksi içerisine ağırlıkça %1 oranında fulleren katılmasıyla üretilen epoksilerin tokluk, elastisite modülü ve çekme dayanımı değerlerinin katısız numuneye kıyasla sırasıyla yaklaşık %89, %18.5 ve %20 oranında arttığını ifade etmişlerdir. Bazgari vd. [16], tarafından yapılan çalışmada ise, epoksilerin eğilme mukavemeti, rijitlik ve darbe dayanımının hacimce %1 oranında nano- Al_2O_3 katkısıyla artış sergilediği, %3 oranında Al_2O_3 katılmasıyla ise oluşan aglomerasyonlar neticesinde artışın elde edilmediği bildirilmiştir. Farklı karakterdeki epoksi yapıştırıcılara, farklı killerin katıldığı bir çalışmada ise [17], hidrokarbon nanokilleri katkısıyla bulk yapıştırıcı numunelerin yük taşıma kapasitelerinin arttığı ifade edilmiştir.

Bahsedilen bu nanopartiküllerin yanı sıra, bor nitür (BN) ve bor karbür (B_4C) gibi bor nanopartikülleri de son birkaç yılda kullanılmaya başlanmıştır. Yüksek sertlik, ergime derecesi, elastisite modülü ve termoelektrik özellikleri ile birlikte kimyasallara karşı aşınma ve korozyon direncinin mükemmel olması nedeniyle bor nanopartikülleri günümüzde ileri teknolojinin önemli bir malzemesi olarak birçok yüksek performansa sahip uygulamalarda ön plana çıkmaktadır [18-19]. Bor ve bor katkılı ürünler, kauçuk ve plastik sanayiden nükleer uygulamalara kadar birçok alanda öne çıkmaktadır. Polimer alanında ise, bor partiküllerin matris malzeme içerisine eklenmesiyle, kompozit malzemelerin mekanik, termal ve fiziksel özelliklerinde önemli iyileşmelerin sağlandığı görülmüştür [20-27].

Gültekin vd. [24] tarafından yapılan bir çalışmada, silan bileşiği ile fonksiyonelleştirilmiş BN nanopartikülleri katkılı yapısal yapıştırıcıların yapısal, termal ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Yapıştırıcı içerisine ağırlıkça %3 oranında BN nanopartikülleri katılmasıyla çekme dayanımı, elastisite modülü ve statik tokluk değerlerinin sırasıyla %48, %49 ve %87 oranında arttığı ifade edilmiştir. Ayrıca, BN nanopartiküllerinin silan bileşiği ile modifiye edilmesi sonucu, partiküllerin epoksi içerisinde homojen dağıldığı ve epoksi ile arayüz etkileşiminin arttığı ifade edilmiştir. Benzer şekilde, Yan vd. [25] tarafından yapılan bir çalışmada da, BN katkısıyla epoksi polimerlerin mekanik ve termal özelliklerinin arttığını ifade etmişlerdir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde epoksi matris içerisine katkı malzemesi olarak B_4C kullanıldığı sınırlı çalışmanın olduğu görülmektedir. Gültekin vd. [26], modifiye edilmiş hegzagonal B_4C nanopartikülleri katkılı epoksi kompozitlerin yapısal, termal ve mekanik özelliklerini incelediği çalışmada, ağırlıkça %2 katkı oranının optimum değer olduğunu belirlemişlerdir. Optimum katkı değerinde, nanokompozitlerin camsı geçiş sıcaklığının, termal kararlılığının, depolama modülünün, çekme dayanımı ve elastisite modülünün arttığını belirtmişlerdir. Wang vd. [27], epoksi kaplama ile B_4C nanopartikül arasındaki arayüz etkileşimi artırmak ve nanopartiküllerin homojen dağılmasını sağlamak için B_4C nanopartiküllerinin yüzeyini silan bileşiği ile modifiye etmişlerdir. B_4C nanopartiküllerinin silan bileşiği ile

modifikasyon sonucunda kimyasal etkileşimin arttığını ve epoksi reçinenin antikorozyf performansını geliştirdiğini ifade etmişlerdir.

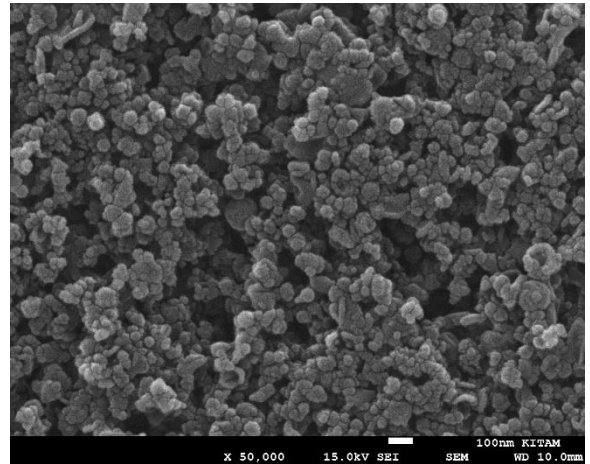
Yapılan bu çalışmada, nano boyutta hegzagonal B_4C partiküllerinin epoksi yapısal yapıştırıcıların mekanik özelliklerine olan etkisi ve nanopartiküllerin silan bileşiği ile modifikasyonun önemi incelenmiştir. Bu amaçla, h- B_4C nanopartiküllerinin yüzeyi 3-(glycidyoxypropyl) trimethoxysilane bileşiği (GPS) kullanılarak modifiye edilmiştir. Modifiye edilmiş ve modifiye edilmemiş B_4C nanopartikülleri, çift bileşenli yapısal yapıştırıcı Araldite 2011 içerisine ağırlıkça %1, %2 ve %3 oranlarında eklenerek yeni nesil nano yapıştırıcılar üretilmiştir. Üretilen yapıştırıcıların mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla ISO 527-1 [28] standardına göre çekme ve ASTM D4065 [29] standardına göre de dinamik mekanik analiz (DMA) testleri yapılmıştır. Yapılan testler sonucunda ise, modifiye edilmiş ve modifiye edilmemiş B_4C nanopartiküllerinin epoksi yapısal yapıştırıcının mekanik özelliklerine olan etkisi, çekme dayanımı, elastisite modülü, statik tokluk değeri, depolama modülü (storage modulus), camsı geçiş sıcaklığı ve çapraz bağ yoğunluğu değerleri belirlenmiş, birbiriyle kıyaslanarak değerlendirilmiş ve modifikasyon işleminin önemi ortaya konulmuştur.

2 Materyal ve metod

2.1 Materyal

Bu çalışmada, yapıştırıcı olarak çift bileşenli yapısal epoksi Araldite 2011 (Hunstman Corp, USA) yapıştırıcısı kullanılmıştır. Araldite 2011 yüksek mukavemet ve tokluğa sahip olup çeşitli metalleri, seramikleri, camları, kauçukları, sert plastikleri ve diğer birçok malzemeyi yapıştırmak için uygundur. Araldite 2011 epoksi yapısal yapıştırıcısı, ağırlıkça 1:0,8 oranında epoksi:sertleştiriciden oluşmakta ve 60 °C'de 75 dakika süre ile kürleşmektedir.

Nanopartikül olarak ise, %99,5 saflık, 0,1 g/cm³ yoğunlukta, 40-60 nm partikül boyutunda hegzagonal bor karbür (B_4C) nanopartikülü kullanılmıştır. Kullanılan bor karbür nanopartikülü Nanografi A.Ş. (Türkiye) firmasından temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan B_4C nanopartikülünün SEM görüntüsü Şekil 1'de, elementel analizi ise Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. B_4C nanopartikülünün SEM görüntüsü

Tablo 1. B₄C nanopartikülünün % elementel analizi [26]

B	C	O	N	Si	Fe	Ni
77.48	21.52	<0.1	0.08	0.1	0.1	0.01

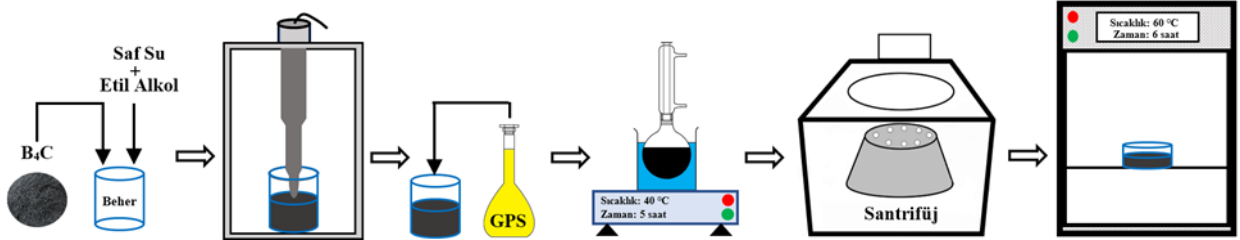
B₄C nanopartiküllerinin epoksi matris içinde adhezyonunu artırmak ve homojen bir dağılım sağlamak amacıyla yapılan modifikasyon işleminde kullanılan 3-(glycidyoxypropyl) trimethoxysilane (GPS) Evonik Industries'den (Türkiye) tedarik edilmiştir.

2.2 B₄C nanopartiküllerinin modifikasyonu

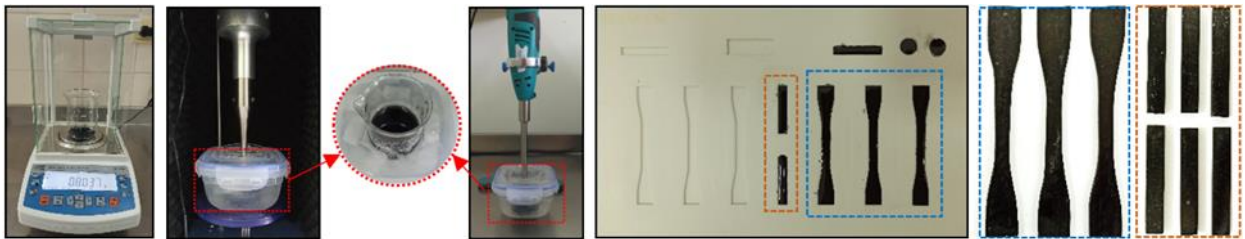
Silan bağlayıcı ajanlar inorganik nanopartiküllerin yüzeylerini modifiye etmek ve epoksi matris içerisindeki adezyonu arttırmak için sıklıkla kullanılmaktadır. Bu bağlayıcı bileşikler, nanopartikül ve epoksi reçine arasında kimyasal bir köprü oluşturarak gerilme aktarımını sağlar. Ayrıca, epoksi matris içerisindeki nanopartiküllerin homojen dağılmasını sağlar. Bu amaçla, B₄C nanopartikülleri 3-(glycidyoxypropyl) trimethoxysilane (GPS) bileşiği kullanılarak modifiye edilmiştir. Bu amaçla, modifikasyon işlemleri için aşağıdaki adımlar uygulanmıştır [26].

- 0.5 g B₄C nanopartikülü, 50 ml saf su/etanol çözeltisi (1:1) içerisinde 30 dakika boyunca ultrasonik karıştırıcıda karıştırılmıştır.
- B₄C nanopartiküllerinin eksfoliasyonu sağlandıktan sonra, B₄C+saf su/etanol karışımı üzerine 6 ml silan bileşiği ilave edilmiştir.
- Çözeltinin pH değerini 7 olarak ayarlamak için gerekli miktarda hacimce %10'luk CH₃COOH çözeltisi ilave edilmiştir.
- Çözelti bir balon içerisine alınarak, manyetik karıştırıcıda, 40 °C sıcaklıkta 5 saat boyunca karıştırılmıştır.
- Daha sonra, çözelti santrifüj yöntemiyle saf su ve etanol ile yıkanmıştır.
- Yıkama işleminin ardından, modifiye edilmiş nanopartiküller etüv içerisinde kurutulmuştur.

B₄C nanopartiküllerinin modifikasyon işlemi şematik olarak Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. B₄C nanopartiküllerinin modifikasyonu işlemi



Şekil 3. B₄C nanopartikülleri katkılı yapıştırıcıların üretilmesi

2.3 B₄C nanopartikülleri katkılı ve katkısız yapıştırıcıların üretimi

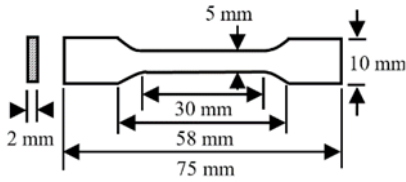
Modifiye edilmiş ve modifiye edilmemiş B₄C katkılı yapısal yapıştırıcılar aşağıdaki adımlar izlenerek hazırlanmıştır [26].

- İlk olarak beher içerisine yapılması planlanan miktarda B₄C nanopartikülü hassas terazide tartılarak eklenmiştir.
- B₄C nanopartiküllerinin birbiri üzerinden ayrılmasını (eksfoliasyon) sağlamak için, nanopartikülleri üzerine aseton eklenerek, ultrasonik karıştırıcıda 15 dakika süre ile karıştırılmıştır.
- Daha sonra, yapılması planlanan epoksi, B₄C+aseton karışımı üzerine eklenmiş ve sırasıyla ultrasonik karıştırıcıda ve yüksek kayma mikserinde 30 dakika süre boyunca karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi sırasında meydana gelen ısının, epoksi ve B₄C nanopartikülü yapısına zarar vermemesi için, karıştırma işlemi buz banyosu içerisinde yapılmıştır.
- Karıştırma işleminden sonra, karışım içerisindeki asetonun buharlaşmasını sağlamak için karışım içerisinde aseton tamamen buharlaşmaya kadar bekletilmiştir. Asetonun tamamen uçup uçmadığı, hassas terazi kullanılarak, ağırlık kontrolü ile yapılmıştır.
- Karışım içerisindeki aseton tamamen buharlaştıktan sonra, B₄C+epoksi karışımına sertleştirici eklenerek 10 dakika süre ile el ile karıştırılmıştır.

B₄C nanopartikülleri katkılı yapıştırıcıların üretilmesi aşaması Şekil 3'te gösterilmiştir.

Katkısız yapıştırıcı üretiminde ise, yapılması planlanan epoksi üzerine aseton eklenerek ultrasonik karıştırıcıda 30 dakika süre ile karıştırıldıktan sonra karışım içerisindeki aseton benzer şekilde buharlaştırılmış ve üzerine sertleştirici eklenerek 10 dakika süre boyunca elde karıştırılmıştır.

B₄C nanopartikül katkılı epoksi yapısal yapıştırıcılar hazırlandıktan sonra deney numunelerinin üretimi aşamasına geçilmiştir. Bu amaçla, özel olarak silikondan tasarlanan bir kalıp kullanılmıştır (Şekil 3). Kalıp üzerine ilk önce kalıp ayırıcı sürülerek, kürleşme işlemi sonrası numunelerin kolayca çıkması sağlanmıştır. Daha sonra üretilen nanopartikül katkılı yapısal yapıştırıcılar kalıp üzerindeki ilgili kısımlara dökülmüştür. Kalıp etüv içerisinde 60 °C’de 75 dakika bekletilerek kürleşme işlemi sağlanmıştır. Kürleşme işlemi sonrasında, numuneler oda sıcaklığında soğumaya bırakılmış ve deneyler yapılmaya kadar desikatör içerisinde muhafaza edilmiştir. Çekme testi için ISO527-2 [30] standardında belirtilen ölçülerde numuneler üretilmiştir. Dinamik mekanik analiz (DMA) için ise, 30×5×2 mm boyutlarında numuneler üretilmiştir. Çekme testi numunesinin boyutları şematik olarak Şekil 4’te, DMA numunelerinin boyutları ise Şekil 6’da verilmiştir. Her bir numuneden 3 adet üretilmiş ve test edilmiştir. Deneysel parametreler Tablo 2’de gösterildiği gibidir. Katkısız numuneye ait DMA analiz sonuçları Gültekin vd. [24], tarafından yapılan çalışmadan alınarak kullanılmıştır.



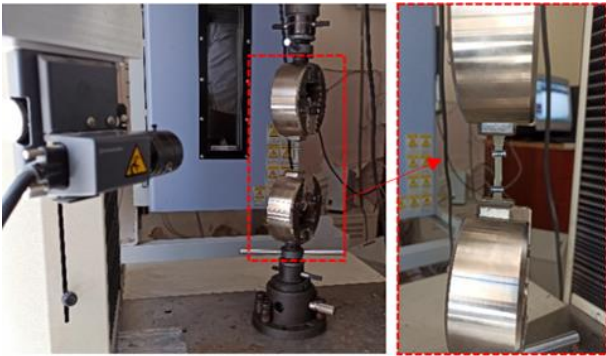
Şekil 4. Deney numunelerinin boyutları

Tablo 2. Deneysel parametreler

Nanopartiküller		% Katkı Oranı
Modifiye B ₄ C	Saf B ₄ C	
M-BC-%1	BC-%1	1
M-BC-%2	BC-%2	2
M-BC-%3	BC-%3	3

2.4 B₄C nanopartikülleri katkılı yapıştırıcıların çekme testi

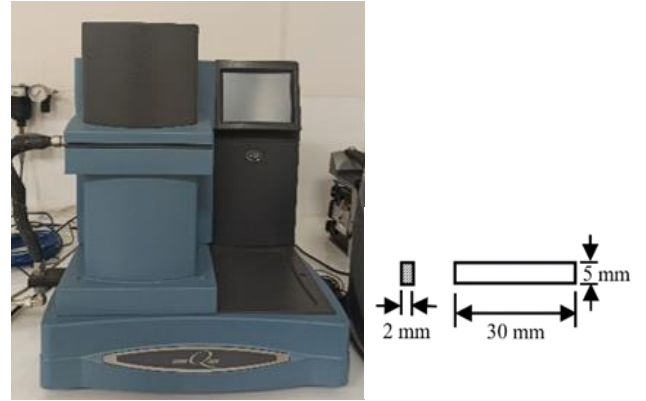
Üretilen B₄C nanopartikülleri katkılı bulk çekme numunelerinin kuvvet aralığı düşük olduğu için tüm testler 10 kN’luk yük hücreğine sahip Shimadzu AG Üniversal Çekme Cihazı kullanılarak yapılmıştır. Şekil değişimlerinin doğru olarak belirlenmesi için TRviewX video ekstansometre kullanılmıştır. Tüm testler oda sıcaklığında, 10 mm/dk çekme hızında yapılmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. Çekme testi

2.5 B₄C nanopartikülleri katkılı yapıştırıcıların DMA analizi

DMA, malzemelerin üzerine belirli bir frekansta yük uygulanarak, malzemelerin viskoelastik özelliklerinin belirlendiği analiz yöntemidir. DMA yöntemi ile malzemelerin depolama modülü, kayıp modülü ve camı geçiş sıcaklığı (T_g) gibi özellikleri belirlenmektedir. B₄C katkılı numunelerin DMA analizleri, tek konsol (single cantilever) modu kullanılarak DMA Q800-TA cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 6). Numunelerin DMA analizi, salınım genliği 1 Hz, sıcaklık ise 25 °C’den 150 °C’ye 2 °C/dk’lık ısıtma hızında yapılmıştır.

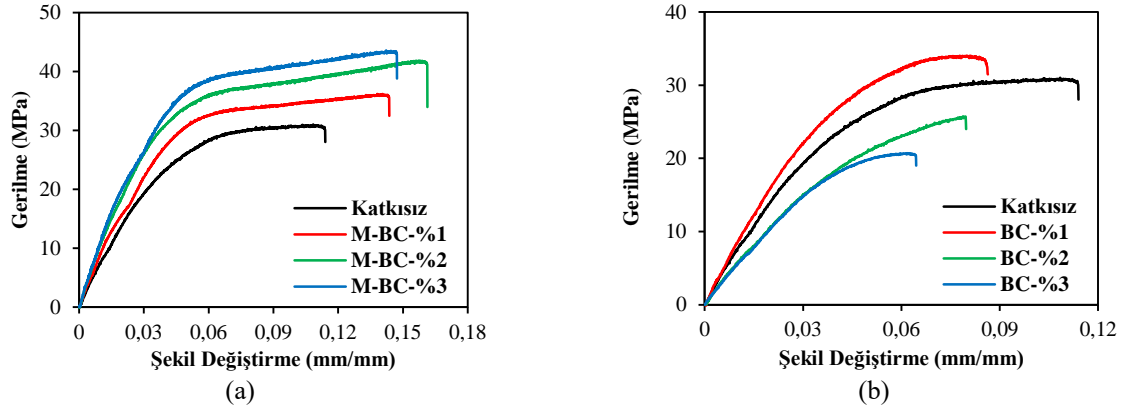


Şekil 6. DMA Q800-TA cihazı ve numune boyutları

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Çekme testi sonuçları

Silan bileşiği ile modifiye edilmiş ve modifiye edilmemiş B₄C katkılı çift bileşenli epoksi yapısal yapıştırıcıların bulk numunelerinin sergiledikleri gerilme-şekil değiştirme davranışlarını kıyaslamak için numuneler hasar gerçekleşinceye kadar yüklenmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen kuvvet-uzama eğrilerinden hesaplanan gerilme-şekil değiştirme eğrileri kullanılarak, yapıştırıcıların çekme dayanımı, elastisite modülü, maksimum şekil değiştirme ve statik tokluk değerleri belirlenmiştir. Yapıştırıcıların elastisite modülü, gerilme-şekil değiştirme eğrilerinde %0,05 ile %0,25 şekil değiştirme değerleri arasındaki eğim kullanılarak hesaplanmıştır. Statik tokluk değerleri ise gerilme-şekil değiştirme eğrileri altında kalan alan kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 7(a)’da modifiye edilmiş B₄C katkılı ve katkısız yapısal yapıştırıcıların gerilme-şekil değiştirme eğrisi verilmiştir. Şekil 7(a)’da verilen eğriler incelendiğinde epoksi yapıştırıcı içerisine modifiye edilmiş B₄C nanopartikülleri katkısının, yapıştırıcıların mekanik özelliklerinde büyük oranda iyileşmeler sağladığı görülmektedir. Modifiye edilmemiş B₄C katkılı yapıştırıcıların gerilme-şekil değiştirme eğrileri ise Şekil 7(b)’de gösterildiği gibidir. Grafik incelendiğinde, B₄C nanopartikül katkısıyla, yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin %1 katkı oranında iyileştiği, diğer katkı oranlarında ise yapıştırıcı üzerinde olumsuz etki yarattığı görülmektedir. Katkılı ve katkısız yapıştırıcıların gerilme-şekil değiştirme eğrilerinden elde edilen mekanik özellikler Tablo 3’te verilmiştir.



Şekil 7. Yapıştırıcıların gerilme-şekil değiştirme eğrileri (a) modifiye edilmiş B₄C katkı, (b) modifiye edilmemiş B₄C katkı

Tablo 3. Katkısız ve B₄C katkıli yapıştırıcıların çekme testi sonuçları

Numune	Çekme Gerilmesi (MPa)	Şekil Değişirme (mm/mm)	Elastisite Modülü (MPa)	Statik Tokluk (MPa)
Katkısız	31.05	0.114	1015	2.67
M-BC-%1	36.20	0.143	1125	4.09
M-BC-%2	41.86	0.161	1396	5.31
M-BC-%3	43.35	0.147	1497	5.07
BC-%1	34.05	0.086	1105	2.07
BC-%2	25.73	0.079	752	1.30
BC-%3	20.69	0.065	663	0.89

Tablo 3'te modifiye edilmiş B₄C katkıli yapıştırıcıların çekme gerilmesi değerleri incelendiğinde, katkı oranına bağlı olarak artış gerçekleştiği görülmektedir. Yapısal yapıştırıcı içerisine %1 oranında silan ile modifiye edilmiş B₄C nanopartikülü katkısıyla, yapıştırıcının çekme gerilmesi değeri, katkısız numuneye kıyasla yaklaşık %16 oranında artmıştır. Benzer şekilde %2 ve %3 oranında modifiye edilmiş B₄C nanopartikülü katkısıyla ise çekme gerilmesi sırasıyla yaklaşık %35 ve %40 oranında arttığı görülmektedir. Modifiye edilmiş B₄C katkıli yapısal yapıştırıcıların elastisite modülü sonuçları incelendiğinde ise, epoksi yapıştırıcı içerisine %1, %2 ve %3 oranında nanopartikül katkısıyla, elastisite modülü değerleri katkısız numuneye göre sırasıyla yaklaşık %11, %37 ve %47 oranında artış sergilemiştir. Şekil değiştirme ve statik tokluk değerlerinde de benzer bir trend söz konusudur. %1 oranında silan ile modifiye edilmiş B₄C nanopartikül katkısıyla, yapıştırıcıların şekil değiştirme ve statik tokluk değerleri sırasıyla yaklaşık %25 ve %53 oranlarında arttığı görülmektedir. %2 oranında B₄C nanopartikül katkısıyla da şekil değiştirme ve statik tokluk değerleri sırasıyla yaklaşık %41 ve %98 oranında artarken, %3 katkı oranında ise %29 ve %89 oranında artış göstermiştir.

Tablo 3 ve Şekil 7(b)'de verilen modifiye edilmemiş B₄C katkıli yapısal yapıştırıcıların çekme testi sonucunda elde edilen mekanik özellikleri (çekme gerilmesi ve elastisite modülü) incelendiğinde %1 katkı oranında artış olduğu görülürken, %2 ve %3 katkı oranlarında ise azalma olduğu görülmektedir. %1 oranında modifiye edilmemiş B₄C nanopartikül katkısıyla üretilen yapıştırıcıların çekme gerilmesi ve elastisite modülü değerleri katkısız yapıştırıcıya

kıyasla sırasıyla yaklaşık %10 ve %9 oranında artmıştır. %2 ve %3 oranlarında B₄C nanopartikül katkısıyla çekme gerilmesi %17 ve %33 oranların azalırken, elastisite modülü değerleri ise sırasıyla yaklaşık %26 ve %35 oranlarında azaldığı görülmektedir. Katkısız numuneye kıyasla, %1, %2 ve %3 oranlarında B₄C katkısıyla üretilen yapıştırıcıların şekil değiştirme değerleri karşılaştırılırsa sırasıyla %24, %30 ve %43 oranlarında azaldığı görülmektedir. Benzer azalış trendi statik tokluk değerlerinde de görülmektedir. Statik tokluk değerleri, %1 katkı oranında yaklaşık %22 oranında azalırken, %2 ve %3 oranlarında ise sırasıyla yaklaşık %51 ve %66 oranında azaldığı görülmektedir.

Nanopartikül katkıli yapıştırıcıların en iyi mekanik performansı, epoksi reçinesinde nanopartiküllerinin homojen şekilde dağılmasıyla elde edilebilir. Yapıştırıcı içerisine B₄C nanopartikülleri katkısıyla üretilen yapısal yapıştırıcılarda, modifikasyon işlemi neticesinde, nanopartiküller homojen bir şekilde dağılmaktadır. Nanopartiküllerin homojen bir şekilde dağılmasıyla, epoksi ve nanopartiküller arasındaki etkileşim artmakta ve bu durum yük transferinin gerçekleşmesine sebep olmaktadır. Silan bağlayıcı bileşikler nanopartiküllerin yüzeylerini modifiye etmek ve epoksi matris içerisindeki adezyonu arttırmak için sıklıkla kullanılmaktadır. Bu bağlayıcı bileşikler, nanopartikül ve epoksi reçine arasında kimyasal bir köprü oluşturarak gerilme aktarımını sağlamaktadırlar. B₄C nanopartiküllerinin 3-(glycidyoxypropyl) trimethoxysilane bileşiği ile yüzey modifikasyonu neticesinde, epoksi içerisinde B₄C nanopartikülleri homojen şekilde dağılmakta ve ıslanabilirliği artmaktadır [26-27]. Bahsedilen bu durum mekanik özelliklerin artışının sebebi

olarak açıklanabilir. Silan ile modifiye edilmiş B₄C katkıları ile epoksi reçine içerisinde homojen dağılım elde edilmiş ve yapısal yapıştırıcıların mekanik özellikleri nanopartikül ve epoksi matrisi arasındaki yük aktarımı nedeniyle önemli ölçüde artmıştır.

Modifiye edilmemiş B₄C katkıları ile epoksi matrisi arasında yeterince etkileşim olmamakta ve nanopartiküller toplanmaktadır. Yapıştırıcı içerisinde toplanan nanopartiküller gerilme yığılması oluşturarak mekanik özelliklerin azalmasına sebep olmaktadır. Yapıştırıcı içerisindeki nanopartikül katkı oranı arttıkça epoksinin viskozitesi artmakta ve epoksi ile nanopartiküller arasında etkileşim azalmaktadır. Ağırlıkça %1 oranında modifiye edilmemiş B₄C katkılarıyla üretilen yapıştırıcının mekanik özellikleri kısmen artarken, artan katkı oranlarında ise (%2 ve %3) viskozite değerinin artmasıyla nanopartiküllerin epoksi içerisinde ıslanabilirliği ve etkileşimi azalmış ve bu durum gerilme yığılması oluşturarak nanopartikül/epoksi arasında yük transferine engel olarak mekanik özelliklerin azalmasına sebep olmuştur.

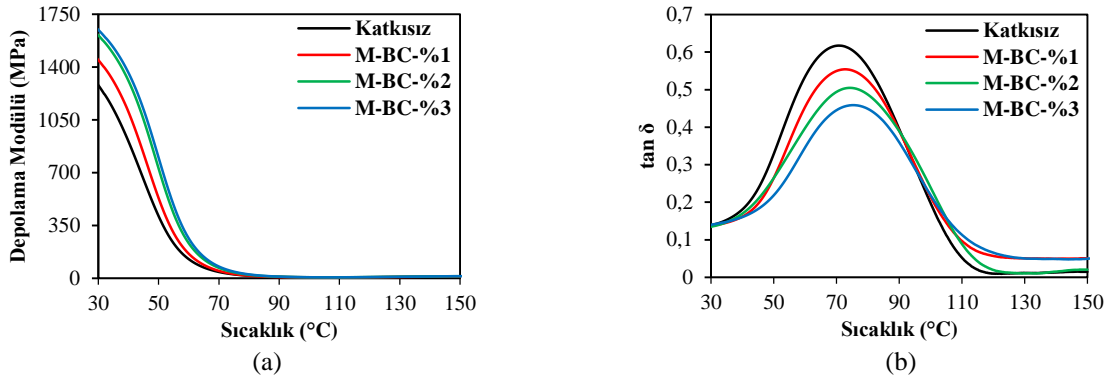
3.2 DMA sonuçları

Yapıştırıcıların viskoelastik özelliklerinin belirlenmesi için kullanılan termal analiz metodlarından biri dinamik mekanik analizdir (DMA). Silan bileşiği ile modifiye edilmiş B₄C nanopartikülleri katkıları yapısal yapıştırıcılara ait DMA grafikleri (depolama modülü/sıcaklık ve tan δ -sıcaklık) Şekil

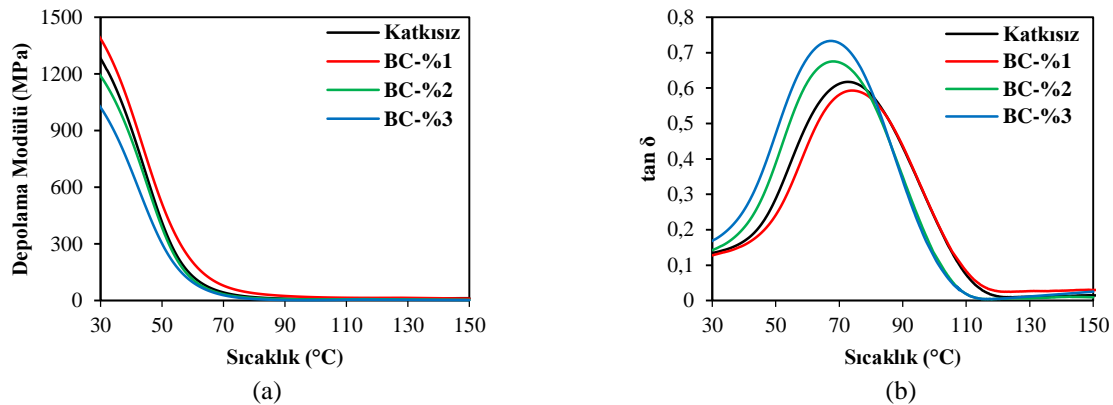
8'de, modifiye edilmemiş B₄C nanopartikülleri katkıları yapııştırıcıların DMA grafikleri ise Şekil 9'de verilmiştir. DMA analizi sonucunda yapııştırıcıların depolama modülü (E'), camlı geçiş sıcaklıkları (T_g) ve çapraz bağ yoğunlukları (ν) belirlenmiş ve Tablo 4'te verilmiştir. Depolama modülü değerleri, depolama modülü-sıcaklık eğrilerinde 30°C sıcaklık değerine karşılık gelen değer olarak belirlenmiştir. Camlı geçiş sıcaklığı ise, tan δ -sıcaklık eğrilerinin maksimum tepe noktası değerine karşılık gelen sıcaklık olarak belirlenmiştir.

Şekil 8, Şekil 9 ve Tablo 4'te verilen DMA sonuçları incelendiğinde, yapııştırıcıların depolama modülü (E'), camlı geçiş sıcaklığı (T_g) ve çapraz bağ yoğunluklarının B₄C nanopartiküllerinin katkı oranı ve modifikasyon yapıldı yapılmamasına bağlı olarak değiştiği görülmektedir.

Şekil 8(a) ve Tablo 4'te verilen silan ile modifiye edilmiş B₄C nanopartikülleri katkıları yapııştırıcıların 30 °C'deki depolama modülü (E') değerleri incelenirse, katkı oranının artmasıyla depolama modülü değerlerinin arttığı görülmektedir. %1 oranında modifiye edilmiş B₄C nanopartikülü katkılarıyla depolama modülü değeri yaklaşık %12 oranında artarken, %2 ve %3 katkı oranlarında ise sırasıyla %23 ve %27 oranlarında artmıştır. Şekil 8(a)'da verilen DMA grafiği incelenirse, artan sıcaklık değeri ile birlikte depolama modülü değerlerinin azaldığı görülmektedir.



Şekil 8. Modifiye edilmiş B₄C nanopartikülleri katkıları yapııştırıcıların DMA sonuçları (a) depolama modülü (b) tan δ [24]



Şekil 9. Modifiye edilmemiş B₄C nanopartikülleri katkıları yapııştırıcıların DMA sonuçları (a) depolama modülü (b) tan δ [24]

Tablo 4. DMA sonuçları [24]

Numune	Depolama Modülü (E') (MPa)	Camsı Geçiş Sıcaklığı (T _g) (°C)	E _{min} (MPa)	Çapraz Bağ Yoğunluğu (v) (mol/m ³)
Katkısız	1260	70.66	4.71	549.25
M-BC-%1	1415	72.63	6.13	710.77
M-BC-%2	1548	73.96	8.53	985.25
M-BC-%3	1604	74.63	9.82	1132.07
BC-%1	1375	71.97	5.96	690.38
BC-%2	1188	67.97	4.86	571.21
BC-%3	1024	66.89	3.96	466.91

Sıcaklık değeri arttıkça, yapıştırıcıların viskoz özellikleri artmakta ve elastik özellikleri azalmaktadır [31-32]. Böylece, elastik özelliklerin göstergesi olan depolama modülü sıcaklık artışıyla azalma eğilimi göstermektedir. DMA analizinde, tan δ eğrisindeki tepe noktası camsı geçiş sıcaklığını vermektedir. Modifiye edilmiş B₄C katkılı yapıştırıcıların camsı geçiş sıcaklık değerleri katkısız numune ile kıyaslandığında, artan katkı oranı ile birlikte artış sergilediği görülmektedir. %1 katkı oranında camsı geçiş sıcaklığı 72.63 °C, %2 katkı oranında 73.96 °C ve %3 katkı oranında ise 74.63 °C olarak belirlenmiştir. Yapıştırıcı içerisindeki boşluklara yerleşen nanopartiküllerin, polimer zincir hareketlerini kısıtlayarak daha kararlı yapı oluşturduğu ve bu durumda T_g değerlerinin artmasına sebep olduğu söylenebilir.

Çapraz bağlanma, polimerizasyon reaksiyonu sırasında kovalent bağlar ile molekül zincirleri oluşturarak meydana gelmektedir. Çapraz bağlanma noktalarının sayısı arttıkça, polimer zincirlerin hareketliliği azalmakta ve T_g artmaktadır.

Yapıştırıcıların çapraz bağ yoğunlukları, Denklem (1)'e göre hesaplanmıştır.

$$v = \frac{E'}{3RT_g} \quad (1)$$

Bu denklem, kauçuk elastisite teorisi denklemini olarak bilinmektedir. Denklemdaki E', pastik plato bölgesindeki depolama modülüdür ve T_g değerinin yaklaşık 30 °C üzerinde belirlenmiştir. R ise gaz sabitidir (8.314 J / mol.K). Tablo 4'te verilen modifiye edilmiş B₄C katkılı yapıştırıcıların çapraz bağ yoğunluğu değerleri incelendiğinde, katkısız numuneye kıyasla tüm numunelerde arttığı görülmektedir.

Yapıştırıcı içerisine silan ile modifiye edilmiş B₄C nanopartikülleri katkısıyla, nanopartiküller matris içerisinde homojen bir şekilde dağılmaktadır. Bu durum, moleküllerin hareketinin serbestliğinin kısıtlanmasına sebep olarak depolama modülü, camsı geçiş sıcaklığı ve çapraz bağ yoğunluklarının artmasına sebep olmaktadır. Ayrıca, tan δ grafiklerinde pik şiddetlerinin azalması, molekül hareketinin kısıtlandığına işaret etmektedir. Şekil 8(b)'de verilen tan δ eğrileri incelendiğinde, artan katkı oranı ile birlikte pik şiddetlerinin azaldığı görülmektedir. Söz konusu bu durum, yapıştırıcı içerisine modifiye edilmiş B₄C nanopartikülleri katkısıyla, moleküller zincir hareketliliğinin azaldığının bir göstergesidir. Elde edilen tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, katkısız yapıştırıcıya kıyasla modifiye edilmiş B₄C nanopartikülleri ile güçlendirilmiş yapıştırıcıların depolama modülü, camsı geçiş sıcaklığı ve

çapraz bağ yoğunluğu değeri üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Yapıştırıcı içerisine B₄C nanopartiküllerinin katkılanması sonucunda, enerjinin polimer matrisin dışına yayılmasına izin verilecek yollar kısıtlanarak polimerde depolanan enerji miktarı artmıştır. Bu durum da, artışın ana nedenleri arasında kabul edilebilir.

Ayrıca, çapraz bağ yoğunluğunun artması yapıştırıcıların mekanik özellikleri üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Şekil 8 ve Tablo 4'te verilen DMA sonuçları ile Şekil 7(a) ve Tablo 3'te verilen çekme testi sonuçları birlikte değerlendirildiğinde sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Modifiye edilmiş B₄C katkısıyla polimer zincirlerinin segmental hareketlerinin kısıtlanması nedeniyle çapraz bağ yoğunluğunun artması, yapıştırıcıların hem gerilme hem de elastisite modülü değerinde doğrusal bir artışa neden olduğu söylenebilir [24,26].

Modifiye edilmemiş B₄C katkılı yapıştırıcıların Şekil 9 ve Tablo 4'te verilen DMA analiz sonuçları incelendiğinde, yapıştırıcı içerisine %1 oranında B₄C katkısının viskoelastik özellikler üzerinde olumlu etki yarattığı görülürken, artan katkı oranında (%2 ve %3) ise olumsuz etkiye sebep olduğu görülmektedir. Depolama modülü, camsı geçiş sıcaklığı ve çapraz bağ yoğunluğu %1 B₄C katkı oranında sırasıyla yaklaşık %9, %2 ve %25 oranlarında arttığı görülmektedir. Yapıştırıcı içerisine %2 ve %3 oranlarında modifiye edilmemiş B₄C nanopartikülleri katkısıyla ise, depolama modülü değerleri sırasıyla yaklaşık %6 ve %19 oranlarında azalırken, camsı geçiş sıcaklık değerleri ise %4 ve %5 oranlarında azalmıştır. %1 katkı oranında, nanopartiküllerin yapıştırıcı içerisinde kısmen homojen dağıldığı, artan katkı oranlarında ise etkileşimin azalarak topaklanmaların (aglomerasyon) olduğu düşünülmektedir. Oluşan bu topaklanmalar, yapıştırıcıların viskoelastik özellikleri üzerine olumsuz bir etki yaratmaktadır. Bu topaklanmalar epoksi matris içerisinde ısının iletim yollarını değiştirerek kürleşme davranışlarına ve buna bağlı olarak mekanik davranışlarına etki etmektedir [24]. DMA analizi, belirli boyutlara sahip polimer numuneler üzerine küçük bir gerilim döngüsünün uygulandığı bir yöntemdir. Bu analiz yöntemiyle, polimer malzemelerin sıcaklığa, frekansa ve gerilime karşı gösterdiği tepkiler belirlenmektedir. Depolama modülü, camsı geçiş sıcaklığı ve çapraz bağ yoğunluğu değerlerinin azalmasının sebebinin, yapıştırıcı içerisine, homojen olarak dağılmayan nanopartiküllerden dolayı olduğu ifade edilebilir. Ayrıca, Şekil 7(b) ve Tablo 3'te çekme testine ait sonuçlar, Şekil 9 ve Tablo 4'te verilen DMA analizine ait sonuçlarla birlikte değerlendirildiğinde, sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Ayrıca, sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, çalışmanın amacını

oluşturan nanopartiküllerin silan ile modifiye edilmesinin mekanik özelliklere etkisi açısından önemi açıkça ortaya konulmuştur.

4 Sonuçlar

Yapılan bu çalışmada, nano boyutta hegzagonal B₄C partikülleri üzerine uygulanan yüzey modifikasyonu işleminin yapısal yapıştırıcıların mekanik özelliklerine olan etkisi, modifiye edilmemiş B₄C nanopartikülleri ile karşılaştırılarak araştırılmıştır. Ayrıca, nanopartiküllerin yüzeyine yapılan modifikasyon işleminin önemi kıyaslanarak ortaya konulmuştur. Yapıştırıcıların mekanik özellikleri üzerine etkisini incelemek amacıyla, hegzagonal B₄C nanopartikülleri silan bileşiği ile modifiye edilmiş ve modifiye edilmemiş B₄C nanopartikülleri ile kıyaslanmıştır. Çekme testi ve DMA analizi ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde, B₄C nanopartiküllerinin yüzeyinin silan bileşiği ile modifiye edilmesi sonucunda, epoksi ile etkileşiminin artması ile birlikte yapıştırıcıların mekanik özelliklerini önemli miktarda arttırdığı görülmüştür. Modifiye edilmemiş B₄C nanopartikülleri katkılı yapıştırıcılarda ise, nanopartiküllerin yapıştırıcı içerisinde zayıf ıslatmadan kaynaklı topaklanması sonucunda, mekanik özellikler üzerine (%1 katkı oranı hariç) olumsuz etki yarattığı görülmüştür.

Yapıştırıcı içerisine %1, %2 ve %3 oranlarında modifiye edilmiş B₄C nanopartikülleri katkısıyla, çekme gerilmesi değerleri sırasıyla %16, %35 ve %40 oranlarında artarken, modifiye edilmemiş B₄C katkısında ise yalnızca %1 katkı oranında yaklaşık %10 oranında arttığı, diğer katkı oranlarında ise azalmanın gerçekleştiği görülmüştür. Benzer artış/azalış eğilimi, şekil değiştirme, elastisite modülü ve statik tokluk değerlerinde de belirlenmiştir.

Modifiye edilmiş ve modifiye edilmemiş B₄C nanopartikülleri katkılı yapıştırıcıların viskoelastik özelliklerinin belirlendiği DMA yönteminde de, benzer bulgular elde edilmiştir. Silan bileşiği ile yüzeyi modifiye edilmiş B₄C nanopartikülleri katkılı tüm yapıştırıcılarda, artan katkı oranı ile birlikte depolama modülü, camsı geçiş sıcaklığı ve çapraz bağ yoğunluğu değerlerinde artış görülürken, modifiye edilmemiş B₄C nanopartikülleri katkılı yapıştırıcılarda ise sadece %1 oranında iyileşmenin sağlandığı, diğer katkı oranlarında ise bahsedilen bu özelliklerin azaldığı belirlenmiştir.

Ayrıca, çekme testi ve DMA sonuçlarının birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 119M939 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %6

Kaynaklar

[1] F.L. Jin, X. Li and S.J. Park, Synthesis and application of epoxy resins: A review. Journal of Industrial and

Engineering Chemistry, 29, 1-11,2015. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.03.026>.

- [2] M.O.D. Reis, L.F.M. da Silva and R.J.C. Carbas, Mechanical characterization of a modern epoxy adhesive for automotive industry. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 41, 340, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40430-019-1844-2>.
- [3] Ş. Yazman, M. Uyaner F. Karabörk and A. Akdemir, Effects of nano reinforcing/matrix interaction on chemical, thermal and mechanical properties of epoxy nanocomposites. Journal of Composite Materials, 2021. <https://doi.org/10.1177/00219983211037059>.
- [4] A. Kumar, K. Sharma and A.R. Dixit, A review of the mechanical and thermal properties of graphene and its hybrid polymer nanocomposites for structural applications. Journal of Materials Science, 54, 5992–6026, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-03244-3>.
- [5] M.K. Shukla and K. Sharma, Effect of carbon nanofillers on the mechanical and interfacial properties of epoxy based nanocomposites: a review. Polymer Science, Series A, 61, 439-460, 2019. <https://doi.org/10.1134/S0965545X19040096>.
- [6] W. Hou, Y. Gao, J. Wang, D.J. Blackwood and S. Teo, Recent advances and future perspectives for graphene oxide reinforced epoxy resins. Materials Today Communications, 23, 100883, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2019.100883>.
- [7] L. Guadagno, M. Sarno, U. Vietri, M. Raimondo, C. Cirillo and P. Clambelli, Graphene-based structural adhesive to enhance adhesion performance. RSC Advances, 5, 27874–27886, 2015. <https://doi.org/10.1039/C5RA00819K>.
- [8] Z. Jia, X. Feng and Y. Zou, Graphene Reinforced Epoxy Adhesive For Fracture Resistance. Composites Part B: Engineering, 155, 457-462, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.09.093>.
- [9] H. Khoramshad and M. Khakzad, Toughening epoxy adhesives with multi-walled carbon nanotubes. The Journal of Adhesion, 94, 15-29, 2018. <https://doi.org/10.1080/00218464.2016.1224184>.
- [10] S.N. Surip and A.H. Ismail, A Comparative Study on the Mechanical Properties of Clay Modified Epoxy Adhesive by Using Different Clay Types. Key Engineering Materials, 780, 43-47, 2018. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.780.43>.
- [11] P.K. Guchhait, S. Pradhan and K.D. Kumar, Influence of Nanoclay on the Morphology, Adhesive and Mechanical Properties of Polysulfide Modified Epoxy Resin. Polymers and Polymer Composites, 18, 123-131, 2010. <https://doi.org/10.1177/096739111001800301>.
- [12] N.Z. Khalil, M.F. Johanne and M. Ishak, Influence of Al₂O₃ nanoreinforcement on the adhesion and thermomechanical properties for epoxy adhesive. Composites Part B: Engineering, 172, 9-15, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.05.007>.

- [13] A. Kausar, Fullerene Nanofiller Reinforced Epoxy Nanocomposites—Developments, Progress and Challenges. *Materials Research Innovations*, 25, 175-185, 2020. <https://doi.org/10.1080/14328917.2020.1748794>.
- [14] S. Han, Q. Meng, S. Araby, T. Liu and M. Demiral, Mechanical and electrical properties of graphene and carbon nanotubereinforced epoxy adhesives: Experimental and numerical analysis. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 120, 116-126, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.02.027>.
- [15] M.A. Rafiee, F. Yavari, J. Rafiee abd N. Koratkar, Fullerene-epoxy nanocomposites-enhanced mechanical properties at low nanofiller loading. *Journal of Nanoparticle Research*, 13, 733-737, 2011. <https://doi.org/10.1007/s11051-010-0073-5>.
- [16] D. Bazrgari, F. Moztarzadeh, A.S. Sabbagh-Alvani, M. Rasoulianboroujeni, M. Tahriri and L. Tayebi, Mechanical properties and tribological performance of epoxy/Al₂O₃nanocomposite. *Ceramics International*, 44, 1220-1224, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.10.068>.
- [17] I.A. Akpınar, K. Gültekin, S. Akpınar, A. Gürses and A. Özel, An experimental study on composite adhesives reinforced with different types of organoclays. *The Journal of Adhesion*, 94 124-142, 2018. <https://doi.org/10.1080/00218464.2016.1255606>.
- [18] W. Meng, Y. Huang, Y. Fu, Z. Wang, and C. Zhi, Polymer composites of boron nitride nanotubes and nanosheets. *Journal of Materials Chemistry C*, 2(47), 10049–10061, 2014. <https://doi.org/10.1039/c4tc01998a>.
- [19] D. Gosset, Basic properties of boron carbide. *Comprehensive Nuclear Materials*, 7, 539–553, 2020. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.11638-8>.
- [20] H. Hemmatian, M. R. Zamani, J.E. Jam, Investigation of crack resistance in epoxy/boron nitride nanotube nanocomposites based on multi-scale method. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics (Poland)*, 57(1), 207–219, 2019. <https://doi.org/10.15632/jtam-pl.57.1.207>.
- [21] G. Navaneethkrishnan, T. Karthikeyan, S. Saravanan and V. Selvam, V, Influence of boron nitride on morphological, mechanical, thermal and wear characteristics of epoxy nanocomposites. *Materials Research Innovations*, 24(5), 257–262, 2020. <https://doi.org/10.1080/14328917.2019.1641346>.
- [22] S. Bhatia, S. Angra, and S. Khan, A review on mechanical and tribological characterization of boron carbide reinforced epoxy composite. *Advanced Composite Materials*, 30, 307-337, 2021. <https://doi.org/10.1080/09243046.2020.1759482>.
- [23] S. Durairaj, P. Chandramohan, R. Rajesh, Evaluation of mechanical properties of B₄C filled glass-epoxy composites. *International Journal of ChemTech Research*, 8, 1997–1981, 2015.
- [24] K. Gültekin, G. Uğuz and A. Özel, Improvements of the structural, thermal, and mechanical properties of structural adhesive with functionalized boron nitride nanoparticles. *Journal of Applied Polymer Science*, 138, 50491, 2021. <https://doi.org/10.1002/app.50491>.
- [25] H. Yan, Y. Tang, J. Su, and X. Yang, Enhanced thermal-mechanical properties of polymer composites with hybrid boron nitride nanofillers. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 114(2), 331–337, 2014. <https://doi.org/10.1007/s00339-013-8149-6>.
- [26] K. Gültekin, G. Uğuz, Y. Topcu and A. Özel, Structural , thermal and mechanical properties of silanized boron carbide doped epoxy nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, 138, 51244, 2021. <https://doi.org/10.1002/app.51244>.
- [27] J. Wang, Y. He, Z. Xie, C. Chen, Q. Yang, C. Zhang, B. Wang, Y. Zhan, and T. Zhao, Functionalized boron carbide for enhancement of anticorrosion performance of epoxy resin. *Polymers for Advanced Technologies*, 29(2), 758–766, 2018. <https://doi.org/10.1002/pat.4181>.
- [28] TS EN ISO 527-1, Plastikler-Çekme özelliklerinin tayini-Bölüm 1: Genel prensipler. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2012.
- [29] ASTM D4065 – 20, Standard Practice for Plastics: Dynamic Mechanical Properties: Determination and Report of Procedures, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020. <https://doi.org/10.1520/D4065-20>.
- [30] TS EN ISO 527-2, Plastikler-Çekme özelliklerinin tayini-Bölüm 2: Kalıplama ve ekstrüzyon plastikleri için deney şartları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2012.
- [31] C.W. Macosko, *Rheology: Principles, measurements and applications*. Wiley-VCH, New York, 1994.
- [32] M.E. Brown, *Introduction thermal analysis: Techniques and applications*. Chapman and Hall, London, 1988.





Ram makinelerindeki hava akışının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile modellenmesi

Modeling of air flow in stenter machines by Computational Fluid Dynamics

Muhammet Tibet Sığircı¹ , Ahmet Erdoğan^{2,*} 

^{1,2} İnönü Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 44280, Malatya, Türkiye

¹ILSAN Tekstil Anonim Şirketi, 44900, Malatya, Türkiye

Özet

Bu çalışmada, bir tekstil fabrikasında aktif olarak kullanılan bir ram makinesindeki hava akışı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi ile modellenmiştir. Sayısal akış simülasyonları ANSYS Fluent paket programında gerçekleştirilmiştir. Akış rejimi daimi ve türbülanslı akıştır. Reynolds Ortalamalı Navier –Stokes (RANS) denklemleri Fluent’te çözdürülmüş, analizlerde Standart k-ε türbülans modeli seçilmiştir. Akış alanına ait hız verileri görsellerle sunulmuş ve akış verimliliğini etkileyen parametreler karşılaştırılmıştır. Analizler farklı düze geometrileri için gerçekleştirilmiştir. Geometri değişiklikleri düze açıklık oranı (B) ve düze açısı (α) değiştirilerek sağlanmıştır. Mevcut düze geometrisi ile farklı geometrilerin akış alanına ait hız değişkenleri üzerinden karşılaştırma yapılmıştır. Düze açıklık oranının %20-30 civarında ve düze açısının 0° (ki bu düzenin yatay konumda olduğu anlamına gelir) olmasının ram makinesinde daha verimli bir akış sağladığı sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Ram makinesi, Düze, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Hava akışı

1 Giriş

Tekstil sektörü, Türkiye’de üretim ve ihracat açısından 17.7 milyar dolarlık pay ile tüm sektörler arasında üçüncü sırada yer almaktadır [1]. Enerji ithalatı oranı ise ülkemizde tüm ithalat kalemleri içerisinde %22 gibi önemli bir paya sahiptir [2]. Tekstil sektöründe tüketilen enerji, sektördeki toplam maliyet içerisinde %6-14 aralığında bir orana tekabül etmektedir. Tüm sektörler göz önüne alındığında ise tekstil endüstrisinde tüketilen enerji %7.2 düzeyindedir. Tekstil endüstrisinde önemli miktarda su ve enerji tüketimi gerçekleşmektedir. Enerji kaynaklarına olan ihtiyaç her geçen gün arttığı için tekstil sektöründe tüketilen enerjiyi verimli kullanmak önemli bir konu haline gelmektedir. Tekstil alanında iplik, dokuma, örme, boyama, kurutma ve terbiye gibi birçok üretim süreci bulunmaktadır. Kurutma süreci bu süreçler arasında enerji sarfıyatı en yüksek olan süreçtir [3]. Tüm bu sebepler göz önünde bulundurulduğunda, tekstil sektöründe önemli bir yer tutan kurutma sürecinin iyileştirilmesi adına yapılacak çalışmalar hem enerji tüketimini azaltacak hem de ürün kalitesini

Abstract

In this study, air flow in a stenter machine, which is actively used in a textile factory, is modelled by the Computational Fluid Dynamics (CFD) method. Numerical simulations were performed in the ANSYS Fluent package program. Flow regime is steady state and turbulent flow. Reynolds Averaging Navier-Stokes (RANS) equations were solved and Standard k- ε turbulence model was selected in analyses. The velocity data of flow domain were presented with visuals and the parameters affecting the flow efficiency were compared. Numerical flow simulations were carried out for different nozzle geometries. Geometry changes were achieved by changing porosity of nozzle (B) and nozzle angle (α). Comparisons were made between the existing nozzle geometry and the velocity variables of the flow field of different geometries. It has been concluded that the porosity of nozzle is around 20-30% and the nozzle angle is 0°, which means nozzle is in the horizontal position, providing a more efficient flow in the stenter machine.

Keywords: Stenter machine, Nozzle, Computational Fluid Dynamics, Air flow

arttıracaktır. Tekstil fabrikalarında kumaşın kurutulması işlemi genel olarak iki aşamada gerçekleşmektedir. Mekanik yöntemlerin kullanıldığı ön kurutma aşamasında kumaşın bünyesindeki nemin tamamı kumaştan uzaklaştırılmamaktadır. Isı enerjisinin kullanıldığı ikinci kurutma aşamasında ise nemli ürün üzerindeki doğal nem kaybedilmeden yeterli ölçüde kurutma işlemi gerçekleştirilmektedir [4].

Ram makineleri, ısı enerjisi vasıtasıyla kumaş terbiye işleminin son aşamasında nemli kumaşı kurutmak için yaygın olarak kullanılır. Ram makineleri; nemli kumaşların, kenarlarından tutturucu elemanlar ile sabitlendiği ve hareketli zincirler vasıtasıyla hareket ettirildiği kurutma makineleridir. Nemli kumaşın bu hareketi esnasında kumaşın alt ve üst yüzeylerine her iki taraftan düzeler aracılığıyla sıcak hava jeti çarptırılır ve kumaşın kurutma işlemi gerçekleştirilir. Sıcak kurutma havası brülör yardımıyla doğalgaz yakılarak elde edilir (Şekil 1). Daha sonra elde edilen sıcak kurutma havası santrifüj fanlar aracılığıyla önce kanala sonra düze deliklerine yönlendirilir. Ram makinelerinde kurutma havasının ısıtılması ve havanın

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ahmet.erdogan@inonu.edu.tr (A. Erdoğan)
Geliş / Received: 21.06.2021 Kabul / Accepted: 01.11.2021 Yayınlanma / Published: 14.01.2022
doi: 10.28948/ngmuh.955437

fanlar vasıtasıyla kumaş üzerine yönlendirilmesi esnasında önemli miktarda enerji tüketimi gerçekleşmektedir. Kurutma süreci, makine içerisindeki kurutma havası akışı ile yakından ilgilidir. Düzeler aracılığıyla uygun akış yapısını elde etmek ram makinelerinin etkinliğini arttıracaktır. Literatürde ram makinelerinin enerji tüketimlerini, kurutma performanslarını ve ram makinesi içerisindeki kurutma havası akışının incelendiği çalışmalar mevcuttur. Juraeva vd. [5], bir ram makinesi içerisindeki düze enjektörlerindeki hava akışını ANSYS CFX yazılımını kullanarak modellemişlerdir. Düze kanal tipinin (düz-eğik), düze kanal yüksekliğinin (40 mm, 80 mm, 160 mm) ve düze delik geometrisinin (daire, elips, dörtgen ve beşgen) akışa etkisini incelemişlerdir. Düze üzerindeki her bir enjektörden geçen kütsel debileri karşılaştırmışlar ve sırasıyla 40 mm kanal yüksekliğinin, daire delik geometrisinin ve düz kanal tipinin daha iyi sonuçlar verdiğini ortaya koymuşlardır. Llanos vd. [6], bir ram makinesinin kurutma performansını belirlemek için üç farklı HAD simülasyonunu COMSOL yazılımında Standart k-ε türbülans modelini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Akış hacminde üniform olmayan türbülans yoğunluğunu ve en yüksek hızların enjektörlerin kenar kısımlarında olduğunu gözlemlemişlerdir.

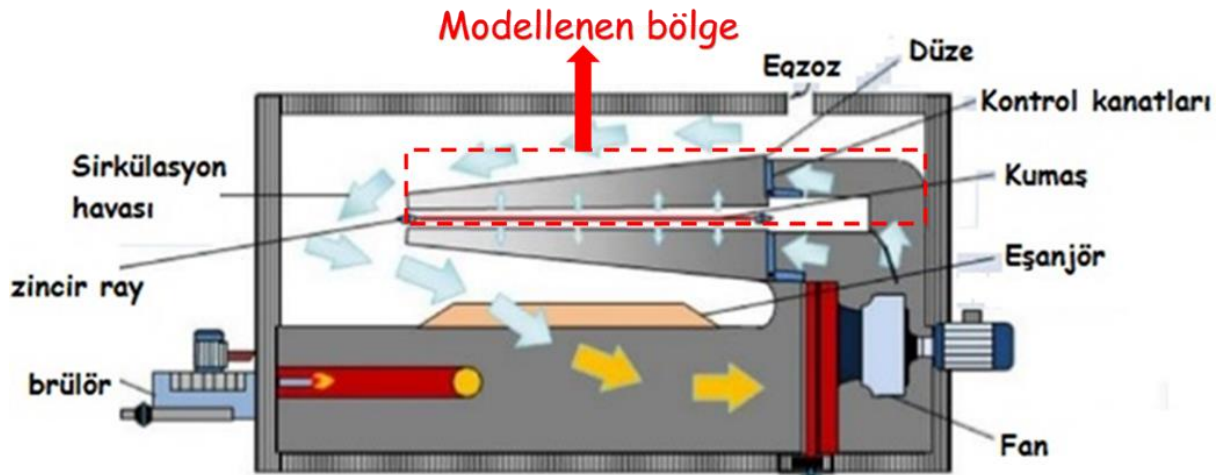
Baxi vd. [7], MATLAB SIMULINK yazılımını kullanarak farklı sektörlerde kullanılabilecek dönel kurutucular için kütle, nem ve ısı transferi denkliği için matematiksel model geliştirerek bir ram makinesinde modelin uygulanabilirliğini ortaya koymuşlardır. Patel vd. [8], iki farklı ram makinesi ve bantlı konveyör için enerji modelleme temeline dayanan bir kıyaslama çalışması

gerçekleştirmişlerdir. Performans göstergeleri olarak özgül enerji tüketimi ve enerji etkinlik katsayısı gibi parametreler belirlemişlerdir. Geliştirdikleri enerji modellemesi vasıtasıyla pamuk ve yün kumaşların kuruma ve taşınma proseslerinde ram makinelerinin ve bantlı konveyörlerin enerji tüketimlerinin %10 oranında azaltılabileceğini göstermişlerdir. Farklı ısı değiştiricisi konfigürasyonları kullanarak ram makinelerinin egzozunda enerji geri kazanımı için çeşitli metodolojiler de geliştirilmiştir [9]. Ram makinelerinin enerji verimliliğini, kurutma performansını ve ısı geri kazanım potansiyelini inceleyen deneysel çalışmalar da mevcuttur [3, 10-13].

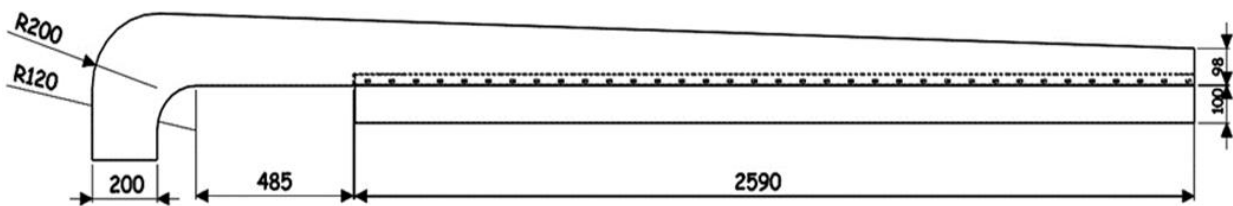
Bu çalışmada, bir tekstil fabrikasında hali hazırda kullanılmakta olan bir ram makinesi içerisindeki hava akışı ANSYS Fluent yazılımı ile modellenmiş ve bu ram makinesi içerisinde kullanılan düzelerin düze açıklığı ve düze açısı gibi bazı geometrik parametrelerinin akış yapısına olan etkileri ortaya konmuştur.

2 Materyal ve metot

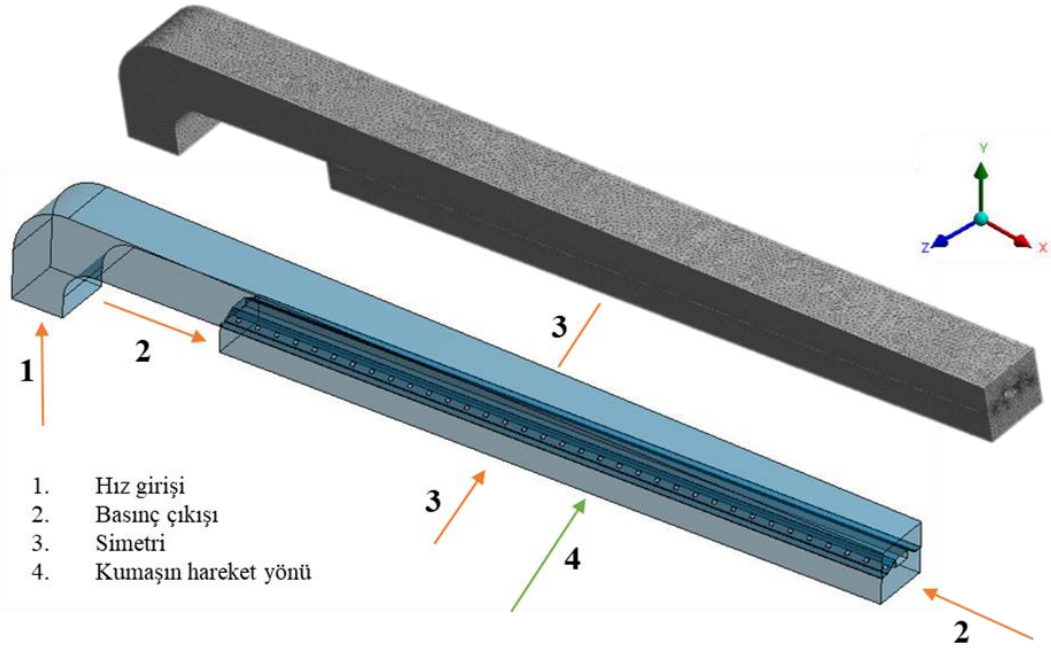
Bu çalışmada, akış analizi yapılan katı modelin ölçülendirilmiş şematik görüntüsü iki boyutlu olarak Şekil 2’de verilmiştir. Bir düze dilimi, Şekil 3’de verilen koordinat sistemi göz önüne alındığında z-ekseninde 235 mm uzunluğa sahiptir. Şekil 3’de “1” ile gösterilen kesitten sıcak hava düzeye girer, düze deliklerinden geçerek kumaş ile temas eder ve daha sonra “2” ile gösterilen simetrik iki yüzeyden düzeye terk eder. Analizler üç boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Doğalgaz brülörlü ram makinesinin şematik gösterimi [14]



Şekil 2. Ram makinesindeki bir düze diliminin şematik görüntüsü

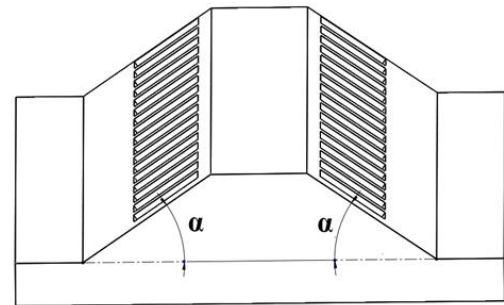


Şekil 3. Sayısal modelin ağ yapısı ve sınır şartları

“1” ile gösterilen kesit (200 mm x 235 mm) sıcak havanın düzeye giriş kesitidir ve modellerde “hız girişi (velocity inlet)” sınır şartı ile tanımlanmıştır. Tüm modellerde hava giriş hızı 5 m/s olarak kabul edilmiştir. “2” ile gösterilen simetrik iki yüzey “basınç çıkışı (pressure outlet)” olarak tanımlanmıştır. Çıkış yüzeylerinde, hava atmosferik koşullardadır. Bir ram makinesi, kapasite bakımından farklı sayılarda kabin içermekte olup, bu çalışmada her bir kabin içerisinde 24 adet düze dilimi içeren 10 kabinli bir ram makinesi üzerinde çalışılmıştır. Dolayısıyla ram makinesindeki hava akışını endüstriyel ölçekte modellemek yüksek maliyet ve hesaplama süresi gerektirir. Bu sebeple bu çalışmada, bir dilimdeki hava akışı modellenmiştir. Şekil 2’de, “3” ile gösterilen yüzeylerde “simetri” ve diğer tüm yüzeyler için “duvar (wall)” sınır şartı tanımlanmıştır. Düzeye delikleri kare geometriye ve 15 mm x 15 mm boyutlara sahiptir.

Geometrilerin akış analizleri ANSYS-Fluent programında gerçekleştirilmiştir. Analizlerde daimi akış kabulü yapılmıştır. Sonlu Hacimler Yöntemi ile ayrıklaştırma gerçekleştirilmiş, her bir geometride küçük değişiklikler göstermekle beraber akış hacmi yaklaşık $5 \cdot 10^6$ tetrahedral (dört yüzlü) elemana ayrılmıştır. Oluşturulan ağ yapısında en yüksek çarpıklık değeri 0.80 düzeyinde tutulmuştur. Akış hacminde en yüksek eleman boyutu 0.015 m, düze deliklerinin bulunduğu yüzeylerde ise 0.002 m olarak belirlenmiştir. Modellerde akışkan olarak uygulamadaki gibi hava belirlenmiştir. Havanın yoğunluğu 1.225 kg/m^3 ve viskozitesi $1.7894 \cdot 10^{-5} \text{ kg/ms}$ 'dir. Akış hacmi değişkenlerini ayrıklaştırmak için SIMPLE algoritmasından yararlanılmıştır. Mekânsal ayrıklaştırma işleminde ikinci mertebeden ileri gidişli şema (second order upwind scheme) seçilmiştir. Her bir analiz için paralel olacak şekilde 8 işlemcide gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma için düze açısı (α) ve düze açıklık oranı (B) akışa olan etkisinin incelendiği geometrik parametrelerdir. Düzeye açısı (α) bir düze diliminde düze deliklerinin bulunduğu yüzeyin yatayla yaptığı açıyı temsil etmektedir (Şekil 4). Düzeye açıklık oranı (B) ise düze deliklerinin bulunduğu eğik yüzey üzerinde delikli alanın toplam yüzey alanına oranını ifade etmektedir. Düzeye açısı için değerler sırasıyla $\alpha_1=0^\circ$, $\alpha_2=10^\circ$, $\alpha_3=20^\circ$, $\alpha_4=30^\circ$ olarak belirlenmiştir. Düzeye açıklık oranı değerleri sırasıyla $B_1=0.05$, $B_2=0.1$, $B_3=0.2$, $B_4=0.3$ ve $B_5=0.4$ 'tür. Düzeye açıklık oranı (B) arttıkça hem x-doğrultusundaki delik sayısı artmakta hem de z-doğrultusunda bir sıra daha delik geometrisi eklenmektedir. Bu çalışmada örnek alınan ram makinesi düzesi aktif olarak bir tekstil fabrikasında kullanılan ram makinesinde bulunan düzelerdir. Bu örnek düzeler $\alpha=30^\circ$ açığa ve $\beta_1=0.05$ açıklık oranına sahiptir. Sunulan çalışmada, hava akışının sıkıştırılmaz akış olduğu ve 25°C sıcaklıkta gerçekleştiği kabul edilmiştir. Bu akış problemi Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri ile tanımlanabilir. Bu denklemlerde, hız ve basınç büyüklükleri zaman ortalamalı ve çalkantı terimleri cinsinden yazılır. Sürekliliği ve momentumun korunumunu ifade eden RANS denklemleri [Denklem \(1\)](#) ve [Denklem \(2\)](#) ile verilmiştir.



Şekil 4. Düzeye açısı

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (2)$$

Bu denklemlerde; i ve j alt simgeleri, akışın üç boyutlu olarak gerçekleştiğini dikkate almak için 1, 2 ve 3 değerlerini alabilir. ρ akışkanın yoğunluğunu, U kartezyen koordinatlardaki herhangi bir hız bileşenini, P akışkanın statik basıncını, μ akışkanın dinamik viskozitesini, ve u' hızın türbülans çalkantı bileşenini ifade etmektedir. $\rho \overline{u'_i u'_j}$ ifadesi Reynolds gerilmelerini temsil etmektedir. Reynolds gerilmelerini modelleyebilmek için ilave türbülans modeli denklemlerinin çözümüne ihtiyaç duyulur. Türbülans modeli olarak literatürde ram makinelerinin HAD modellemesi yapılırken uygulduğu ortaya konan [6] Standart k - ε modeli seçilmiştir. Standart k - ε türbülans modeli, iki denklemlilik türbülans modelleri arasında ekonomikliği ve pek çok akış olayında kabul edilebilir doğrulukta sonuç vermesi açısından yaygın olarak kullanılan yarı ampirik bir modeldir. Türbülans kinetik enerjisi (k) ve disipasyon (kayıp) oranı (ε) için yazılan iki adet transport denkleminin çözümü ve türbülans viskozitesinin (μ_t) hesabını içerir. Kaldırma kuvvetleri etkisi ihmal edildiğinde, bu transport denklemleri k ve ε için sırası ile Denklem 3 ve Denklem 4'te verilen şekilde yazılabilir [15].

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

Bu denklemlerde yer alan μ_t : türbülans viskozitesi Denklem 5 ile hesaplanmaktadır.

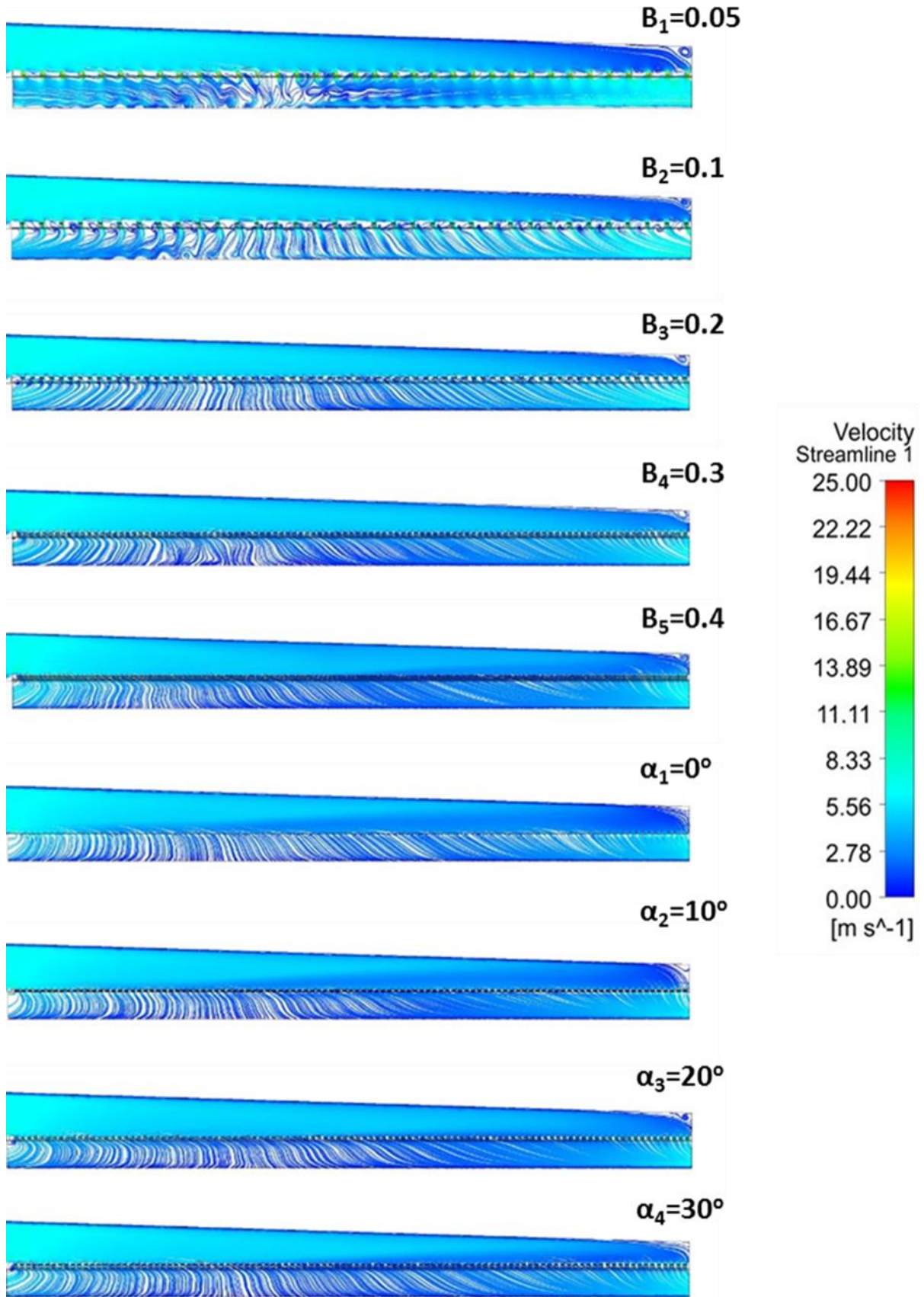
$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

Bu denklemlerde; k türbülans kinetik enerjisini, ε türbülans yitim oranını ifade etmektedir. Denklemlerde bulunan sabitler $\sigma_k=1$, $\sigma_\varepsilon=1.3$, $C_{1\varepsilon}=1.44$, $C_{2\varepsilon}=1.92$ ve $C_\mu=0.09$ değerlerini almaktadırlar [15].

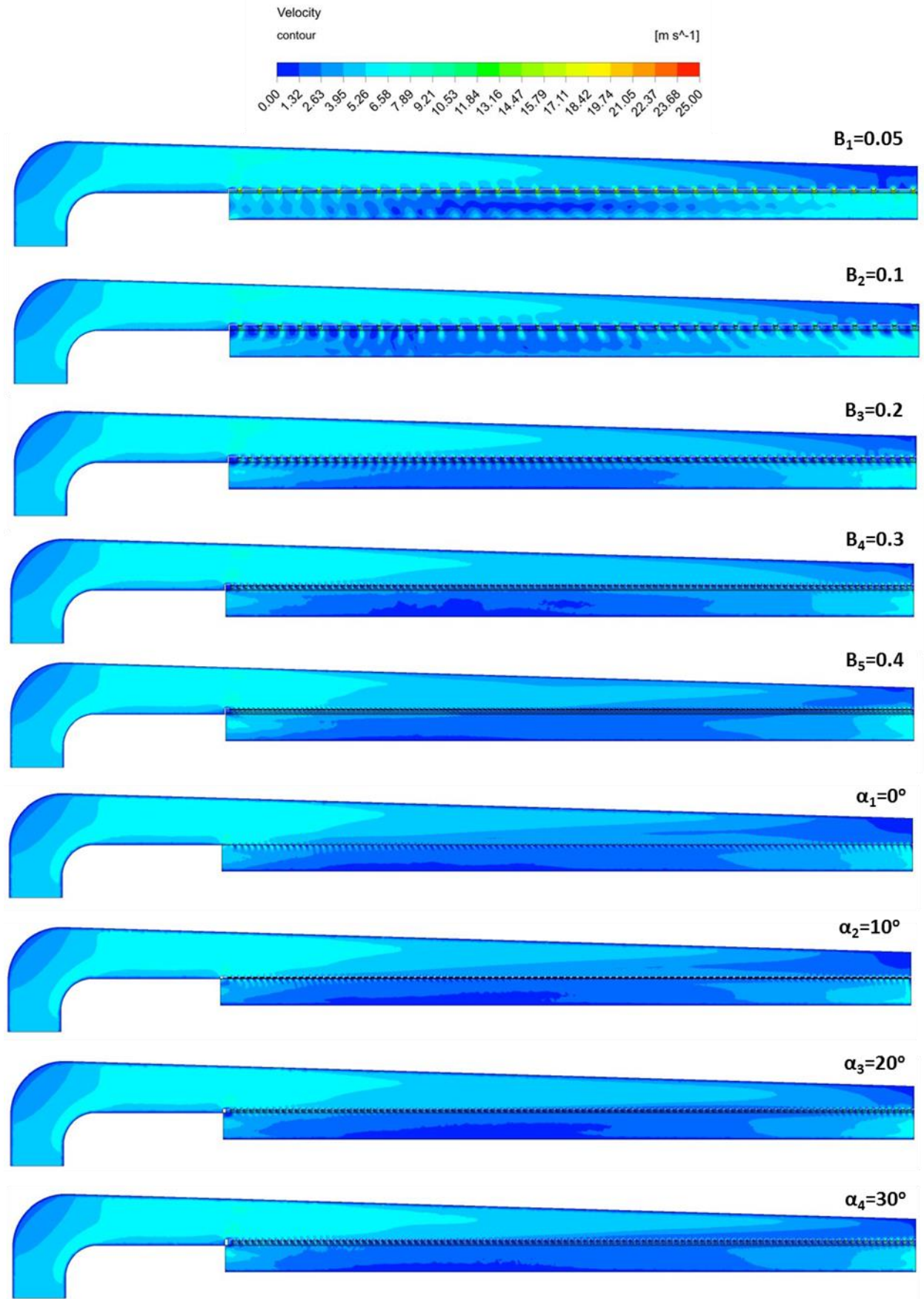
3 Bulgular ve tartışma

ANSYS Fluent paket programında gerçekleştirilen akış analizleri ile ram makinesindeki hava akışı ile ilgili veriler elde edilmiştir. Sonuçlar irdelenirken özellikle hız alanı ile ilgili veriler göz önünde bulundurulmuştur. Analiz sonuçları farklı kesitlerden alınan akım çizgileri ve hız konturları olarak sunulmuştur. Şekil 5'te, ram makinesinin Şekil 3'te

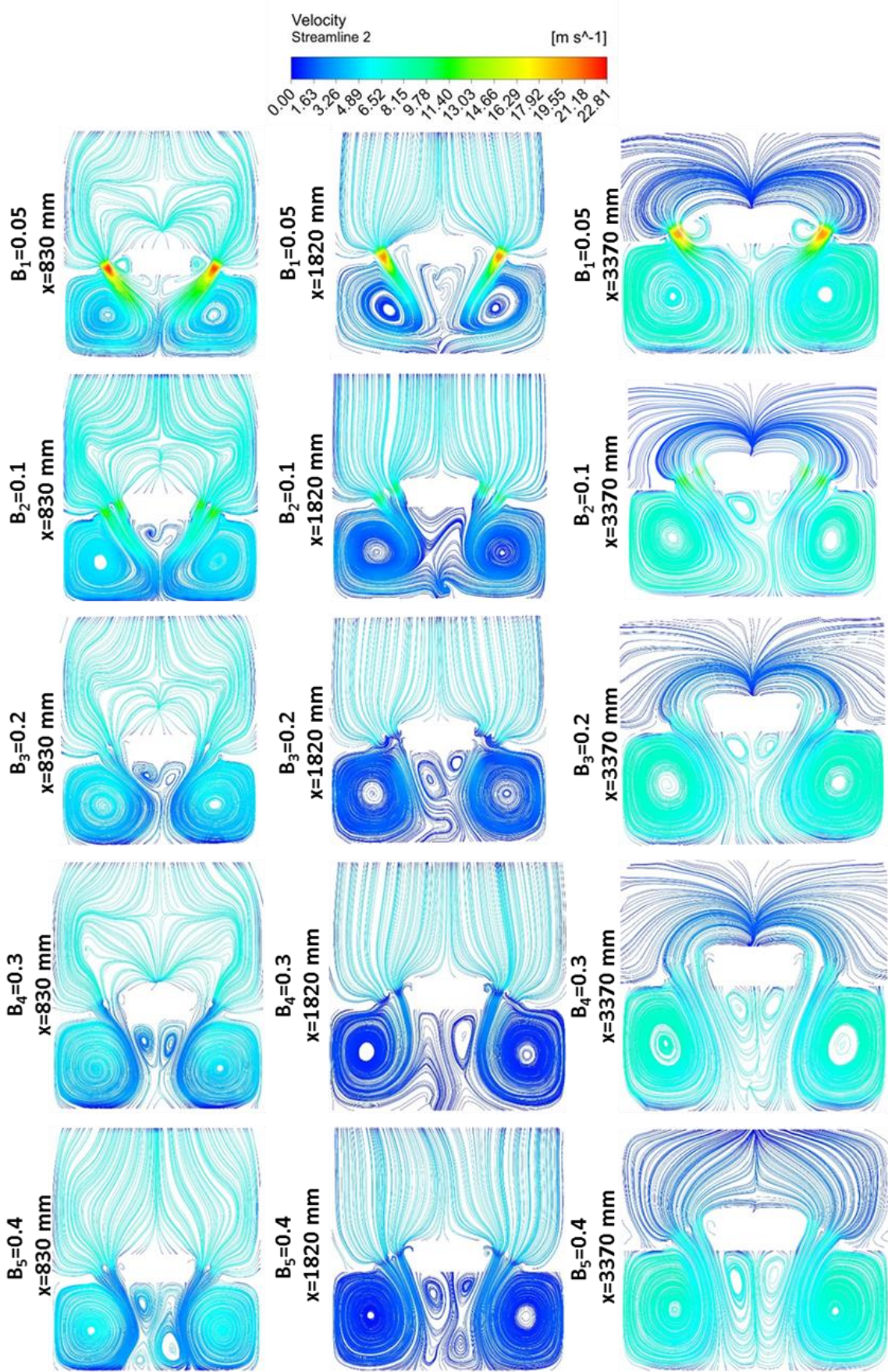
verilen eksen takımı dikkate alındığında xy düzlemi (düze deliklerini içerecek şekilde belirlenen kesit üzerinde) üzerinde belirlenen yüzey üzerindeki akım çizgileri tüm geometrik parametreler için verilmiştir. Şekil 5 incelendiğinde, tüm geometrik parametreler için düze boyunca akışın bu doğrultuda tam olarak homojen dağılmadığı görülmektedir. Yine tüm geometrik parametrelerde, akışın büyük bölümü düze deliklerinden geçtikten sonra kumaşa çarpmakta ve özellikle düze sonundaki çıkışa doğru (Şekil 3'te düze sonunda "2" ile gösterilmiştir.) yönelmektedir. Akış, düzenin üst kısmında pozitif x-doğrultusunda gerçekleştiği için deliklerden geçtikten sonra akışın büyük bölümünün pozitif x-doğrultusuna yöneldiği düşünülmektedir. Şekil 6'da, Şekil 5'in sunulduğu düzlem üzerinde hız alanına ait konturlar verilmiştir. Şekil 5 ve Şekil 6 birlikte değerlendirildiğinde, düze açıklık oranı (B) düşük olduğunda düze deliklerinden geçen havanın hızı ve dolayısıyla debisi daha yüksek olmaktadır. $B_1=0.05$ değeri için düze deliklerinden geçen hava hızı 20 m/s civarına kadar artmaktadır. Bununla birlikte düze açıklık oranının (B) artmasıyla düze deliklerinin hemen alt bölgesinde deliklere yakın kısımlarda daha homojen hız dağılımı oluşmaktadır. Fakat açıklık oranının artışı ile beraber deliklerden geçen hava hızı düşmekte ve havanın bir kısmı en alt yüzeyde bulunan kumaşa temas etmeden, bir kısmı ise kumaşa daha fazla yatay açıyla temas ederek akış bölgesini terk etmektedir. Bu durumun kurutma performansının düşüşüne yol açabileceği düşünülmektedir. Bunun yanı sıra çok düşük açıklık oranı ($B_1=0.05$) değerinde ise kumaşın orta bölgelerinde çok düşük hızlar oluşmaktadır. Şekil 5 ve Şekil 6, düze açısı (α) dikkate alınarak incelenirse, düze açısının (α) artmasıyla deliklerden geçen hava akışının kumaşa daha dar açıyla temas ettiği görülür. Ayrıca düze açısının artmasıyla birlikte yüzeyin orta bölgelerinde akış hızı düşmektedir. Bu durumların kurutma prosesinin verimini azaltabileceği düşünülmektedir. Şekil 7 ve Şekil 8'de, y-z düzleminde x-doğrultusunda düze deliklerinin başlangıç bölgesi, orta bölgesi ve son bölgesini ifade eden yüzeyler üzerinde akım çizgileri elde edilmiştir. Şekil 7 dikkatli bir şekilde incelenirse, hava akışı düzenin sonuna doğru ilerledikçe deliklerden geçen akış debisinin azaldığı tüm parametreler için akım çizgilerinden de net şekilde anlaşılmaktadır. Düze açıklığı (B) değeri arttıkça düze deliklerinden geçen hava hızı azaldığı için daha kısa mesafede vorteksler oluşmaktadır. Bu durum da hava jeti akışının kumaşa daha düşük yüzey alanında temas etmesine sebep olabilmektedir. Ayrıca düze açıklık oranının artışı deliklerden geçen hava akışının iki yönde vorteks oluşturmaya sebep olmaktadır. Şekil 8'de düze açısının artmasıyla iç kısımlarda kalan deliklerden geçen akışın kumaşa temas alanının azaldığı görülmektedir ki bu durumun kurutma performansına olumsuz etki edeceği düşünülmektedir. Düze açısı arttıkça iç kısımlarda kalan deliklerin kurutma bölgesine yönlendirdiği hava akışı birbirleri ile çarpışmaktadır. Bu durumda akışın sahip olduğu enerjide bir kayıp yaşanabilir. Bu noktada önemli olan kısım deliklerden geçen hava akışının olabildiğince yüksek hızla (kumaşa olumsuz bir etki bırakmayacak kadar yüksek bir hız) kumaşa temas etmesidir.



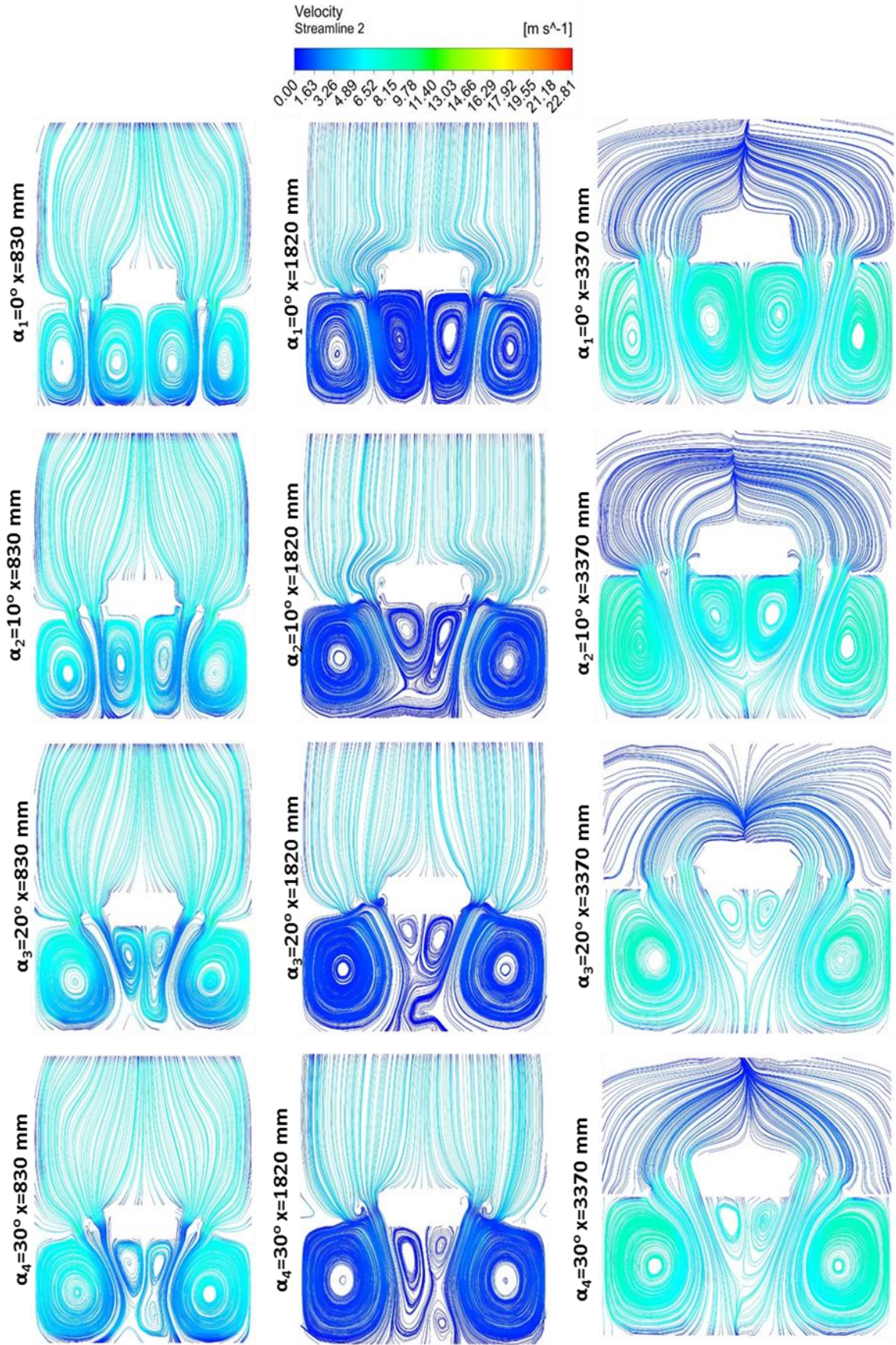
Şekil 5. Farklı açıklık oranları ve farklı düze açılıarı için düze deliklerinden geçen akışın akım çizgileri



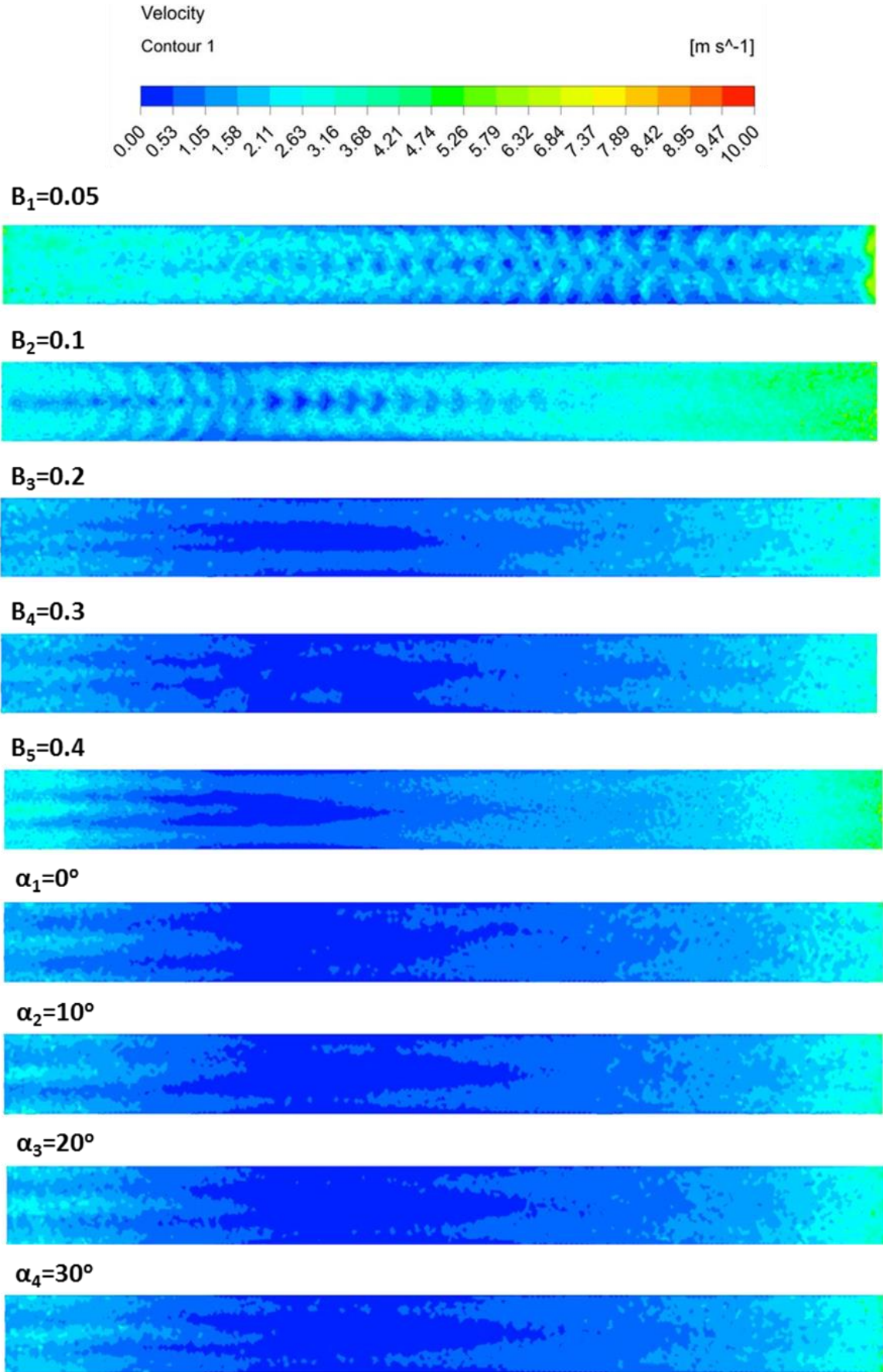
Şekil 6. Farklı açıklık oranları ve farklı düze açları için düze deliklerinden geçen akışın hız konturları



Şekil 7. Farklı açıklık oranları ve farklı y-mesafeleri için düze deliklerinden geçen akışın akım çizgileri



Şekil 8. Farklı düze açıları ve farklı y-mesafeleri için düze deliklerinden geçen akışın akım çizgileri



Şekil 9. Farklı açıklık oranları ve farklı düze açılıarı için kumaşa çarpan hava akışının hız konturları

Şekil 9’da kumaş üzerindeki hız dağılımını görebilmek için tüm geometrik parametreler için kumaş üzerindeki hız konturları verilmiştir. Tüm geometrik parametrelerde de düze giriş ve çıkış bölgelerine karşılık gelen akış hacimlerinde daha yüksek hava akış hızları oluşmaktadır. $B_1=0.05$, $B_2=0.1$ ve $B_5=0.4$ açıklık oranı değerlerinde belirgin bir hız dağılımı farkı oluşmaktadır. $B_3=0.2$ ve $B_4=0.3$ açıklık oranı değerlerinde nispeten daha düzgün bir hız dağılımı olduğu görülmüştür. Şekil 9’da düze açısı ile ilgili konturlarda, düze açısının kumaş üzerinde belirgin bir fark oluşturmamakla beraber düze açısının düşük olması yani deliklerin bulunduğu yüzeyin daha fazla yatay açıda bulunmasıyla birlikte az da olsa daha homojen bir dağılım oluşturduğu gözlemlenmektedir.

4 Sonuçlar

Ram makinelerinde sayısal akış modellemesi gerçekleştirilen bu çalışma ile kumaş kurutma prosesinin iyileştirilmesi adına düze açıklık oranı ve düze açısının akış yapısına etkisi ortaya konmuştur. Özellikle düze deliklerine hava akışını sağlayan kanalın tek bir yönden ve yatay doğrultuda kurutma bölgesine besleme yapması özellikle x-doğrultusunda asimetrik bir hız dağılımına sebep olmaktadır. Bunun yanı sıra ram makinesi içindeki düzelerin açıklık oranının (B) %20-30 düzeylerinde tutulmasının düze içi hava akış dağılımını iyileştirdiği görülmüştür. Düze açısının (α) ise 0° ’de (yani düze deliklerinin bulunduğu yüzeyin yatay konumda tutulması durumunda) tutulmasının özellikle düze deliklerinden geçen havanın kumaş yüzeyi ile daha iyi temas halinde olduğu ve kurutma performansını arttıracak şekilde düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince “2425” kodlu proje kapsamında, aynı zamanda ILSAN Tekstil A.Ş. tarafından desteklenmiştir.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %6

Kaynaklar

- [1] Türkiye İhracatçılar Meclisi, 2020 Yılı İhracat Raporları, <https://tim.org.tr/tr/ihracat-rakamlari>, Erişim 18 Aralık 2020.
- [2] Türkiye İstatistik Kurumu, 2020 Yılı Enerji İthalat Raporları, <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=cevre-ve-enerji-103&dil=1>
- [3] B. Cınar Gelir and H. Ceylan, The effect of the heat recovery on fuel consumption in the stenter machine,

- Thermal Science, 25, 1047-1055, 2021. <https://doi.org/10.2298/TSCI190510336C>
- [4] R. T. Oğulata, F. D. Kadem ve E. Koç, Tekstilde kurutma yöntem ve makinaları, 4. Ulusal Tesizat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, sayfa 803-810, İzmir, Türkiye, 04-07 Kasım 1999.
- [5] M. Juraeva, K. J. Ryu, and D. J. Song, Optimum design of the injection duct system of a stenter machine, Journal of Mechanical Science and Technology, 31, 2279-2285, 2017. <https://doi.org/10.1007/s12206-017-0424-6>
- [6] W. P. Llanos, M. R. Santos, B. M. Quadri and O. I. Martins, Phenomenological modeling and simulation of a textile stenter, Textile Research Journal, 0, 1-18 2020. <https://doi.org/10.1177/0040517520918231>
- [7] H. Baxi, A. Patel, and J. Barve, Modelling and Simulation of Dryer System. Proceedings of 2015 International Conference on Industrial Instrumentation and Control, pp. 1544-1549, Pune, India, 2015.
- [8] N. G. Patel, D. J. Shendageb, M. G. Parikh, S. K. Basuc and M. H. Badea, Energy model-based benchmarking of the drying process in the stenter machine, Drying Technology an International Journal, 39, 1114-1133 2021. <https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1907401>
- [9] R. T. Oğulata, Utilization of waste-heat recovery in textile drying. Applied Energy, 79, 41–49 2004. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2003.12.002>.
- [10] D. Fiaschi, G. Manfrida, L. Russo and L. Talluri, Improvement of waste heat recuperation on an industrial textile dryer: Redesign of heat exchangers network and components. Energy Conversion and Management, 924-940, 150, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.05.053>
- [11] A.E. Akan ve D. B. Özkan, Ram makinesinde kurutma prosesinin enerji verimliliği analizi, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 10, 157-167, 2019. <https://doi.org/10.24012/dumf.434850>
- [12] A. E. Akan and D. B. Özkan, Experimental examination and theoretical modeling of drying behavior in the ram machine, Drying Technology an International Journal, 38, 1760-1775, 2020. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1662436>
- [13] A.E. Akan and F. Ünal, Thin-Layer Drying Modeling in the Hot Oil-Heated Stenter, International Journal of Thermophysics, 41, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10765-020-02692-x>
- [14] M. H. Sheshir, Finishing Machines, <https://textilelab.blogspot.com/>, Erişim 07 Aralık 2020.
- [15] Fluent, A. N. S. Y. S. ANSYS fluent theory guide 15.0. ANSYS, Canonsburg, PA, 33, 2013.





Bir prototip kağıt kesme makinesi tasarımı

Design of a prototype for paper cutting machine

Hasan Demirtaş^{1,*} 

¹ Samsun Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 55080, Samsun, Türkiye

Özet

Günümüzde en çok kullanılan kâğıt tipi olan A4 kağıdı, bünyesinde odun miktarı en az seviyede olan 1. Hamur kağıdı kullanılarak imal edilmektedir. A4 boyutu kâğıtlar ise büyük ebatlardaki ruloların enine ve boyuna kesilmesi ile elde edilmektedir. Türkiye’de ise bu tipte bir makinenin üretimi yapılmamaktadır. Bu çalışmada, büyük ebatlarda bir kağıt kesme makinesi için tasarlanmış olan bir prototip sunulmuştur. Bu prototip için farklı hızlarda hareket edebilen adım motorları kullanılmış ve polyamid merdaneler kullanılarak kağıdın yırtılmadan bir hat üzerinden diğerine transferi gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan bir prototip kağıt kesme makinesi için karşılaşılan ve karşılaşılabilecek olan bazı sorunlar ele alınmış olup bu sorunların çözümlenmesi için bazı çözümler yapılmıştır. Kağıdın transferi sırasında mil eksenlerindeki kaçıklığın ve milleri taşıyan konstrüksiyonun düzgün bir şekilde monte edilmemesi halinde kağıdın düzgün bir şekilde kesilemediği tespit edilmiştir. Ayrıca kağıdı döndüren motorun hızının uygun bir oranda ayarlanamaması durumunda kağıdın gerilerek koptuğu gözlemlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Kağıt, Prototip, Kağıt kesme makinesi

1 Giriş

Günümüzde ambalaj, eğitim, reklam vb. bir çok sektörde kullanılan kağıt, farklı ebatlarda üretilmektedir. Kağıdın temel malzemelerinden olan odun ve selüloz oranları kağıdın kalitesini belirleyen en önemli faktörlerdir. 3 farklı kalite olarak üretilen kağıdın hamur çeşitleri:

1. Hamur Kağıt: Bu hamur tipi haberleşme, eğitim gibi alanlarda yazıların daha okunaklı elde edilmesinden dolayı en çok tercih edilen hamur tipidir.

2. Hamur Kağıt: Bu hamur tipi genelde düşük kalite baskı almak için kullanılmakta olup rengi tam beyaz değildir.

3. Hamur Kağıt: Saman kağıdı olarak bilinen bu kağıtlar düşük fiyatlıdır ancak kaliteli baskı yapılmadığından tercih edilmez.

İlk olarak 1799 yılında Louis-Nicolas Robert tarafından tasarlanan kağıt yapma makinesi, sürekli olarak kağıt üretimi yapamamakta ve geliştirilmesi gerekmektedir. Bu yüzden sürekli kağıdı üreten ilk makine 1822 yılında Bryan Donkin tarafından geliştirilmiştir [1]. Chen vd. [2] yaptıkları çalışmada bal peteği yapısına sahip ve paketleme işlemlerinde kullanılan karton kağıt türünü düzgün bir şekilde kesilebilmesi için sonlu elemanlar yöntemini

Abstract

A4 paper is the most widely used paper type that is produced by using wood-free writing & printing paper with the least amount of wood in its structure. A4 size paper is produced by cutting large and long rolls in width and length directions. The construction of this machine is not made in Turkey. In this study, a prototype designed for a paper cutting machine is presented. For this prototype, step motors are used that can be set at different speeds and polyamide rollers are used to transfer the paper from one line to another without tearing. Some problems that is encountered for the designed paper cutting machine are discussed and some analyses are made to solve these problems. It has been found that the misalignment of the shaft axes during the transfer of the paper and the not suitable construction of the shafts causes the non-uniform cutting of the paper. It is also observed that the speed of the motor must the paper adjusted at an appropriate rate, to avoid the stretch and break of paper.

Keywords: Paper, Prototype, Paper cutting machine

kullanmışlardır. Bununla birlikte, kağıdın enine düzgün kesilebilmesi için kontrol sistemleri ve algoritmalar geliştirilmiştir [3,4]. Ayrıca kesici bıçağı tutan merdanelerde Geneva mekanizması kullanılarak iyileştirmelerin yapıldığı belirtilmiştir [5-7]. Günümüzde kağıtlar farklı ebatlarda üretilmekte olup, kurumsal yazışmazlar, bilimsel yayımlar ve eğitim, öğretim sırasında en çok kullanılan kağıt tipi A4 kağıdır.

Tablo 1. Kağıt ebatları

Kağıt boyutu	Ölçüsü (mm)	Ölçüsü (inç)
A0	841 x 1189	33.13 x 46.85
A1	594 x 841	23.40 x 33.13
A2	420 x 594	16.55 x 23.40
A3	297 x 420	11.70 x 16.55
A4	210 x 297	8.27 x 11.70

Farklı boyutlarda kâğıtların üretimi sırasında büyük rulolarda sarılı olarak bulunan kâğıtlar, merdaneler yardımı ile kesici bıçaklara iletilmektedir. Bıçaklarda enine ve boyuna kesilen kâğıtlar daha sonra bantlı sistemler yardımı ile adetli olarak paketlenmektedir. Bu işlem sırasında

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: hasan.demirtas@samsun.edu.tr (H. Demirtaş)

Geliş / Received: 22.09.2021 Kabul / Accepted: 14.12.2021 Yayınlanma / Published: 14.01.2022

doi: 10.28948/ngumuh.998473

ortamda bulunan toz, nem ve sıcaklık kağıdın kesim kalitesini etkileyen en önemli faktörlerdir.



Şekil 1. Endüstriyel ölçekte bir A4 kağıt kesme makinesi [8]

Bu çalışmada, Türkiye’de henüz üretimi olmayan bir A4 kağıt kesme makinesi için bir prototip tasarlanmış ve bu prototipte karşılaşılan sorunlar ele alınmıştır. Bu sorunların çözümlenmesi yapılarak büyük ebatlarda bir A4 kağıt kesme makinesi için ön çalışmalar yapılmış ve sektörde ilgili alanlara çözüm önerileri sunulmuş verimliliğin artırılması amaçlanmıştır.

2 Materyal ve metot

Şekil 2 Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.’de tasarlanmış ve montajı yapılmış olan prototip kağıt kesme tezgahı gösterilmiştir. Bu tasarımda kağıt rulosu olarak 60 mm genişliğe ve 70 mm çapında 1. kalite hamurdan üretilmiş olan kağıt kullanılmıştır. Rulo kâğıdının montajı ise hareketi sağlayan indüksiyonlu krom mile polyamid malzeme kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca farklı uzunluklara sahip krom kaplı indüksiyonlu miller kullanılarak kâğıdın merdanelere iletirken yıpranmaması sağlanmıştır.



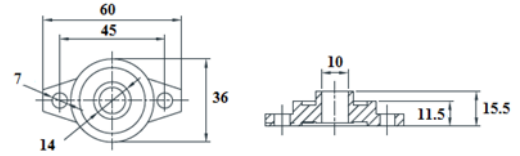
Şekil 2. Kağıt kesme makinesi prototipi

Kağıdın sıkıştırılarak iletilmesi için polyamid malzemeden üretilmiş merdaneler kullanılmış olup bu merdaneler ise krom kaplı indüksiyonlu millere sıkı geçme yöntemi uygulanarak monte edilmişlerdir. Kullanılan polyamid malzemeler Şekil 3’te gösterilmiştir.



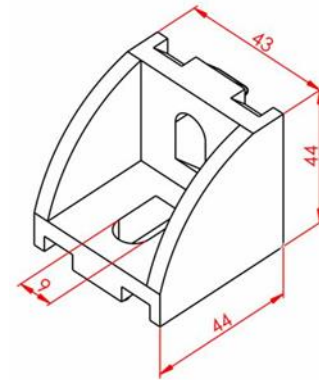
Şekil 3. Polyamid merdaneler

Merdanelerin, millerin ve kağıt rulonun rahat bir şekilde gövde içinde dönebilmesi için salyangoz tipte yataklı rulmanlar kullanılmış olup bu rulmanların ölçüleri ise Şekil 4’te gösterilmiştir.



Şekil 4. Yataklı rulman

Yukarıda belirtilen parçaların bir konstrüksiyon üzerine hassas bir şekilde yerleştirilmesi ve işaretlemesi zaman ve maliyet gerektiren bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu kapsamda konstrüksiyon malzemesi olarak hazır belli ölçülerde üretilmekte olan alüminyum sigma profiller kullanılmıştır. Profiller ise masaya ölçüleri uygun olacak şekilde köşe bağlantı elemanı yardımı ile yapılmıştır. Köşe bağlantı elemanının ölçüleri Şekil 5’te verilmiştir.



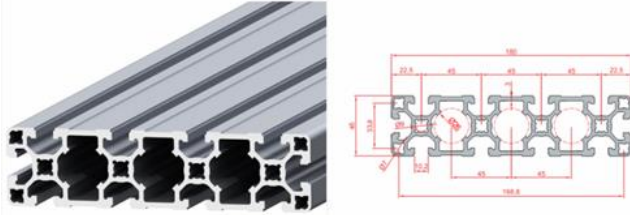
Şekil 5. Köşe bağlantı elemanı

Konstrüksiyon için kullanılan profillerde açılan ölçülü kanallar yardımı ile rulmanların montajı hassas ve kolay bir şekilde gerçekleştirilebilecektir. Ayrıca yumuşak bir malzeme olan alüminyum üzerinde işlem (delik delme, kesme vb.) yapmak diğer türde malzemelere göre daha kolaydır. Bu prototipte kullanılan alüminyum profiller mukavemet gerektiren makinelerin fiziksel yapıları için tercih edilmektedir. Bu tip profillerin teknik özellikleri Tablo 2’de, ölçüleri ise Şekil 6’da gösterilmiştir.

Tablo 2. 45*180 alüminyum profil teknik özellikleri [9]

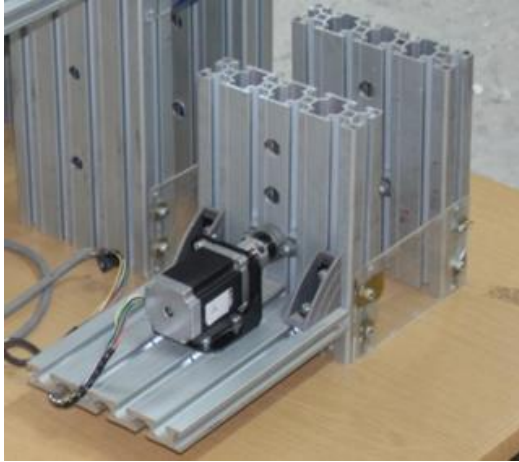
Dış Ebat (mm)	Malzeme	I_x (cm ⁴)	I_y (cm ⁴)	W_x (cm ³)	W_y (cm ³)
45*180	6063	747	56.7	83	25.2

Kullanılan alüminyum levha üzerinde bulunan ve Şekil 5'te gösterilen kanallar kullanılarak mil veya merdane eklenip, çıkarılabilmektedir. Böylece kâğıdın gerginliği değiştirilebilmektedir.



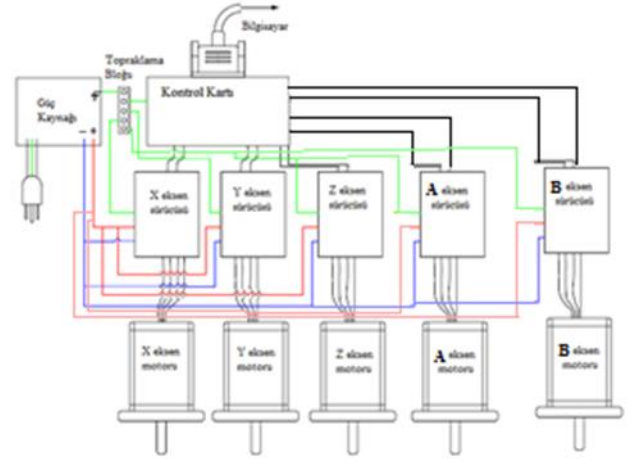
Şekil 6. Alüminyum profil [9]

Kâğıdın hareketinin sağlanması için adım motorlar kullanılmıştır. Adım motorlar ise 210 mm uzunluğundaki indüksiyonlu mile hassas servo kaplinler ile bağlanmış ve milin eksen kaçıklığının önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Adım motorların konstrüksiyona sabitlenmesi ise Şekil 7'de gösterildiği gibi flanşlar ve yüzey profilleri yardımı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7. Adım motorun konstrüksiyona montajı

Adım motorlarda güç kaynağından akımı alıp sargılara ileten pinler bulunmaktadır. Bu pinler vasıtasıyla darbeli dalga boyları oluşturularak motorun kontrolü sağlanmaktadır. Ayrıca adım motoru, tam adım veya mikro adım yaparak hareketini sağlayan yöntemler vardır. Bu yöntemlerden birisi de motor sürücüsü kullanmaktır. Sunulan çalışmada beş adet motor ve bu motorların kontrolü için beş adet sürücü kullanılmıştır. Bu kapsamda her motor CNC tezgahının bir eksenini temsil edecek şekilde kontrol kartına bağlanmış olup bilgisayar üzerinden kontrolü sağlanmıştır. Böylece motorların dönüş hızları hem sürücü kullanılarak hem de bilgisayar üzerinden kontrol edilebilmektedir. Motor kontrol şeması Şekil 8'de, kontrol panosu ise Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 8. Motor kontrol şeması

Kâğıt kesme makinesi ve bilgisayar arasındaki bilgi alışverişi ise paralel bağlantı kablosu (LPT) ile yapılmaktadır. Bilgi alışverişi için en kolay yollardan biri olan LPT, sadece tezgâhların bilgisayar ile bağlantısı için değil; aynı zamanda yazıcı bağlantıları, bilgisayarlar arası bilgi alışverişi, tarayıcı bağlantıları gibi birçok alanda kullanılabilmektedir.



Şekil 9. Motor kontrol panosu

Kâğıtları kesmek için kullanılan bıçaklar özel ölçülerde bir firmaya imal ettirilmiştir. Dairesel bıçak ile kâğıdın dikey doğrultuda kesilmesi, düz bıçak ile yatay doğrultuda kesilmesi sağlanmaktadır. Bıçakların fotoğrafları Şekil 10'da gösterilmiştir. Dairesel bıçak krom mil üzerine özel olarak tasarlanmış bir aparat yardımı ile monte edilmiş olup bir adım motor ile hareketi gerçekleştirilmektedir.



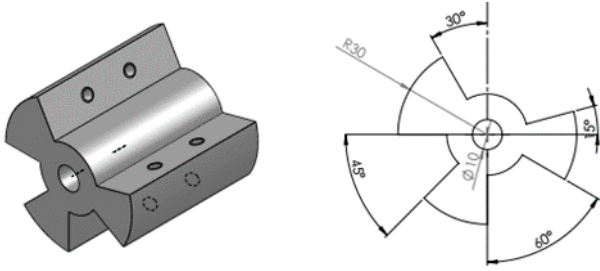
Şekil 10. Düz ve dairese bıçaklar

Tasarlanan prototip kağıt kesme makinesinde uygulanan deney şartları ise **Tablo 3**'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Deney şartları

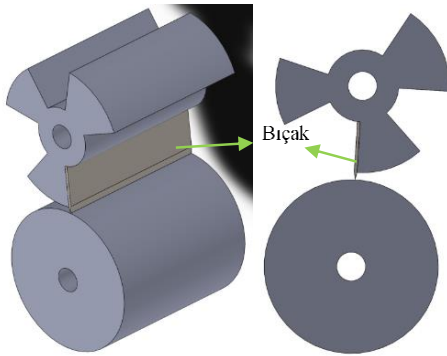
Deney Şartı	Kesme açısı	Mil sayısı	Mil dönme hızı (dev./dak.)
1	15	3	400
2	15	4	500
3	15	5	600
4	15	6	700
5	30	3	400
6	30	4	500
7	30	5	600
8	30	6	700
9	45	3	400
10	45	4	500
11	45	5	600
12	45	6	700
13	60	3	400
14	60	4	500
15	60	5	600
16	60	6	700

Düz bıçak ise polyamid malzemeden üretilmiş bir aparat üzerine 15° , 30° , 45° ve 60° gibi farklı açılarla yerleştirilmiş böylece bıçak açısının kağıt kesildikten sonra bantlara iletilmesi sırasında etkisinin olup olmadığı incelenmiştir. Düz bıçak için tasarlanan parçanın üç boyutlu modeli ve ölçüleri **Şekil 11**'de gösterilmiştir.



Şekil 11. Düz bıçak için tasarlanan aparat

Ayrıca düz bıçağın kağıdı kesebilmesi için bıçak ile çizgisel temas sağlayabilecek ve bıçağa zarar vermeyecek şekilde bir silindir parça yerleştirilmiştir. Bu silindir, rulmanlar yardımı ile serbest hareket edebilmekte böylece bıçağın hareketine etkisi bulunmamaktadır. **Şekil 12**'de düz bıçak ve silindirin konumlanma şematigi gösterilmiştir.



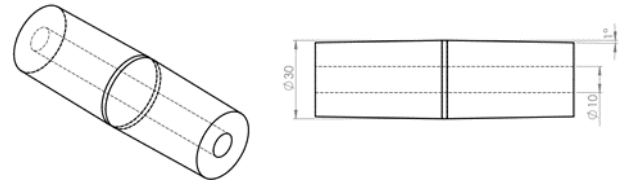
Şekil 12. Düz bıçak ve silindir arasında çizgisel teması gösteren şematik

3 Bulgular ve tartışma

Yapılan çalışmalar sonucunda ince ve hafif bir malzeme olan kağıdın rulodan kesim işlemine iletilmesi sırasında kağıt gerginliğini büyük bir öneme sahip olduğu görülmüştür. Bu kapsamda profil konstrüksiyon üzerine belirli mesafeler ve açılarla krom kaplı miller yerleştirilmiştir. Böylece kağıdın gerginliğinin artırılması sağlanmıştır. Fakat yapılan çalışmalar göstermiştir ki kağıdın gerginliği için sadece mil yerleştirilmesi yeterli gelmemiş, bununla birlikte ruloyu ve merdaneleri hareket ettiren motorun dönüş hızının da büyük bir etkisi olduğu gözlenmiştir. Artan mil sayısı kağıdı hareket mesafesini arttırmış böylece merdane dönüş hızı ile rulo dönüş hızı arasındaki farkta artmıştır. Rulonun dönüş hızı merdanenin dönüş hızı ile aynı veya daha düşük olduğundan kağıt aşırı miktarda gerilmekte böylece kağıt yırtılmaktadır. Bu da mil sayısı ile kağıt rulo dönüş hızının ters orantılı olarak değiştiğini göstermektedir. Bununla birlikte rulo hızının aşırı artırılması ise kağıdın gerginliğinin düşmesine bu ise kağıdın yönünde sapsmalara neden olmaktadır. Böylece kağıt, kesme işlemi sırasında düzgün hareket etmemekte, kesim işlemi düzgün bir şekilde gerçekleştirilememektedir.

Kağıt kesme işleminde karşılaşılan bir diğer önemli sorun ise konstrüksiyona monte edilen millerin eksen kaçıklıklarıdır. Bu kapsamda kullanılan salyangoz tipte olan yataklama rulmanları içten dönmekte ve milde kaçıklıklara neden olmaktadır. Ekseninden kaçık olan miller kağıdın yönünde sapsmalara ve kağıdın eşit bir şekilde kesilememesine neden olmaktadır. İşlemin bu şekilde devam etmesi durumunda ise kağıtta kopmalar oluşmaktadır.

Ayrıca merdane olarak kullanılan silindirlere kağıt hareketi sıkışmanın düzgün bir şekilde gerçekleştirilemediği tespit edilmiştir. Bu yüzden merdaneler düz silindir yerine dozaj tipte merdaneler kullanılmıştır. Dozaj merdane ölçüleri **Şekil 13**'te gösterilmiştir.



Şekil 13. Dozaj merdane

Bununla birlikte yaptığı hareket boyunca kağıdı kesen dairesel bıçağın hızının artırılması ile bıçağın kağıdı kesme hızı artmaktadır. Böylece kağıdın millerden ve merdane üzerinden iletimi daha kolay hale gelmektedir. Ayrıca dairesel bıçak için yapılan aparatın düzgün bir şekilde bıçağı tutması ile kesim işleminin doğrultusundan sapsmadan yapıldığı görülmüştür. Düz bıçaklarda ise kullanılan açılar arasında kağıdın konveyör bantlara iletimini en iyi şekilde sağlayan 30° olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni ise kağıdı ileten yüzey alanının en çok 30° 'lik kısımda olmasıdır. Böylece kağıt iletim sistemden uzaklaşmadan iletim bandına taşınabilmektedir.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada bir A4 kağıt kesme makinesinde karşılaşılabilecek sorunların tespiti ve çözüm yollarının oluşturulabilmesi için tasarlanmış olan bir prototip sunulmuştur. Bu prototipte karşılaşılan bazı sorunlar ve çözüm önerileri ise aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Kağıt gerginliği;
 - Mil sayısının artırılması
 - Motor hızının mil sayısına bağlı olarak artırılması veya azaltılması
- Kağıdın düzgün bir şekilde iletilmemesi
 - Kullanılan mil ve merdanelerdeki eksen kaçıklıklarının giderilmesi
 - Merdanelerde düz silindir yerine dozaj silindir kullanılması
- Kağıdın düzgün kesilememesi
 - Bıçak kesme hızının artırılması
 - Düz bıçakların kesimi için çizgisel temaslı merdane yerleştirilmesi

Ayrıca bu çalışma sonucunda Türkiye’de henüz üretimi olmayan büyük ebatlarda bir A4 kağıt kesme makinesinin üretimine geçilmesi planlanmaktadır.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %4

Kaynaklar

- [1] R.H. Clapperton, The Paper-Making Machine. Pergamon Press, pp. 365. Londra, 1967.
- [2] Q. Chen and Y. Lv, Design of paper cutter machine, 9th International Conference on Computer-Aided

Industrial Design and Conceptual Design, CAIDCD 2008, IEEE, sayfa 504–508, Kunming, Çin, 22-25 Kasım 2008.

- [3] M. Bebić, N. Rašić, S. Štatkić, L. Ristić, D. Jevtić, I. Mihailović and B. Jeftenić, Drives and control system for paper-board cross cutter, 15th International Power Electron. Motion Control Conference Expo, EPE-PEMC 2012 ECCE Eur., sayfa: 1–8, Novi Sad., 4-6 Eylül 2012.
- [4] H. Wu, N. Luo and C. Wang, Study on control strategy of the rotary synchronous fixed-length cutting system, Journal of Vibroengineering, 15(2), 713–725, 2013.
- [5] N. S. Jain, and A. Rai, Modification of the geneva paper cutting tool, International Journal of Innovations in Engineering and Technology, 11(3), 94–98, 2018. <http://dx.doi.org/10.21172/ijiet.113.15>
- [6] A.S. Parmar, A. Singh, A. Pandey , K. Singh and M. Upadhyay, Intermittent paper cutting mechanism by giving feed through geneva wheel, International Research Journal of Engineering and Technology, 4(5), 1454–1456, 2017.
- [7] H. V. Sunil, A. Yadav, L. Shivu and S. Choudri, Automatic paper cutting machine using geneva mechanism, International Journal of Latest Engineering Research and Applications, 2(5), 38–45, 2017.
- [8] A4 kağıt kesme makinesi, <https://www.indiamart.com/proddetail/a4-paper-cutting-machine-0356196891.html/>, Erişim tarihi 23 Ağustos 2019.
- [9] Sigma profil teknik özellikleri, <https://www.doguskalip.com.tr/Urun/45x180-sigma-profil/1109>, Erişim tarihi 21 Eylül 2021.





Numerical study of heat transfer aspects in cutting tools made of Al₂O₃, ZrB₂, TiB₂, TiN using ANSYS fluent software

ANSYS fluent yazılımı kullanılarak Al₂O₃, ZrB₂, TiB₂, TiN'den yapılmış kesici takımlarda ısı transferi yönlerinin sayısal çalışması

Kamal F. Mohammed¹ , Süleyman Baştürk^{2,*} 

¹ Institute of Graduate Studies, Altınbas University, Istanbul, Turkey

² Electric, Autonomous and Unmanned Vehicles Application and Research Center, School of Engineering and Natural Sciences, Altınbas University, Istanbul, Turkey

Abstract

In this study, the effects of heat transfer and heat flux on cutting tools with materials of Al₂O₃, ZrB₂, TiB₂, TiN are investigated numerically by ANSYS fluent software. The numerical model was validated with the previous study. The influence of the machining parameters such as cutting speed and feed rate on the temperature and tool life has been investigated to indicate the optimum cutting tool and situation. The results show that Zirconium diboride (ZrB₂) and Titanium diboride (TiB₂) have a temperature less than the aluminum oxide (Al₂O₃) so that the productivity will increase with the diboride materials utilizing as cutting tool. The maximum temperature for aluminum oxide is 1300 K while the Titanium Nitride achieved 1100 K. The lowest and maximum temperature was measured at a cutting speed of 180 m/min and 220 m/min, respectively. The optimum cutting condition has been obtained with TiN cutting tool material at 180 m/min cutting speed and 0.138 mm/ rev feed rate. Titanium diboride (TiB₂) materials achieved the maximum cutting tool life comparing to other materials.

Keywords: Cutting tool, Diboride material, Insert, Temperature distribution, Heat flux, Tool life.

1 Introduction

The high-temperature values disturb the performance and quality of numerous engineering processes such as the machining process in which cutting tool has high temperature. This leads to change the tool physical properties and microstructure during machining. The disadvantages of those changes represent in reduction of material resistance of mechanical stresses so that performance and lifespan of cutting tool decrease. The processing impacts increase the operation cost and decrease the products quality. The study of heat flux as well as the temperature at different machining parameters can be useful for efficient cooling systems development and determining the optimum operation parameters. Valvo et al [1] studied a multiple method to estimate the temperatures in the ceramic tools cutting process. He evaluated the temperature lines with 3D cutting approach experimentally by applying constant melting point powders dispersed on planes parallel to rake face. Numerical

Özet

Bu çalışmada, ısı transferi ve ısı akısının Al₂O₃, ZrB₂, TiB₂, TiN malzemelerden üretilmiş kesici takımlar üzerindeki etkileri ANSYS sonlu elemanlar analizi programı yardımıyla sayısal olarak araştırılmıştır. Sayısal model bir önceki çalışma ile doğrulanmıştır. Kesme hızı ve ilerleme gibi kesme parametrelerinin kesici takım ömrü ve sıcaklık üzerine etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar, Zirkonyum diborid ve Titanyum diborid'in alüminyum oksitten daha düşük sıcaklığa sahip olduğunu, böylece kesici takım olarak kullanılan diborid malzemeleriyle verimliliğin artacağını göstermiştir. Alüminyum oksit için maksimum sıcaklık 1300 K iken, Titanyum nitrit için 1100 K sıcaklık elde edilmiştir. En düşük sıcaklık 180 m/dak kesme hızında, en yüksek sıcaklık da 220 m/dak kesme hızında ölçülmüştür. Optimum kesme koşulları TiN kesici takım 180 m/dak kesme hızında ve 0.138 mm/rev ilerleme hızında elde edilmiştir. Titanyum diborid (TiB₂) malzemeler diğer malzemelere kıyasla maksimum kesme takımı ömrüne ulaşmıştır.

Anahtar kelimeler: Kesici takım, Diborid malzeme, Insert, Sıcaklık dağılımı, Isı akısı, Takım ömrü.

analysis was completed to determine the percentage of heat transfer to the cutting tool during the operation and the temperature distribution of the insert and cutting holder. Temperature distribution was examined with SEM microscopy to confirm the numerical results. The results showed that at cutting speed equals to 11 m/s, metal appeared in the fractures of the inserts so that the cutting temperatures exceeded 1540 °C. Battaglia et al [2] studied the diffusion of heat for coated cutting tool analytically for modeling and to quantifying the coating thermal effect without tribological effect. The heat flux is analyzed depending on the deposit thermo-physical properties and the thickness. It was found out that the tribological phenomena at the tool-chip interface is the key reason why variations in the heat flux transferred to a substratum are clarified. Grzesik [3] studied the thermal and mechanical properties of orthogonal metal material tool by Lagrangian finite elements code. He investigated the effect of plane faced coated carbide tools and uncoated tools with continuous chip formation. The findings of the FEM

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: suleyman.basturk@altinbas.edu.tr (S. Baştürk)

Geliş / Recieved: 29.10.2020 Kabul / Accepted: 26.12.2021 Yayınlanma / Published: 14.01.2022

doi: 10.28948/ngumuh.817836

and analytical models are shown to have very adequate and physically validated tests, for both uncoated and three-layered coated materials, for cutting temperature values and distributions. Nonetheless, the best result would probably be obtained by adjusting the friction parameter and heat partition to coated tools with real thicknesses. In this analysis, they were based on data from the manufacturer and not on measurement utilizing, for example, microscopy scanning. Filice et al [4] modeled the cutting process numerically and by Lagrangian Eulerian approach. Experimental studies were performed to classify internal temperatures and cutting forces. A mild steel was cut using an uncoated tool (WC) as well as a coated tool (TiN). The heat transfer coefficient global model was developed at the tool-workpiece interface based on both experimental and simulative results, as a function of local pressure and temperature. Kountanya [5] has investigated the transient tool temperatures in disrupted machining processes. The practical solution technique for the Green's function approach involved the heat convection rate from outside surface. The findings showed that modulation at an upper variation frequency decreased the cutting temperature. However, heat conduction over convection to the ambient dominated the device. The instantaneous uncut chip thickness has been indicated to gap the highest temperature, suggesting that the model will theoretically change the cutting tool's thermal softening without an associated decline in material removal pace. The same model of tool temperature applied to face molding suggested the Peak temperature only occurred at the exit of the cut. Carefully planned hard-facing experiments were conducted which varied frequency and duration of the interruption. Data on tool life stated the beneficial effects of lower temperatures due to a slight interruption. Carvalho et al. [6] studied the effects of heat in cutting tools, taking into account the difference in the thickness of coating and heating flux. The K10 and the diamond substrates were used with TiN and Al₂O₃ coatings. The simulation approach makes use of the ANSYS software under the boundaries and constant physical thermal conditions. The experiments are used to test the suggested technique. After a continuous cut, the TiN and Al₂O₃ coatings did not produce satisfactory results. The heat flux for the 10 µm TiN and Al₂O₃ coatings showed a marginal reduction. Noor et al. [7] studied the dry cutting where no lubricant or coolant is utilized. They studied the dry cutting impact on the cutting tool life cutting force and while by means of two separate carbide coated tools such as TiAlN and TiN / MT-TiCN / TiN in the aerospace material machining. The surface-response method has been utilized to reduce the total experiments. TiAlN Swarm Optimization models have been established for machining parameters optimizing such as federate, cutting speed, and axial depth and to find the optimal cut force and durability. Compared with TiN / MT-TiCN / TiN, it is found that carbide cutting tool coated with TiAlN worked better in dry cutting. On the other side, using 100% water-soluble coolant, TiAlN performed higher. The cutting tool still needed lubricant to support the heat transfer from the workpiece because of the high temperature created by the aerospace materials. Cheng

et al. [8] studied the temperature distribution with a cooling system in a smart cutting tool process by determining the cooling fluid temperature at the outlet and inlet passes. They investigated the efficiency of the micro-cooling construction and the possibility of evaluating and adjusting the cut temperature experimentally and numerically. The results showed that the increase of the flow rate leads to a decrease in the resolution of the tool as a temperature sensor. It is indicated that there is a high accuracy with utilizing the numerical prediction model. The suggested micro-internal structure decrease the cutting tool temperature during the process. The new design and cooling solution is suggested for machining of different materials such as titanium and composites. Deiab et al. [9] investigated the distribution of the temperature on the cut insert with dry air cooling at low temperature numerically. Minimum quantity of lubrication of the cutting tool as internal cooling studied in this study. Results showed that the forced convection air increase the speed. Conduction and convection of heat modes are simulated for the metal cut machining. It is indicated that it is more important for the heat transfer by radiation to be explored in the CFD simulation. Carvalho et al. [10] investigated the temperature field in the insert, shim, and cutting-holder and the estimation of the cut interface heat flux. They improved a method for heat fluxes and temperature estimation in a cut machining. The use of COMSOL for the numerical solutions of differential equations that control the physics is effective. It is possible to adjust any boundary conditions and model the geometry. Yang et al. [11] investigated the heat transfer and flow shape of high-speed cutting machining with viscous coolant fluid and air and compared between the temperature gradient in the two cases. The results showed that the temperature gradient increase with the rise of Pr number with the coolant fluid comparing to natural air convection. They finished the heat transfer model that can be useful for understanding cooling process characteristics. Magalhães et al. [12] investigated the highest, minimum, and average temperatures for the connection zone between the chip and the insert by the help of COMSOL software. For validation of the results, comparing the heat flux of this study and the heat fluxes of other works was applied. They studied the temperature variation of coated carbide tools throughout the thicknesses. The results indicated that the coated carbide cutting tool presented higher temperatures for the flux contact area than the uncoated carbide tool. It is indicated that the increase of thicknesses has more effect on the cemented carbide. It can be concluded that the Al₂O₃ coating is better than TiN because of the low thermal conductivity value and protective for the cutting tool concerning heat. The uncoated and coated carbide cutting tool performed a peak difference for the cut area of 12.7 °C for the TiN and 75.5 °C for the Al₂O₃. Berezvai et al. [13] investigated a method to determine the contact length during the cutting process experimentally and numerically by using Abaqus software. Theoretical expressions with orthogonal cutting test and FE simulations were introduced. The results showed a good agreement between the FE simulations and the Lee and Shaffer model of contact length based on the Minimum

Energy Principle (MEP) shear angle model. Parida and Maity [14] discovered an easy and simple model for heating the work-piece by flame heating with study. They studied the influences of speed of cutting, feed rate, and temperature on cutting force and specific energy. Nickel based alloy was examined in room temperature and high-temperature conditions during the turning process with the aid of DEFORM software. A respectable correlation between the numerical and experimental results was achieved. The results indicated that energy of performing the machining process and cutting force in the case of hot processing is less than the case of room temperature condition. Therefore, the shear stress with heating reduce gradually. Moghanlou et al. [15] studied the heat transfer, temperature distribution, and maximum temperature for cutting processes in diboride-based materials such as HfB₂, ZrB₂, and TiB₂ as well as HfB₂-20 vol% SiC, ZrB₂-20 vol % SiC and TiB₂-20 vol% SiC composites by using COMSOL Multiphysics software. The results indicated that the rising slope of temperature for HfB₂ is higher than those of ZrB₂ and TiB₂ where the lowest maximum temperatures were achieved for ZrB₂-SiC and TiB₂-SiC composites materials that leads to increase the cutting speed. Maximum temperature reduces with SiC addition in all cases of diborides which causes an increase in cutting speed and efficiency. Zhang et al. [16] investigated a different technology for drilling with the ultra high speed diamond tool which can accomplish a high penetration rate with minor power. ABAQUS program was used to investigate the influence of ultra high cutting velocity on the rock break performance and heat of cutting. It is indicated that the heat flux and specific energy drop with the increase of the rotary speed at cutting speed exceeds equals to 8 m/s. Fernandes et al. [17] studied thermal conductivity enhancement of a novel cemented carbide cutting tool during the design and building processing by using COMSOL Multiphysics software. It is concluded that WC-Co/Cu achieved 127 W/m•K for the thermal conductivity and this value is upper than WC-Co thermal conductivity that follow the number of 36 W/m•K. Thermal conductivity increasing as indicated to be more effective with the method specially for the cut zone vicinity. Xia and Gillespie [18] used the quasi static method for modelling the workpiece chip thermal distribution at equilibrium conditions and the heat transfer equation is solved by an in-house Multiphysics FEM solver, FenicsSolver. Periodic boundaries were chosen for study the shear plane and that decreases the temperature and velocity change without extra mesh refinement. The boundaries of the straight chip decrease the heat flux resulted from the non realistic material flow crossing the air material. From the above mentioned previous literature review, it is indicated that many papers studied the temperature distribution in cutting tool experimentally with the aid of COMSOL or some other softwares. Also, some researchers investigated the effect of heat flux and the maximum temperature on cutting tools for Al₂O₃ and steel. ANSYS software wasn't utilized for studying the temperature distribution. In addition, fewer papers studied the cutting of diboride materials.

Therefore, in this study, a numerical approach by using ANSYS software for the first time will be utilized to study the temperature distribution and heat transfer parameters in cutting tool fabricated from Aluminum-Oxide, Zirconium Diboride, Titanium Diboride and Titanium Nitrite. The effect of changing the type of the material of the cutting tool will be investigated on four materials. The heat transfer characteristics and temperature distribution to determine the minimum, maximum, and optimum values of the temperature of the cutting tool have been investigated. The effect of the cutting speed on the temperature of the cutting process will be investigated while the speed will be varied from 180 to 220 m/min and feed rate will be studied with three different values such as 0.138, 0.277, and 0.554 mm/rev. The study of cutting tool life with the different type of materials will be introduced. An optimization will be performed to determine the superlative cutting tool and the machining parameters.

2 Materials and methods

In this research, the temperature and heat flux distribution in cutting tool processing four materials (Al₂O₃, ZrB₂, TiB₂, TiN) have been examined. Two diboride materials will be utilized as they have good properties such as wear-resistance and withstand against ultra-high temperatures as seen in Table 1. The workpiece and the tool holder are made from the AISI1045 steel with properties as stated in Table 2.

Table 1. Specifications of the cutting tool materials.

Material	Chemical form	Density kg/m ³	K W/m•K	CP J/kg•K
Aluminum oxide	Al ₂ O ₃	3950	12	651
Zirconium diboride	ZrB ₂	6080	18	587
Titanium diboride	TiB ₂	4520	24	554
Titanium nitrite	TiN	5400	27	327

Table 2. Properties of workpiece and tool holder materials.

AISI1045 steel properties	Value	Unit
Density	7870	kg/m ³
Thermal conductivity	51.9	W/m•K
Tensile strength	585	MPa
Yield strength	450	MPa
Poisson's ratio	29	

2.1 Geometry of the tool

Figure 1 shows the 3D model of a cutting tool consisting of insert, shim, and tool holder, where the shim is positioned between the insert and the tool holder. SOLIDWORKS software was used to construct the three-dimensional model that was utilized in the tests. The specific dimensions of the insert and the holder are similar to the model utilized in [12] are illustrated in Figure 2 and Figure 3 where the elevation and side views as well as the plan view show the thickness of the inserts with 4.7 mm and about 110 mm length of the steel holder.

2.2 Physical model

The model was drawn by SOLIDWORKS software then the ANSYS fluent software was utilized to set up the boundary conditions and the simulation performed to obtain the heat flux between the insert and the workpiece and temperature distribution.

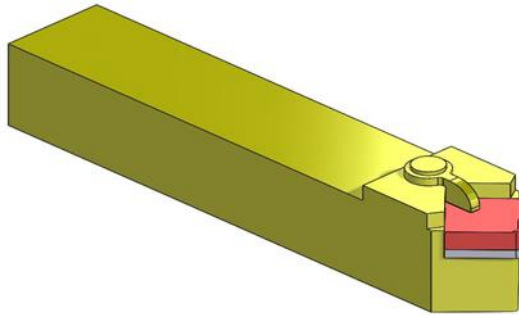


Figure 1. Three dimensional model of the geometry of insert and cutting holder.

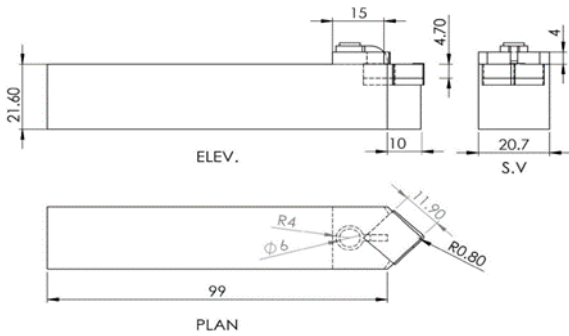


Figure 2. The dimensions of the cutting tool with insert and tool holder.

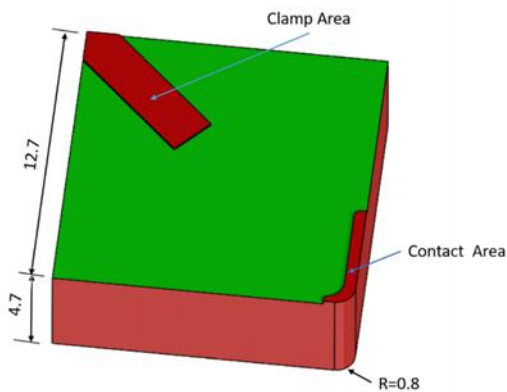


Figure 3. Dimensions of the insert and contact area between the inset and the workpiece.

2.3 Meshing

The unstructured meshing was chosen for the computational domain because of the complexity of the model. The mesh generation in the regions of heat flux and clamp area have refinement to increase the quality of the grids. Simulation results can be seen in Figure 4 and Figure 5. To confirm the solution independency of the mesh, the

grid-dependency is checked for three different grids: 456187, 625471, and 820142 cells, respectively. It is indicated that there is no difference in results between the second and the third configurations, so that the number of 625471 cells was chosen for the simulation. The specific details of the meshing of the insert were indicated in Figure 6.

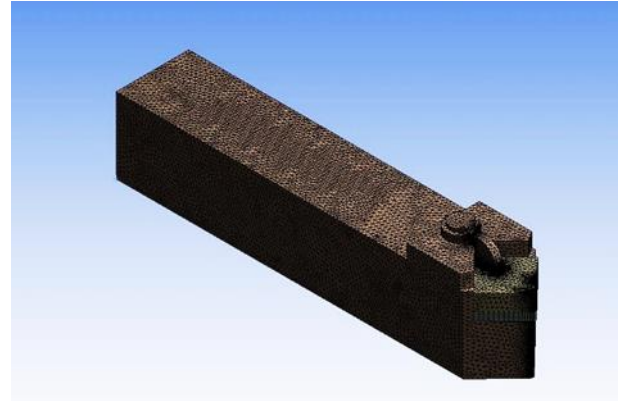


Figure 4. 3D of mesh generation grids.



Figure 5. Elevation view of the grid generation.

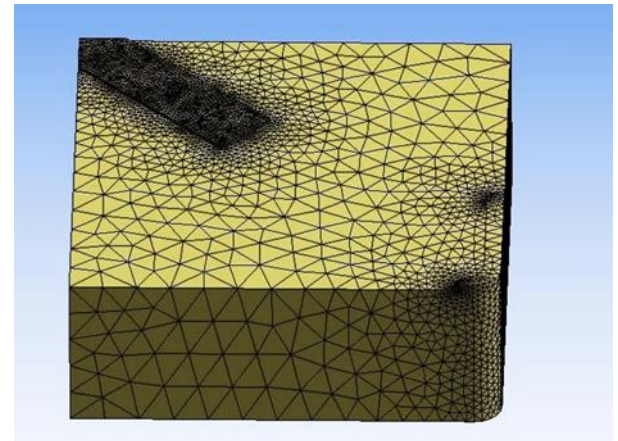


Figure 6. Mesh generation of the insert.

2.4 Governing equations

Heat conduction equation that describes the thermal model can be determined by the nonlinear transient three-dimensional diffusion as given in Equation (1):

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (K \nabla T) + \phi \quad (1)$$

where t is the time in second and T is the temperature in Kelvin unit while K expresses the thermal conductivity in

$W/m \cdot K$ and C_p indicates the specific heat in $J/kg \cdot K$ and ρ determines the density of the material in kg/m^3 , ϕ is the radiative source term (W/m^3).

Heat convection and radiation can be calculated by the following relation:

$$-K \frac{\partial T}{\partial n} = (T - T_{\infty}) + \sigma \varepsilon (T^4 - T_{\infty}^4) \quad (2)$$

Heat flux was applied for the contact between the insert and the workpiece can be determined by:

$$\dot{q} = C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

Where the equation of the heat flux that was used in the User Defined Function (UDF) code generated by excel software:

$$\dot{q} = .4926t^5 - 97.19t^4 + 6914t^3 - 232532t^2 + 4000000t + 10000000 \quad (4)$$

The cutting tool life can be calculated based on the cutting speed and parameter constants by the following Taylor's Formula:

$$v t^n = C \quad (5)$$

where v is the cutting velocity, t is the cutting tool life in minute. The parameters of n and C depend on feed, cutting depth, workpiece and cutting tool materials. n is the plot slope and C is the interrupt on the velocity axis at one-minute of tool life.

2.5 Boundary and initial condition

To simulate the heat transfer and temperature distribution for cutting, the heat flux equation at the connection zone between the insert and the workpiece was generated by excel program from the study [10] and [12]. UDF in ANSYS fluent was utilized to determine the boundary of the heat flux at the flux area according to the equation of flux. All the outer surface of the cutting tool was performed as a heat convection boundary equation where the surfaces between the insert and the holder was established as conduction heat transfer. The next assumptions are used for the simulations:

- At the initial condition, the cutting insert, shim, and cutting holder have room temperature which is equal to 300 K.
- Heat flux was applied at the contact area interface according to the heat flux Equation (4) at $t = 0$ s.
- The cutting process continues up to 60 seconds and then the heat load is removed.
- The heat transferred by conduction between the tool-shim and tool-holder interface.
- The cutting speed was changed from 180 to 220 m/min and the feed-rate has three different values such as 0.138, 0.277, and 0.554 mm/rev.

2.6 Validation

For validation of the simulation results, the heat flux of the present study was compared with the previous studies [10] and [12] as seen in Figure 7. The temperature of the insert as an average value was compared with the same studies as shown in Figure 8. It is indicated that the deviation between the results is very limited. Therefore, the present numerical results have enough realistic accuracy. The regular differences between numerical and previous results for heat flux are around 4.32%. The highest dissimilarity for heat fluxes 7.51% and the smallest dissimilarity is 2.31%. The validation results explained that the differences between the numerical and the experimental results are acceptable where the regular differences between numerical and previous results for average temperature is around 3.21%. The highest dissimilarity for average temperature is 6.01% and the smallest dissimilarity is 1.54%. In general, the differences are acceptable for simulation errors.

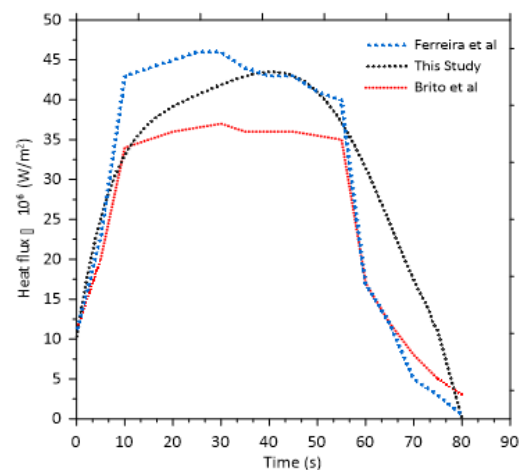


Figure 7. Comparison between the numerical results and the previous studies of Brito [10] and Ferreira [12] for the heat flux.

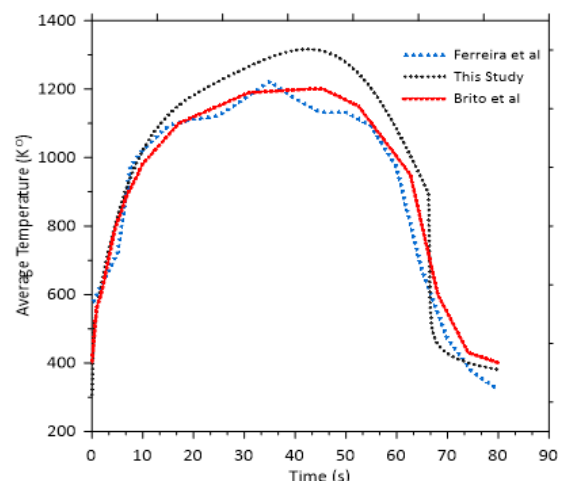


Figure 8. Comparison between the numerical results and the previous studies of Brito [10] and Ferreira [12] for the average temperature.

3 Results and discussions

In this section, the results obtained to estimate the heat flux, temperature distribution, maximum, and minimum temperature by using the inverse function of heat flux with the use of software ANSYS FLUENT have been analyzed. At the beginning of the process, the cutting tool and holder were found at uniform room temperature. The cutting machining continues up to 60 seconds which is enough for reaching the steady-state and the maximum temperature can be determined. Heat flux is applied on the tool then the cutting is stopped and the cutting tool moves off the workpiece.

3.1 Temperature variation with time

Figure 9 shows the average temperature of the contact area during the cutting for Al_2O_3 , ZrB_2 , TiB_2 , and TiN . It is indicated that the aluminum oxide achieved the highest temperature for the following figure about 1100 K comparing to other insert materials where the Titanium Nitrite scored the lower values of temperature as near to 900 K.

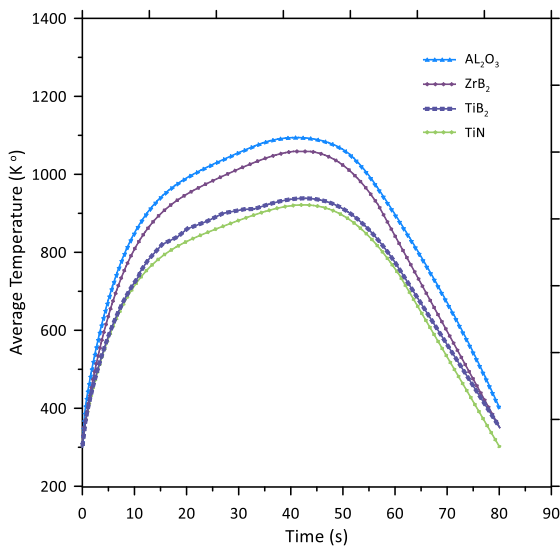


Figure 9. The average temperature of the contact area during the cutting of various materials.

The temperature begins to increase when the heat flux was applied until it reaches the maximum values near 50 seconds from the starting of the machining process. The temperature begins to decrease when the cutting tool goes away from the workpiece and there is no heat flux. It is indicated that the Zirconium diboride and Titanium diboride experienced lower average temperatures than aluminum oxide because of the low thermal conductivity of diboride materials. As it was mentioned, maximum temperature affects the machining speed and the productivity rate. Figure 10 shows the maximum temperature of different materials aluminum-oxide, Zirconium diboride, Titanium diboride, and Titanium nitrite. It is indicated that the ZrB_2 and TiB_2 have improved performance and can work at higher speeds and increase the productivity. The minimum temperature for the face of the insert at the heat flux was directed for the

aluminum-oxide, Zirconium diboride, Titanium diboride and Titanium nitrite was illustrated in Figure 11. The maximum temperature for aluminum oxide is 1300 K, where the Titanium nitrite achieved 1100 K. At first, the applied heat flux heats the tip of the tool, and then the thermal heat is dispersed in the cutting tool as time passes. The tool's hot point is the chip interface at any given time. The contours reveal that most holder feels a change in temperature at low temperature. By conduction, the bulk of the produced heat is transmitted to the cutting holder and shim. This can also be inferred that the tool holder's higher mass has resulted in lower temperature increase within it. Radiation is essential, and the maximum heat losses are related to the radiation after the conduction process.

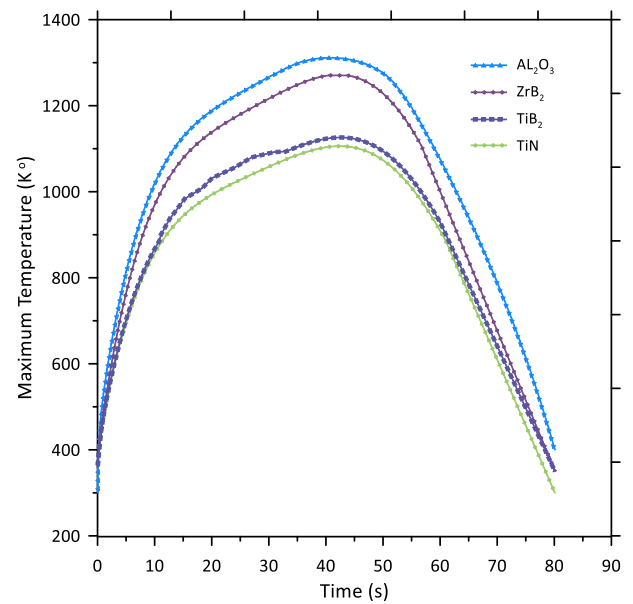


Figure 10. The maximum temperature of the contact area during the cutting of various materials.

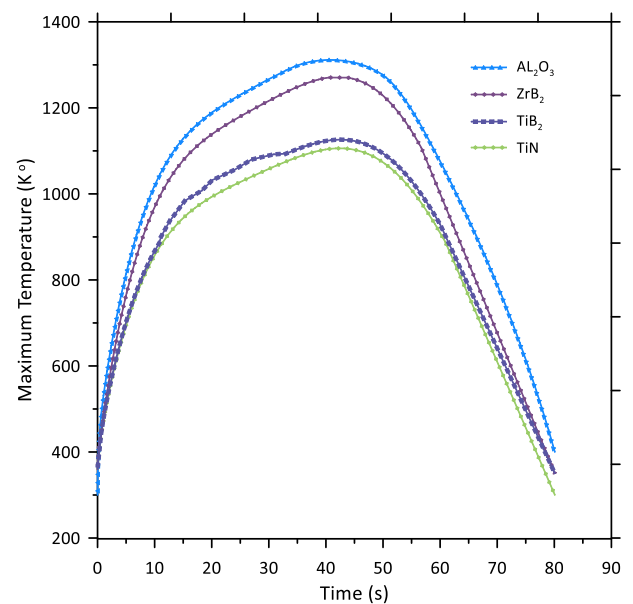


Figure 11. The minimum temperature of the contact area during the cutting of various materials.

3.2 Influence of cutting conditions in the temperature estimation

Cutting speeds lead to change the temperature distribution changes as seen in Figure 12. The temperature gradually increases with the rise of cutting speed for all the materials. The smallest temperature was attained at a speed of 180 m/min and the maximum temperatures were achieved at a cutting speed of 220 m/min. It can be observed that the TiN material is the better choice comparing to the other materials depending on the temperature distribution versus the cutting speed. As the TiN achieved a better performance than the other materials, the feed-rate (FR) of the cutting tool with TiN was studied. The relation between the temperature and the FR of the cutting tool for TiN is given in Figure 13. The higher the feed rate the higher the contact temperature of the interface. This behavior is due to higher feed rates and higher strain rates in primary and secondary shear zones.

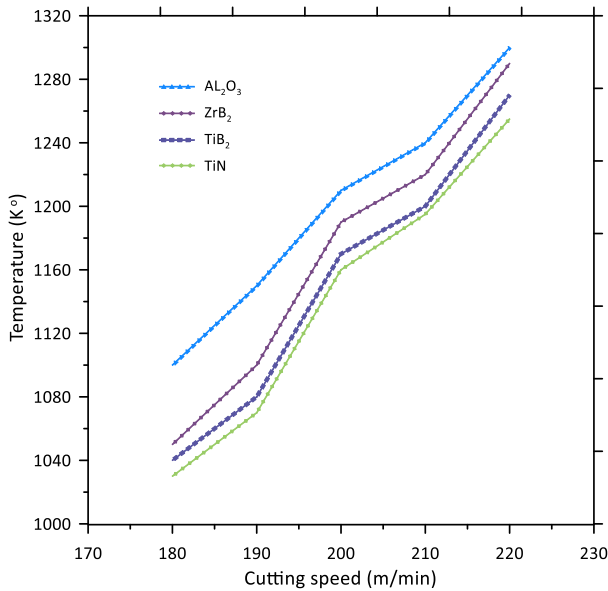


Figure 12. The relation between the temperature and the cutting speed of the cutting tool.

3.3 Influence of cutting speed on the cutting tool life

The cutting tool life can be determined by many ways such as fracture failure that can be explained as brittle fracture is exposed to extreme cut force, temperature failure while cut temperature is very high, and steady wear where the losses of cutting tool shape and efficiency lead to steady tool wear. In this study, the temperature failure will be used to determine the cutting tool life. Figure 14 shows the relation between the cutting tool life and cutting speed for various materials such as Aluminum-oxide, Zirconium diboride, Titanium diboride, and Titanium nitride. Cutting tool life decreased with the increase of the cutting speed. The rise in cutting speed leads to an increase in removal materials where the temperature increases rapidly. The Titanium diboride achieved the maximum tool life comparing to cutting tools with the other materials. The maximum cutting tool life is indicated at 180 m/min with 59, 52, 45, and 32 min for Aluminum-oxide, Titanium nitrite, Zirconium diboride, and Titanium diboride, respectively. High

temperature was created by the increased cutting speed, which resulted in a rapid deterioration of the quality of the ceramic tool material and the cutting edge was then easily chipped by the cutting force.

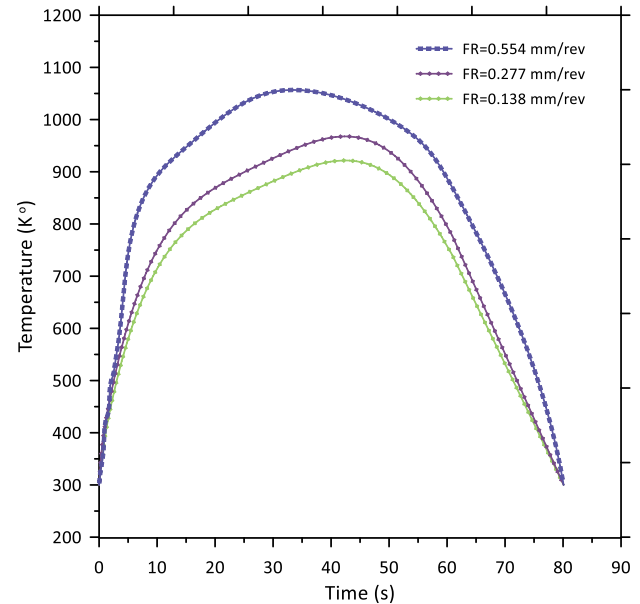


Figure 13. The relation between the temperature and the feed-rate (FR) of the cutting tool for TiN.

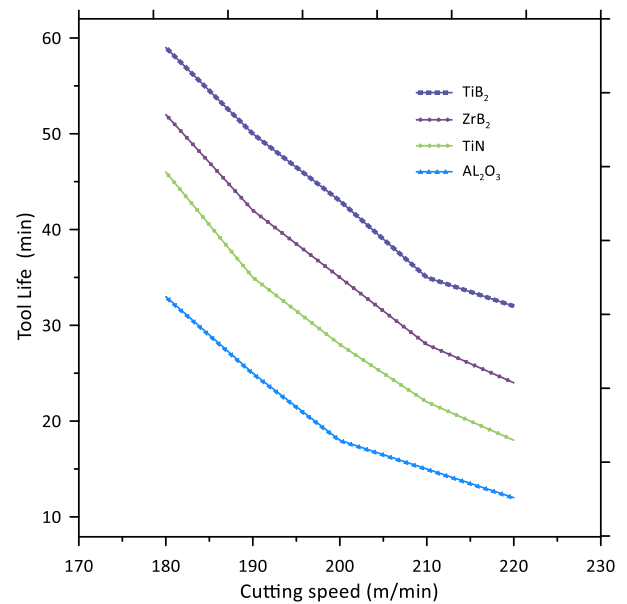


Figure 14. The relation between the cutting tool life and cutting speed for various materials.

3.4 Temperature distribution

The temperature distribution of insert, shim, and tool holder at 5 s from the starting of the cutting process is illustrated in Figure 15. It is indicated that the maximum temperature appeared at the connection surface between the insert and the workpiece where the heat flux effects directly on the insert. It can be shown that most of the body of cutting holders have temperature equals to 300 K and this means that the heat does not reach all the regions of the holder.

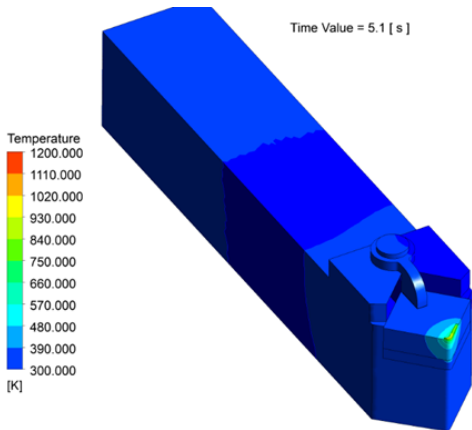


Figure 15. Contour of the temperature at 5 seconds.

Figure 16 shows the temperature distribution of the cutting tool at 20 s from the starting of the machining operation. The temperature distribution of the cutting tool at 30 s, 40 s, and 50 s are illustrated in Figure 17, Figure 18 and Figure 19, respectively. It is indicated that the temperature rises with time for the insert and the heat transfer by conduction through the insert and then to the tool holder. The results show that the contours of the temperature field are similar for the contours of the previous studies obtained at the studies [10] and [12]. The heat transferred by convection from the outer surfaces to the surrounding leads to reduce the temperature of the body of the holder. At the start, the tooltip was warmed by the applied heat flux, and then with the time spending, the thermal energy is dispersed in the tool. The tool's hot points are the points controlled by the devices at any moment. The simulation contours indicate that maximum holder practices a change in low temperature. The temperature profile increases more rapidly, and the average temperature values are reached prior than the reference case for a uniform heat distribution. The maximum interface temperature is found to rely heavily on the average heating intensity based on the estimation of two changed heating distributions. The first one of a stretched friction region leads to a lower average interface temperature, although for the second heating distribution the significantly lower peak temperature is in an upstream position.

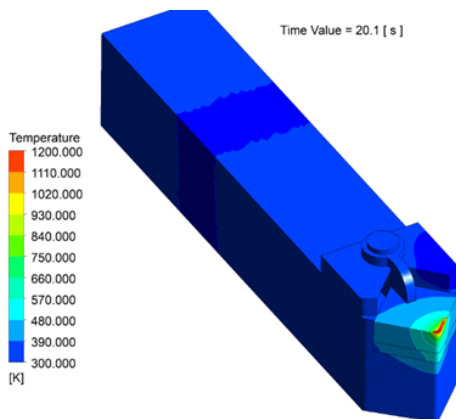


Figure 16. Contour of the temperature at 20 seconds.

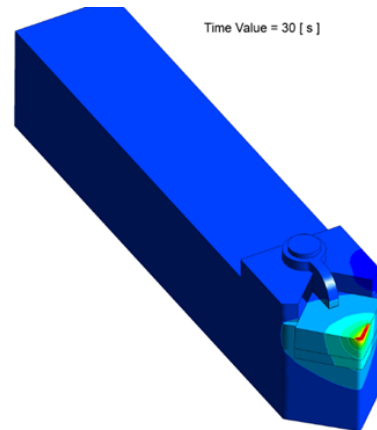


Figure 17. Contour of the temperature at 30 seconds.

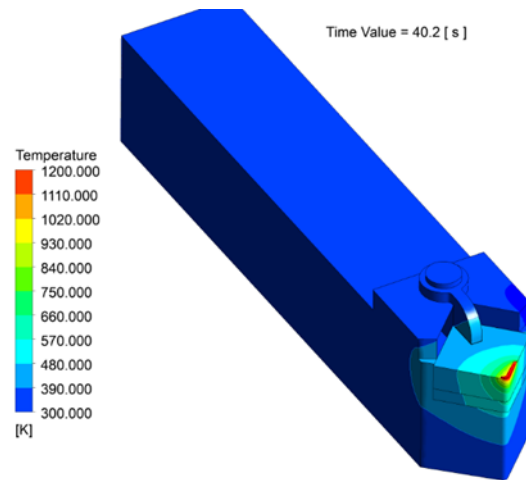


Figure 18. Contour of the temperature at 40 seconds.

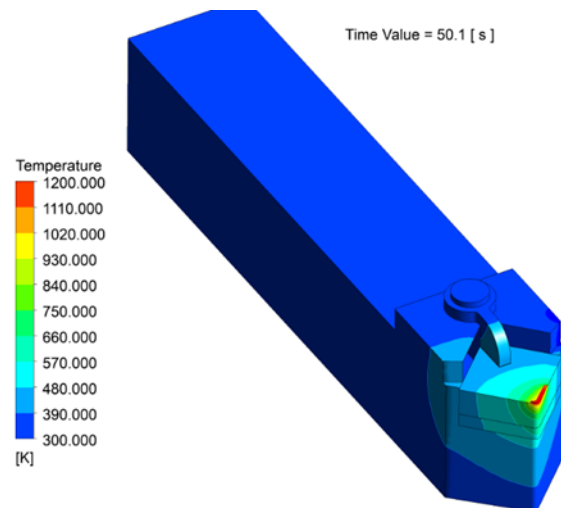


Figure 19. Contour of the temperature at 50 seconds.

4 Conclusions

In this study, the temperature distribution of insert, shim, and tool holder for various materials have been investigated depending on the heat flux of the contact surface of the heat generation. The UDF and ANSYS FLUENT were joined to

specify the heat flux and temperature distribution. The various materials are utilized in this study such as Al_2O_3 , ZrB_2 , TiB_2 , and TiN to indicate the effect of diboride content improvement in cutting machining operation. The machining parameters such as the cutting speed varied from 180 to 220 m/min and feed rate with three different values such as 0.138, 0.277, and 0.554 mm/rev were investigated. The study of cutting tool life with the different materials was introduced. The results can be concluded in some points as:

- It is indicated that the aluminum oxide achieved the highest temperature following the number about 1100 K comparing to other insert materials where the Titanium nitride scored the lower values of temperature with the number near to 900 K.
- It is observed that the minimum temperatures were attained at a cutting speed of 180 m/min and the maximum temperatures were achieved at a cutting speed of 220 m/min.
- The increase in cutting speed contributes to a rise in removal materials where the temperature is growing exponentially.
- Comparing to cutting tools with other materials, the TiN material achieved good behavior with cutting speeds of 180 m/min and 0.138 mm/rev.
- The Titanium diboride obtained the highest tool life so that the optimization process indicated that the TiB_2 is the respectable choice with machining parameters (cutting speed as 180 m/min, and feed rate as 0.138 mm/rev) where the temperature distribution is acceptable.

5 Future study

The study of the temperature and heat flux distribution for the cutting material and workpiece from mixing powders may be advised for the future studies.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 6%

References

- [1] S. Lo Casto, E. Lo Valvo, M. Piacentini, V. F. Ruisi, E. Lucchini and S. Maschio, Cutting Temperatures Evaluation in Ceramic Tools: Experimental Tests, Numerical Analysis and SEM Observations, *CIRP Annals*, 43, 73-76, 1994. [https://doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)62167-2](https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)62167-2).
- [2] J. Rech, J. L. Battaglia and A. Moisan, Thermal influence of cutting tool coatings, *Journal of Materials Processing Technology*, 159, 119-124, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.414>.
- [3] W. Grzesik, Determination of temperature distribution in the cutting zone using hybrid analytical-FEM technique, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46, 651-658, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.07.009>.
- [4] E. Ceretti, L. Filice, D. Umbrello and F. J. C. a. Micari, ALE simulation of orthogonal cutting: a new approach to model heat transfer phenomena at the tool-chip interface, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56, 69-72, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.05.019>.
- [5] R. Kountanya, Cutting tool temperatures in interrupted cutting—The effect of feed-direction modulation, *Journal of Manufacturing Processes*, 10, 47-55, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2009.04.001>.
- [6] R. F. Brito, S. R. d. Carvalho, S. M. M. d. Lima e Silva and J. R. Ferreira, Thermal analysis in coated cutting tools, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36, 314-321, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.01.009>.
- [7] K. Kadirgama, M. Noor, K. Abou-El-Hossein, H. Habeeb, M. Rahman and B. Mohamad, Effect of dry cutting on force and tool life when machining aerospace material, *International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering*, 4, 1222-1226, 2010. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1073217>.
- [8] S. Shu, K. Cheng, H. Ding and S. Chen, An Innovative Method to Measure the Cutting Temperature in Process by Using an Internally Cooled Smart Cutting Tool, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 135(6), 2013. <https://doi.org/10.1115/1.4025742>.
- [9] S. Pervaiz, I. Deiab, E. M. Wahba, A. Rashid and M. Nicolescu, A Coupled FE and CFD Approach to Predict the Cutting Tool Temperature Profile in Machining, *Procedia CIRP*, 17, 750-754, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.01.104>.
- [10] R. F. Brito, S. R. Carvalho and S. M. M. Lima E Silva, Experimental investigation of thermal aspects in a cutting tool using comsol and inverse problem, *Applied Thermal Engineering*, 86, 60-68, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.03.083>.
- [11] Y. Zhang, Y. Yang, Q. Li and Y. Li, Study on heat transfer model of coolant boundary layer during high speed cutting process, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 114, 1304-1313, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.07.030>.
- [12] D. C. Ferreira, E. d. S. Magalhães, R. F. Brito and S. M. M. Lima E Silva, Numerical analysis of the influence of coatings on a cutting tool using COMSOL, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97, 1305-1314, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1855-7>.
- [13] S. Berezvai, T. G. Molnar, A. Kossa, D. Bachrathy and G. Stepan, Numerical and experimental investigation of contact length during orthogonal cutting, *Materials Today: Proceedings*, 12, 329-334, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.03.131>.
- [14] A. K. Parida and K. Maity, Numerical and experimental analysis of specific cutting energy in hot turning of Inconel 718, *Measurement*, 133, 361-369, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.10.033>.
- [15] F. Sadegh Moghanlou, M. Vajdi, J. Sha, A. Motallebzadeh, M. Shokouhimehr and M. Shahedi Asl, A numerical approach to the heat transfer in monolithic and SiC reinforced HfB₂, ZrB₂ and TiB₂ ceramic

- cutting tools, *Ceramics International*, 45, 15892-15897, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.05.095>.
- [16] M. Gao, K. Zhang, Q. Zhou, H. Zhou, B. Liu and G. Zheng, Numerical investigations on the effect of ultra-high cutting speed on the cutting heat and rock-breaking performance of a single cutter, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 190, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107120>.
- [17] B. Guimarães, C. M. Fernandes, D. Figueiredo, M. F. Cerqueira, O. Carvalho and F. S. Silva, A novel approach to reduce in-service temperature in WC-Co cutting tools, *Ceramics International*, 46, 3002-3008, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.09.299>.
- [18] Q. Xia and D. R. H. Gillespie, Quasi-static finite element modelling of thermal distribution and heat partitioning for the multi-component system of high speed metal cutting, *Journal of Materials Processing Technology*, 275, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116389>.





Comparison of mechanical and geometrical properties of octet lattice structures using the electron beam melting

Elektron ışın eritme yöntemi kullanılarak sekizli kafes örgü yapıların mekanik ve geometrik özelliklerinin karşılaştırılması

Bilçen Mutlu Mitil^{1,*} 

¹ Marmara University, Mechanical Engineering Department, 34722, İstanbul Turkey

Abstract

Additive manufacturing methods allow to produce complex geometries such as lattice structures. Aim of this study is to identify octet truss lattice structure's mechanical capabilities. Firstly, octet truss structure designed and used to fill specimens. Specimens 1, 2 and 4 with wall and lattice structure, specimen 3 only with lattice structure and also a filled specimen are modelled. Modelled tensile specimens are additively manufactured from Ti-6Al-4V with Electron Beam Melting method. A comparison between specimens having same structural design (1, 2 and 4) has been made to gain insight about consistency of EBM method. Tensile experiments have been made with all of the specimens and tensile strength difference that can be considered significant determined among specimen 1, 2&4. Specimen 3 resulted not to be a practical approach as it showed poor tensile strength values. Lastly, tensile stress results of filled specimen are shared and compared with the other types of specimens. These results are providing a good sight for assessment of both octet truss structure and EBM manufacturing technology.

Keywords: Lattice structures, Octet truss, Ti-6Al-4V, Additive manufacturing

1 Introduction

3D printing of metals, additive manufacturing (AM), is a process that produces 3-dimensional geometries layer-by-layer until the whole shape is acquired. This technology gives the opportunity to manufacture complex geometries. With this opportunity, much more optimized part designs can be achieved especially in terms of weight reduction. Different requirements of different designs resulted appearing of various types of AM methods. One of these AM methods is powder bed fusion (PBF). It offers great dimensional accuracy in producing complex-shaped parts as can be seen in [Figure 1](#).

Electron Beam Melting is a type of PBF manufacturing. It differs from the other PBF systems with its energy source. Most of the other systems are using laser as an energy source while EBM uses electron beam. An advantage of EBM process over the other PBF processes is lower residual stress effect on the parts [2, 3]. Considering residual stresses

Özet

Katmanlı üretim yöntemleri, kafes yapıları gibi karmaşık geometrilerin üretimine izin veren yeni bir teknolojidir. Bu çalışmanın amacı sekizli kafes yapısının mekanik özelliklerini belirlemektir. İlk olarak, kafes yapısı oluşturulmamış ve tamamen dolu bir numune kullanılmıştır. 1,2 ve 4 numaralı numuneler duvar kalınlıkla kafes yapıdan modellenmiş, yalnızca 3 numaralı numune duvar kalınlıklı sekizli kafes yapısından oluşturulmuştur. Modellenen çekme numuneleri, Elektron Işını Eritme yöntemi ile Ti-6Al-4V'den malzeme kullanılarak üretilmiştir. EBM yönteminin tutarlılığı hakkında fikir edinmek için aynı yapısal tasarıma (1, 2 ve 4) sahip numuneler arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. 1, 2 ve 4 numaralı numuneler arasında önemli sayılabilecek gerilme mukavemeti farkı belirlenmiştir. Numune 3, zayıf gerilme mukavemeti değerleri göstermiştir. Son olarak, doldurulmuş bir numunenin çekme gerilmesi sonuçları paylaşılmış ve diğer numunelerin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlar hem sekizli kafes yapısı hem de EBM üretim teknolojisinin değerlendirilmesi açısından önemlidir.

Anahtar kelimeler: Kafes yapıları, Sekizli örgü kafes yapılar, Ti-6Al-4V, Eklemeli imalat

mostly effects the fatigue life of the parts, this advantage of EBM makes it more attractive than the other PBF methods.

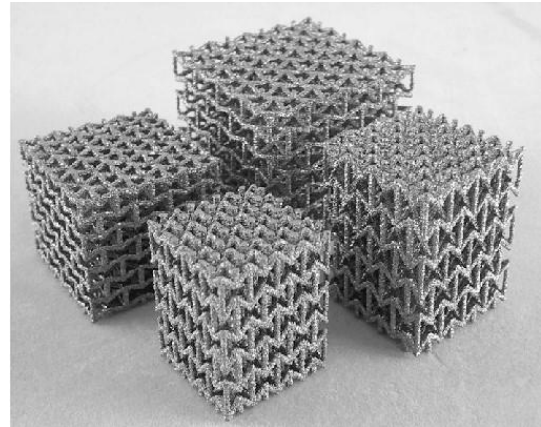


Figure 1. EBM produced lattice structures [1]

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: bmutlu@marmara.edu.tr (B. Mutlu Mitil)
Geliş / Received: 08.04.2021 Kabul / Accepted: 11.08.2021 Yayınlanma / Published: 14.01.2022
doi: 10.28948/ngumuh.911834

Octet truss structures have not been thoroughly explored in the past, and, hence, we chose to conduct this study [4-12]. The octet truss lattice structure is illustrated in Figure 2. Fuller (1961) researched this structure and prepared the most detailed report of its properties [13]. The octet truss was offered as a method of 3D field filling with an efficient truss structure in a variable cell size. The nodes form a specially defined face-centred cubic structure, as shown in Figure 2(b).

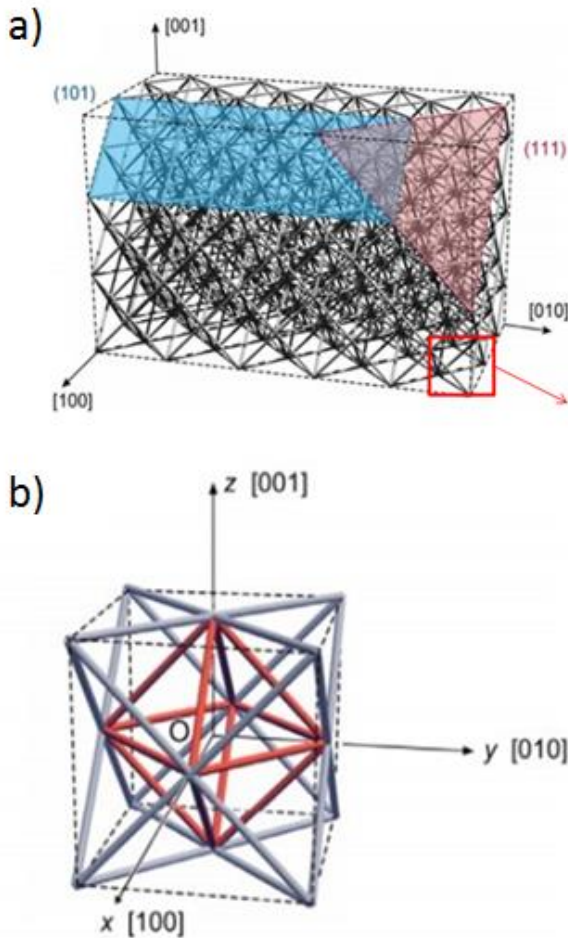


Figure 2. (a) 3D packaging of unit cells constructing an octet truss. (b) A centric octahedral cell composed of 12 struts that have 8 tetrahedrons at their boundaries. This composes a unit cell of the face-centred cubic crystal-symmetry in the octet truss lattice. The intersection of 12 struts is a node of the octet truss [8].

Dong et al. (2015) used snap-fit and vacuum brazing method in order to produce 2% to %16 relative density octet-truss lattice structures from Ti-6Al-4V sheets. The study proved that octet-truss structures performs better than mechanical properties over other cellular materials [8]. Deshpande et al. (2001) [9] made a research on aluminium alloy casted octet-truss structures and the results showed that these structures can be alternative against metallic foams with the aim of obtaining lightweight structures [9]. It is extremely efficient to use lattice structures comprising octet trusses for the production of high-density materials, as they

provide high performance [14]. Li et al. (2008) [15] studied lattice block which is investment casted with aerospace quality. Experiments under compression, bending and impact points that high strength and ductility can be reached [15]. Figure 3 illustrates the raw material Ti-6Al-4V, Al-7Si-0.3Mg [9], and Ti-6Al-2Sn-4Zr2Mo alloys [15, 16], for the space modelling lattice structures under the density-dependent modulus of compression load and foams with low density (metal, polymer, and alumina).

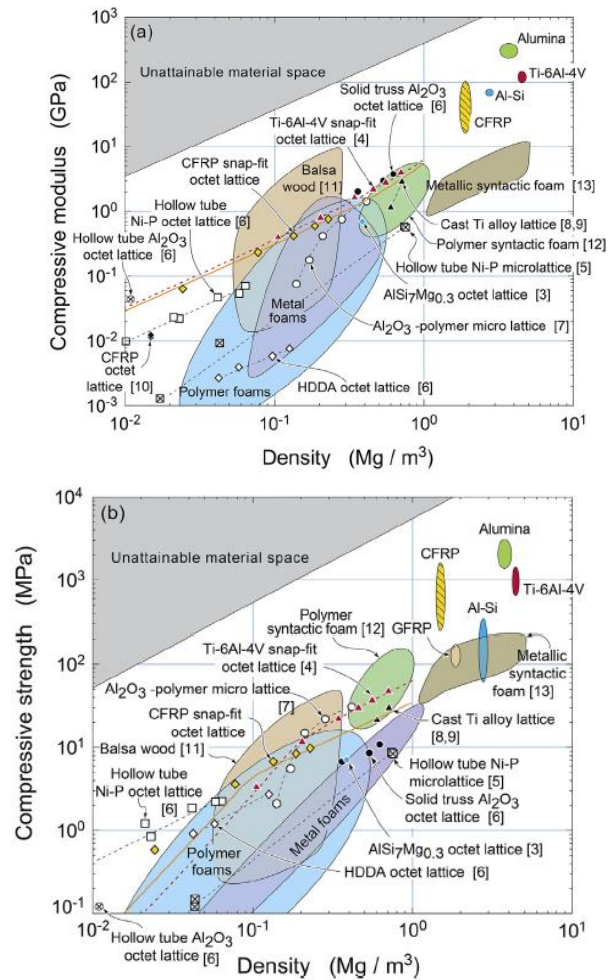


Figure 3. Comparison charts of material (a) stiffness and (b) strength under compression against density (Mg/m^3). Zones that cannot be achieved under ambient conditions are indicated by the grey shaded areas [7].

Similar structures produced by electrodeposition of Ni-7P [17, 18], were manufactured from carbon-fibre laminate composites [19] produced by investment casting methods. The modules and strengths of the foams and lattices were scaled by the raw materials [20]; however; foams are essentially more malleable and weaker than their topological counterparts (made from the same material and density). Metal alloys with low density at millimeter intervals are useful structures for strut-diameter lattice structures in stress-assisted aerospace industries [9] and 3D additive production methods [21, 22]. However, the strength to weight ratio of

aerospace materials must be extremely high; therefore, these operations remain difficult. Aluminium and magnesium alloys are widely used in this industry. As the strength-weight ratio of titanium alloys is twice or more times better than aluminium alloys, there is a special interest in these alloys in order to produce octet truss structures. In addition, numerous titanium alloys can easily exceed the limits of aluminium or magnesium-based light metal alloys at continuous service temperatures [23]. Another advantage of titanium alloys is their high corrosion strength, and they are widely used in chemical processing equipment for this reason [24]. Ti-6Al-4V is the most comprehensively used titanium alloy and makes up half of the total titanium use [24]. Its main use in aircraft structural components and turbine engines is in fasteners [25, 26]. Titanium alloy lattice structures are manufactured by using investment casting methods to provide aerospace-quality standards [27,16].

The price and confusion of the titanium investment manufacturing process is excessive, and hence, there is insufficient data on the mechanical properties of titanium-based lattice structures as functions of relative density [27,28].

This study is focusing on tensile properties of octet-truss lattice structures which built with EBM. Experiments made on five specimens that fabricated at the same time in the machine. Three specimens (1,2,4) containing wall along with the lattice structure and specimen 3 do not have any addition, only lattice structure. Also a filled specimen without any pores. Purpose of producing specimens 1,2 and 4 from same CAD model is measuring consistency of EBM machine and process parameters. With the aim of determining effect of wall addition to the specimens, a comparison made between specimen 1 and specimen 3. After that, both types of specimens compared with filled specimen. Numbers of specimens are meaningless as they were given to the specimens with the order of taking out from machine plate. The article should include main titles such as Abstract, Introduction, Material and methods, Results and discussion, Conclusions and References.

2 Material and methods

2.1 Electron beam melting process

All the specimens in this research were produced with ARCAM Q20. It is an EBM machine with production volume of Ø350×380 mm and is suitable for the production of critical parts, such as turbine blades for airplanes. The electron beam melting is fully capable of producing dense metal parts. A strong electron beam (7 kW) is used to form a layer by melting the metal powders in accordance with the geometry obtained from the 3D CAD model. The 3D CAD model of the piece is divided into 2D slices, usually 0.1–0.07 mm thick, with special software. The arithmetic mean surface roughness Ra is approximately 25–35 mm [28,29]. The electron beam melting process works according to the kinetic energy principle of electrons. The electrons emitted from the filament accelerate towards a very high-speed building platform by forming an electron beam. When these electrons collide with the metal powder, the speed of the electrons decreases and the kinetic energy is transformed

into thermal energy to generate heat, which melts the dust particles. The electron beam is formed in an electron beam gun comprising an anode, a cathode, and electromagnetic focus and deflection units. This gun heats up and emits electrons when the electric current passes through the tungsten filament (cathode). In the meantime, 60,000 V is applied to the anode at the bottom of the filament and the extremely high potential voltage difference helps accelerate the electrons from the filament in the desired direction [30]. The resulting beam is then focused on the electromagnetic coil with the help of the focus. Then, the beam is deflected by the deflection coil to special areas on the building platform at scan speeds as high as 8,000 m/s. In a previous study, the scan rate was reported as 1,000 m/s [31]. An astigmatism coil helps to keep the beam in focus, regardless of its position on the build platform. Without the coil, the beam tends to extend from the building region to the edge, thus extending to a wider area. The whole process is conducted under vacuum. This vacuum environment overlaps the ions with those that may act as obstacles and cause the electron beam to dissipate [32, 33]. Figure 4 illustrates the components of the EBM process [34,36].

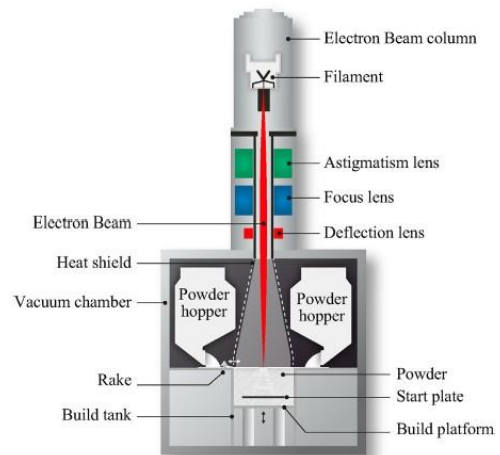


Figure 4. Main components of EBM process [30-38].

2.2 Material properties

Titanium alloys are commonly used in additive manufacturing technologies. In addition, titanium alloys are the most widely used materials in aerospace industries. These alloys are light-weight, and exhibit good corrosion resistance along with high strength properties. Hence, we chose to use Ti-6Al-4V in our study. According to the manufacturers, the delivered materials should have the mechanical properties listed in Table 1.

Table 1. Key mechanical properties for EBM-produced components [37]

	EBM as-built
Yield Strength (MPa)	950
Ultimate Tensile Strength (MPa)	1020
Elongation to Fracture (%)	14
Hardness (HV)	327
Elastic Modulus (GPa)	120

3 Experimental setup

3.1 Modelling the specimen

In this study, the specimen was modelled with SpaceClaim [39]. First, a unit octet truss geometry was modelled, as shown in Figure 5. This unit geometry was duplicated to fill the specimen. According to the dimensions given in Table 2, the specimen modelled and shown in Figure 6.

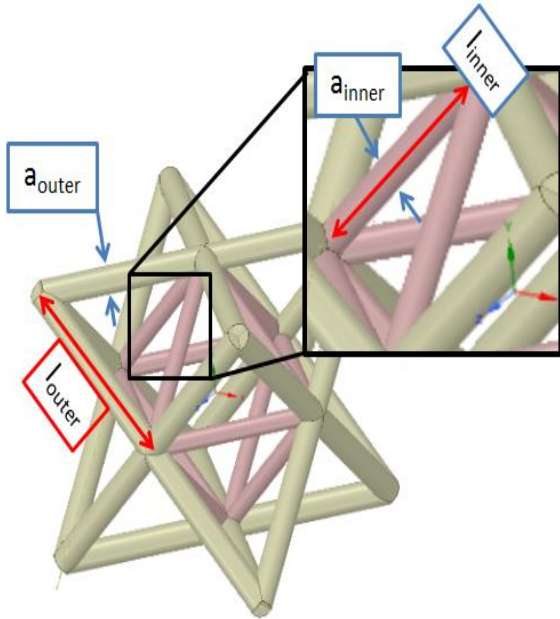


Figure 5. Unit octet truss geometry

Table 2. Details of unit octet truss geometry

	Inner Beams	Outer Beams
a = strut diameter (mm)	0.08	0.1
l = length of each strut (mm)	0.71	1.41

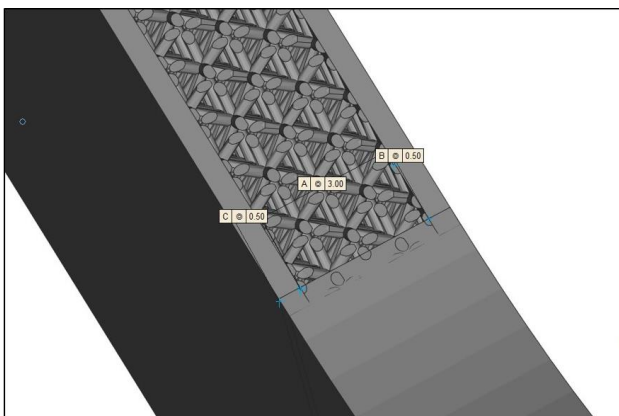


Figure 6. Isometric view of octet truss part of specimen

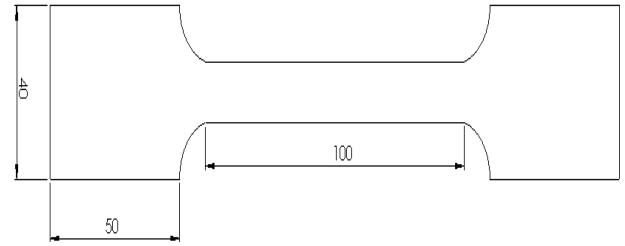


Figure 7. Specimen dimensions

Figure 7 shows the dimensions of specimens and the thickness is 4 mm. Relative density percentage at the octet-truss sections is 30% for all the specimens.

3.2 Tensile test setup

Tensile tests made with Instron 8802 hydraulic test machine in Figure 8 by ASTM D3039 standard [40]. Width and thickness values of specimens entered to the system with the test speed of 0.5 mm/min.

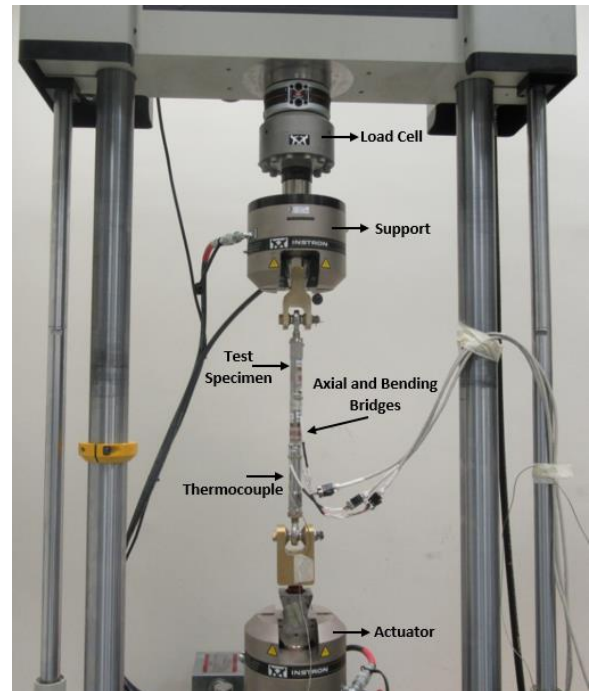


Figure 8. Tensile experiment setup

4 Results and discussions

Additive manufactured parts may not be accurate to the design. Due to high temperatures, non-uniform powder dimensions etc. the resulted parts are not identical even if they are based on the same design and manufacturing parameters. In order to research, the specimens 1, 2 & 4 (Figure 9) were built using the same solid design & process parameters and tested under the same conditions.

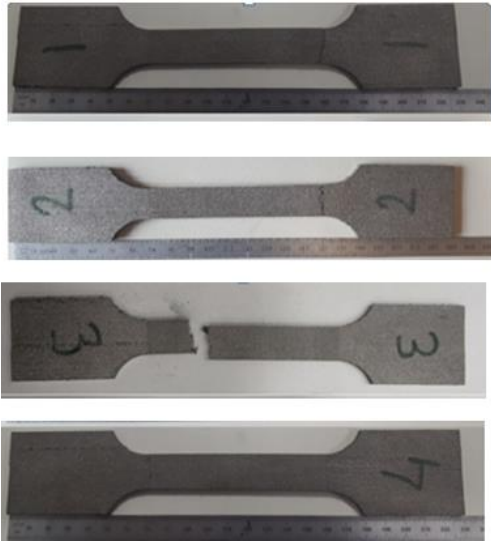


Figure 9. Octet-truss specimens

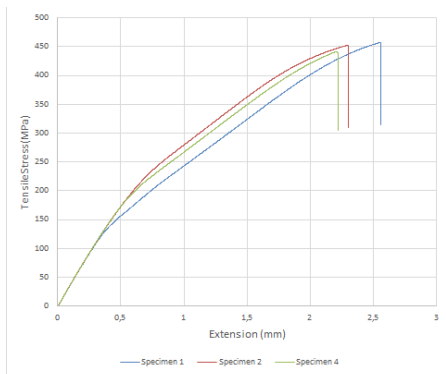


Figure 10. Tensile test data of specimens 1, 2 & 4

Table 3. Experimental ultimate tensile stress values of specimens 1, 2 & 4

Specimen Number	Ultimate Tensile Stress (MPa)
1 (wall+lattice structure)	457.0
2 (wall+lattice structure)	452.43
3 (lattice structure only)	211.2
4 (wall+lattice structure)	441.32

Figure 10 and Table 3 shows the difference occurred due to manufacturing method. Ultimate tensile stress difference between the best performed specimen 1 and worst performed specimen 4 is 15.7 MPa which is equal to 3.5%. If the analytical results taken into account which is 474.77 MPa, the gap against specimen 1 is 17.77 MPa and this gap is equal to 3.8%.



Figure 11. Specimen 1 (wall+lattice structure)



Figure 12. Specimen 3 (lattice structure only)

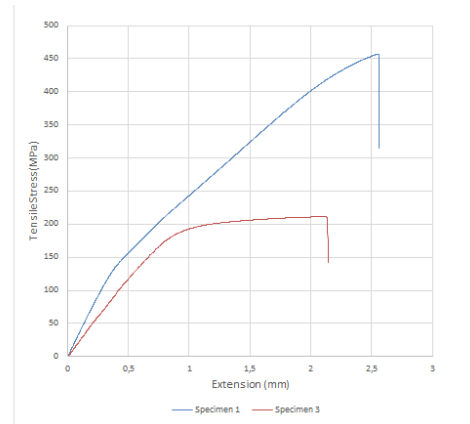


Figure 13. Tensile test data comparison of specimen 1 & 3

To investigate effects of wall addition on strength of the parts, specimen 3 manufactured without wall structure as shown in Figure 12. Comparing to the specimen 1, specimen 3 could achieve less than half tensile strength with a value of 211.2 MPa as can be seen in Figure 13. Considering cracks appears on the outer surfaces at the beginning, specimens consisting wall structure resisted much higher loads before failure, thus specimen 3 failed earlier due to this reason.

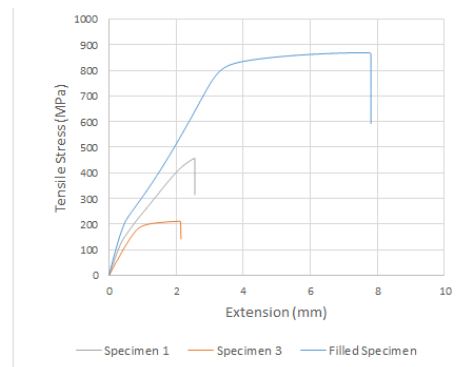


Figure 14. Tensile test data of specimen 1, 3 & filled specimen

The chart shown in Figure 14 represents the results from three different types of specimens. Specimen 1 which is made from wall and lattice structure, specimen 3 only lattice and also filled specimen without any empty spaces through the whole geometry. Filled specimen has 868.9 MPa tensile strength that means filled specimen is 190% better than specimen 1 and 412% better than specimen 3 in terms of tensile strength.

5 Conclusions

Additive manufacturing can be considered as a recent technology. Exploring this technology to understand what are the gives and takes, determine advantages and disadvantages is a crucial task. Taking into consideration EBM is a manufacturing method, exploration mostly starts with strength of the produced parts for engineering. Also one of the promises of additive manufacturing is allowing to build complex shapes. Hence, this paper focused on these subjects. Four of the tested specimens include octet-truss structures, three of them have wall and one without it. Also a filled specimen has been built. After tensile tests, wall structure addition proved to be an effective method to increase the strength more than twice times as specimens with wall achieved 457 MPa ultimate tensile strength comparing to the 211.2 MPa of specimen which doesn't have wall. It adds extra weight to the part but considering the strength increase it is likely going to be neglected. Octet-truss specimens are compared with the filled specimen to see the achievements of lattice structure with its 30% density. The result values are promising. EBM is a special type of powder bed fusion additive manufacturing since its heat source is electron beam, not laser. In this study, not only the strength of the octet-truss lattice but also the consistency of EBM method is investigated. Three specimens produced from the same solid model and with the same process parameters. Specimen 1 showed 457 MPa tensile strength while Specimen 2 showed 452.43 MPa and Specimen 4 with 441.32 MPa. If three of these specimens had the same geometry after manufacturing, then they would show almost the same ultimate tensile stress results since the tests applied on the specimens under the same conditions. Difference between the strongest and weakest specimen is 15.7 MPa which is equal to 3.5%. Depending on the designer and design, these results can be considered as significant or insignificant. Octet-truss lattice structures proved to be a worthy approach to reduce weight from the parts while still meeting the necessary strength. Additive manufacturing combined with lattice structures is an attractive combination for the studies on lightweight parts.

Acknowledgement

In the study, all of the spaceman subjected to the tensile test were produced in the Turkish aviation (TUSAS) industry. In addition, each of the tests was carried out in TUSAS facilities. We would like to thank you for the opportunities provided by the Turkish aviation industry.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Similarity rate (iThenticate): 5%

References

- [1] L. Yang, Additive manufacturing of metal cellular structures: Design and fabrication. *JOM: Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 67(3), 608-615, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1322-y>.
- [2] L. Kolbus, Comparison of residual stresses in inconel 718 simple parts made by electron beam melting and direct laser metal sintering. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 46(3), 1419-1439, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11661-014-2722-2>.
- [3] L.E. Murr, Microstructure and mechanical behaviour of Ti-6Al-4V produced by rapid-layer manufacturing, for biomedical applications. *Journal of the Mechanical Behaviour of Biomedical Materials*, 2(1), 20-32, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2008.05.004>
- [4] A. Saigal, J. Tumbleston, H. Vogel, C. Fox, N. and N. Mackay, Mechanical response of octahedral and octet-truss lattice structures fabricated using the CLIP technology. department of mechanical engineering, Tufts University, 200 College Avenue, Medford, USA, 2016. <https://doi.org/10.12783/dtscse/cmsam2016/3572>.
- [5] D. Sypeck and H. Wadley, Cellular metal truss core sandwich structures. *Advanced Engineering Materials*, 759-764, 2005. <https://doi.org/10.1007/s10443-005-1129-z>.
- [6] N. Z. M. Zaid, M. R. M. Rejab, and N. A. N. Mohamed, Sandwich structure based on corrugated-core: A Review. *MATEC Web of Conferences* 74, ICMER 2015. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167400029>
- [7] L. Dong and H. Wadley, Mechanical Properties of carbon fiber composite octet-truss lattice structures. *Computers Science and Technology*, 26(33), 119, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2015.09.022>.
- [8] L. Dong, V. Deshpande and H. Wadley, Mechanical response of Ti-6Al-4V octet-truss lattice structures. *International Journal of Solids and Structures*, 107(124), 60-61, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2015.02.020>.
- [9] V. Deshpande, N. A. Fleck and M. F. Ashby, Effective properties of the octet-truss lattice material. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 49(8), 1747-1769, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0022-5096\(01\)00010-2](https://doi.org/10.1016/S0022-5096(01)00010-2).
- [10] W. P. Syam, W. Jianwei, B. Zhao, I. Maskery, W. Elmadih and R. Leach, Design and analysis of strut-based lattice structures for vibration isolation. *Precision Engineering*, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.09.010>.
- [11] N.A. Fleck, An overview of the mechanical properties of foams and periodic lattice materials. Cambridge University Engineering Department, 2004.
- [12] A. Vigliotti and D. Pasini, Stiffness and strength of tridimensional periodic lattices. *Computational Methods Applications Mechanical Engineering*, 27(43), 229-232, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2012.03.018>
- [13] R.B. Fuller, 1961, Octet Truss. U.S. Patent No. 2,986,241
- [14] K. Finnegan, G. Kooistra and H.N. Wadley, The compressive response of carbon fiber composite pyramidal truss sandwich cores. *Int.J.Mater.Res.* 98, 1264-1272, 2007. <https://doi.org/10.3139/146.101594>.
- [15] Q. Li, E.Y. Chen and R.B. Douglas and D.C. Dunand, Mechanical properties of cast Ti-6Al-4V lattice block

- structures. Metall. Mater. Trans. A 39, 441–449, 2008. <https://doi.org/10.1007/s11661-007-9440-y>.
- [16] Q. Li, E.Y. Chen, D.R. Bice and D.C. Dunand Mechanical properties of cast Ti–6Al–2Sn–4Zr–2Mo lattice block structures. Adv. Eng. Mater. 10, 939–942, 2008. <https://doi.org/10.1002/adem.200800114>.
- [17] A. Torrents, T.A. Schaedler, A.J. Jacobsen, W.B. Carter, and L. Valdevit, Characterization of nickel-based microlattice materials with structural hierarchy from the nanometer to the millimeter scale. Acta Mater., 60, 3511–3523, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.03.007>
- [18] X. Zheng, H. Lee, T.H. Weisgraber, M. Shusteff, J. Deotte, E.B. Duoss, J.D. Kuntz et al., Ultralight, ultra-stiff mechanical metamaterials. Science 344, 1373–1377, 2014. <https://doi.org/10.1126/science.1252291>.
- [19] K.C. Cheung and N. Gershenfeld, Reversibly assembled cellular composite materials. Science 341, 1219–1221, 2013. <https://doi.org/10.1126/science.1240889>.
- [20] L.J. Gibson and M.F. Ashby, Cellular Solids: Structure and Properties. Cambridge University Press, 1999. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139878326>.
- [21] D.W. Rosen, Computer-aided design for additive manufacturing of cellular structures. Comput. Aided Des. Appl. 4, 585–594, 2007. <https://doi.org/10.1080/16864360.2007.10738493>.
- [22] C.B. Williams, J.K. Cochran and D.W. Rosen, Additive manufacturing of metallic cellular materials via three-dimensional printing. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 53, 231–239, 2011. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2812-2>.
- [23] M.K. Kulekci, Magnesium and its alloys applications in automotive industry. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 39, 851–865, 2008. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1279-2>.
- [24] J.R. Couper, W.R. Penney and J.R. Fair, Chemical Process Equipment revised 2nd Edition: Selection and Design, second ed. Gulf Professional Publishing, 2009.
- [25] R.R. Boyer and R.D. Briggs, The use of titanium alloys in the aerospace industry. J. Mater. Eng. Perform. 14(6), 681–685, 2005. <https://doi.org/10.1361/105994905X75448>.
- [26] R. Boyer and E.W. Collings, (Eds.), Materials Properties Handbook: Titanium Alloys. ASM International, 1993.
- [27] W.D. Brewer, R.K. Bird and A.W. Terry, Titanium alloys and processing for high speed aircraft. Mater. Sci. Eng., A 243, 299–304, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(97\)00818-6](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00818-6).
- [28] J. Wang, A.G. Evans, K. Dharmasena and H.N.G. Wadley, On the performance of truss panels with Kagome cores. Int. J. Solids Struct. 40, 6981–6988, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(03\)00349-4](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(03)00349-4).
- [29] P. Heintl, et al., Cellular Titanium by Selective Electron Beam Melting. Adv. Eng. Mater. 9(5), 360–364, 2007. <https://doi.org/10.1002/adem.200700025>.
- [30] G. Chahine, et al., The Design and Production of Ti-6Al-4V ELI Customized Dental Implants. JOM November, 60, 50–55, 2008. <https://doi.org/10.1007/s11837-008-0148-2>.
- [31] E.F. Bradley, Superalloys; A Technical Guide; ASM International: Materials Park, OH, 1988.
- [32] S. Biamino, et al., Electron Beam Melting of Ti-48Al-2Cr-2Nb Alloy: Microstructure and Mechanical Properties Investigation. Intermetallics 19, 776–781, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2010.11.017>.
- [33] M. Cronskär, The Use of Additive Manufacturing in the Custom Design of Orthopedic Implants. Thesis for the degree of Licentiate of Technology, Östersund, Sweden, 2011.
- [34] L.E. Murr, et al., Advanced Metal Powder Based Manufacturing of Complex Components by Electron Beam Melting. Mater. Technol., 24(3), 180–190, 2009. <https://doi.org/10.1179/106678509X12475882446133>.
- [35] L.E. Murr, et al., Metallographic Characterization of Additive-layer Manufactured Products by Electron Beam Melting of Ti-6Al-4V Powder. Pract. Metallogr, 46, 442–453, 2009. <https://doi.org/10.3139/147.110036>.
- [36] S.M. Gaytan, et al., Structure-property process Optimization in the Rapid-layer Manufacturing of Ti-6Al-4V Components by electron beam melting. tms. in supplemental proceedings: Fabrication, materials, Processing and Properties, 1, 363–369, 2009.
- [37] ARCAM A2, Setting the Standards for Additive Manufacturing. <http://www.arcam.com/wp-content/uploads/Arcam-Ti6Al4V-Titanium Alloy.pdf>, 2011.
- [38] L. Wei, et al., Scan Strategy in Electron Beam Selective Melting. Tsinghua Sci. Technol. 14(1), 120–126, 2009. [https://doi.org/10.1016/S1007-0214\(09\)70078-1](https://doi.org/10.1016/S1007-0214(09)70078-1).
- [39] Ansys SpaceClaim <https://www.ansys.com/products/3d-design/ansys-spaceclaim>.
- [40] ASTM INTERNATIONAL <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D3039D3039M>

